

TORNEAMENTO DA LIGA Ti-6Al-4V EM OPERAÇÃO DE ACABAMENTO COM FERRAMENTAS DE METAL DURO E PCD

MSc Carlos Alberto Magalhães

IMBEL-FI Indústria de Material Bélico do Brasil / UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá.

calmagal@ig.com.br

Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Instituto de Engenharia de Produção e Gestão da UNIFEI

jorofe@unifei.edu.br

***Resumo:** A constante evolução tecnológica, com exigências cada vez maiores de solicitações mecânicas e o conseqüente desenvolvimento de novos materiais, tornam necessárias a descoberta de novos processos de fabricação, a otimização de parâmetros para processos já existentes e o desenvolvimento de novas ferramentas. O objetivo deste trabalho é estudar o processo de usinagem por torneamento externo em operação de acabamento da liga de titânio Ti-6Al-4V que tem sido aplicado em larga escala nas indústrias: Química, Marítima, Aeroespacial, Biomédica e, principalmente, na indústria de Material de Defesa.*

***Palavras-chave:** Torneamento, Liga Ti-6Al-4V, Vida de ferramenta, Metal duro, Diamante*

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de componentes em ligas de titânio tem se mostrado promissor na área bélica há muitos anos, iniciando-se com o desenvolvimento dos primeiros mísseis balísticos na década de 50 até as mais recentes aeronaves de combate e, a partir dos anos 90 a forte concorrência na fabricação de armas portáteis utilizando esse material, devido à características, como: leveza, excelente resistência mecânica e à corrosão, tenderam a disseminar ainda mais sua aplicação também na fabricação de armamentos civis leves [1].

Esse trabalho é voltado para otimização de ferramentas e de parâmetros de corte que permitem a produção de armamentos leves com componentes em liga de titânio, dentro de padrões aceitáveis de custo de produção sem a necessidade de investimentos em novos equipamentos e utilizando ferramental disponível no mercado nacional. Seguindo este critério, foi escolhido um desafio com vínculo a necessidades reais vividas numa tradicional empresa fabricante de material bélico, a IMBEL – FI, localizada em Itajubá – MG. O foco deste trabalho foi voltado ao desenvolvimento do processo de torneamento em operação de acabamento de componentes em liga de titânio Ti-6Al-4V, que com certeza terá que se expandir num futuro próximo para a pesquisa de outros tipos de usinagem como: fresamento, brochamento e furação, assim como, para o desenvolvimento de outros processos como forjamento, fundição e sinterização (metalurgia do pó). Como o início dos estudos sobre usinagem de ligas de titânio se deu devido ao interesse da empresa em adquirir tecnologia na usinagem de superligas, optou-se por concentrar esforços na fabricação por usinagem, de um componente de pistolas semi-automáticas modelo exportação denominado “Percussor”. Nesse trabalho foram escolhidas para avaliação, ferramentas de metal duro, nitreto de boro cúbico e diamante policristalino por se tratarem de ferramentas técnica e economicamente viáveis a esse tipo de usinagem, e, os parâmetros de corte testados levaram em consideração quesitos de projeto do produto como grau de rugosidade e condições econômicas de usinagem como produtividade e vida de ferramenta [2,3,4,5]

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Como o trabalho foi desenvolvido com finalidades de aplicação prática na indústria, os experimentos foram realizados na linha de fabricação da Indústria de Material Bélico do Brasil, IMBEL – FI, localizada em Itajubá-MG. A síntese deste trabalho foi de tentar otimizar as condições de corte e determinar o melhor tipo de ferramenta para usinagem de acabamento da liga de titânio Ti-6Al-4V em operação de torneamento. Neste estudo, mais especificamente, foi enfocado também o critério do acabamento superficial que devido às necessidades construtivas da peça, não pode ultrapassar valores de rugosidade média (Ra) superiores a 0,8 μm , de modo a eliminar operações de retificação na fase final de acabamento.

2.1. Material

O material utilizado nos ensaios foi a liga de titânio Ti-6Al-4V laminada em barras cuja composição química e as propriedades mecânicas são apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Composição química da liga Ti-6Al-4V [1]

Elementos de liga	Fe	N	O	H	Al	V	Ti
% em peso	0,216	0,0024	0,16	0,0033	6,28	4,27	89,07

Tabela 2. Propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V / AISI 1045 [1]

Tensão limite de escoamento (MPa)	Tensão limite ruptura (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)	Dureza (HB)
911,4	999,6	12	32	292

2.2. Máquinas e Equipamentos

Para execução deste trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Um torno CNC marca Romi modelo Cosmos 10U com 7,5kW de potência e com rotação máxima de 6000 rpm para usinagem dos corpos de prova.
- Um microscópio ótico marca ERNST LEITZ com capacidade de aumento de 36 vezes para analisar o desgaste das ferramentas.
- Um paquímetro digital Mitutoyo de 150 mm para controlar o diâmetro dos CDP
- Um rugosímetro portátil marca Mitutoyo modelo SJ-201.
- Um microscópio eletrônico de varredura (MEV) LEO modelo 1450-VP com filamento de tungstênio (DEMAR / FAENQUIL), para avaliação do desgaste das ferramentas.

2.3. Ferramentas e Fluido de Corte

Neste trabalho utilizou-se as seguintes ferramentas:

- Um suporte para torneamento ISO SVJBR 2020 K16;
- Insertos de nitreto de boro cúbico (CBN) com geometria ISO VBMW-160404 (Rossi Ferramentas);
- Insertos de diamante (PCD) com geometria ISO VBMW-160404 (Rossi Ferramentas);
- Insertos de metal duro (MD) classe ISO S10, com geometria ISO VBGT- 160404-UM- H10A.

Nos ensaios experimentais utilizou-se o óleo de corte Syntilo 920 da Castrol. Fluido sintético bioestável, com propriedades anticorrosivas isento de cloro, nitritos e fenóis, para uso em retífica e usinagem em máquinas operatrizes convencionais e a comando numérico de metais de média a baixa usinabilidade com concentração variando de 7 a 10% em água. Indicado para substituição de óleos integrais ou fluidos de corte solúveis a base mineral tipo EP.

Para interpretar e analisar os dados levantados durante o experimento foi utilizada a metodologia de Projeto e Análise de Experimentos com auxílio de métodos estatísticos para análise

dos resultados [6]. O avanço tecnológico da informática tem contribuído com softwares desenvolvidos para a execução dessa etapa, como por exemplo o MINITAB.

2.4. Metodologia Experimental

Para os primeiros ensaios utilizaram-se as condições de corte recomendadas pela literatura. Após análise dos resultados obtidos estas condições foram sendo otimizadas, para só então se iniciar os ensaios definitivos utilizando maior número de amostras e fazendo uso da técnica de projeto e análise de experimento. Ao longo dos ensaios preliminares foram sendo reajustados os parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço, refrigeração e profundidade de corte) em função dos danos observados nas ferramentas e tomando por base a rugosidade $Ra=0,8 \mu\text{m}$, descartou-se o uso das ferramentas de CBN anteriormente recomendada por Zoya⁽⁵⁾. Como também, optou-se pela usinagem com fluido de corte devido à severidade dos desgastes apresentados quando do corte a seco.

Com a avaliação dos resultados dos ensaios preliminares foi possível definir melhor os parâmetros a serem testados e iniciar as séries de ensaios definitivos. Nesta etapa de ensaios substituiu-se a ferramenta de CBN por ferramentas de metal duro classe ISO S10 (Sandvik H10A). O metal duro mostrou-se menos sensíveis ao desgaste prematuro durante a fase de preparação dos corpos de prova e também devido seu baixo custo em relação às ferramentas de CBN. Por se tratarem de ferramentas com características bem distintas das de PCD quanto à suas limitações, optou-se por elaborar duas Tabelas 3 e 4 com parâmetros diferenciados, o que permitiu explorar ao máximo todo potencial de cada ferramenta.

Tabela 3. Variáveis do ensaio com ferramenta de metal duro

Parâmetros de ensaio	Variação
Velocidade de corte V_c (m/min)	80 e 100
Avanço f (mm/v)	0,05 e 0,07
Profundidade de corte a_p (mm)	0,25
Refrigeração (com e sem)	CR e SR

Tabela 4. Variáveis do ensaio com ferramenta de PCD

Parâmetros de ensaio	Variação
Velocidade de corte V_c (m/min)	140 e 160
Avanço f (mm/v)	0,05 e 0,07
Profundidade de corte a_p (mm)	0,25
Refrigeração (com)	CR

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Resultados com Ferramenta de Metal Duro (MD)

Diante dos resultados alcançados nos ensaios preliminares onde a ferramenta de CBN apresentou um péssimo desempenho, acreditou-se ter atingido, mesmo que de uma forma empírica, uma faixa de valores de parâmetros de usinagem da liga Ti-6Al-4V. Nesse estágio, com o auxílio do software MINITAB foi possível analisar com maior detalhamento os dados obtidos e estreitar a atual faixa de variação, em outras palavras poder-se-á refinar a análise para se chegar à uma melhor condição em relação ao conjunto de variáveis envolvidas no processo.

Fazendo uma análise dos dados da Tabela 3, para definir quais interações de parâmetros propiciam um menor grau de rugosidade, foram obtidos os gráficos mostrados a seguir acompanhados de comentários. Na Figura 1, observa-se o efeito individual de cada parâmetro de corte na rugosidade, para as ferramentas de metal duro. Os dados confirmam a tendência em relação ao avanço de corte, onde se observa que menores avanços propiciam menor rugosidade. A usinagem com refrigeração, devido à maior preservação da aresta cortante da ferramenta, também

propicia menor rugosidade. E numa análise individual diferentemente do esperado, a menor velocidade de corte favoreceu a redução rugosidade, talvez devido a imprevisibilidade do efeito da formação da aresta postiça, embora sua influência seja bastante atenuada. As seqüências posteriores de análises irão demonstrar a importância de se conhecer a influência das interações entre os parâmetros.

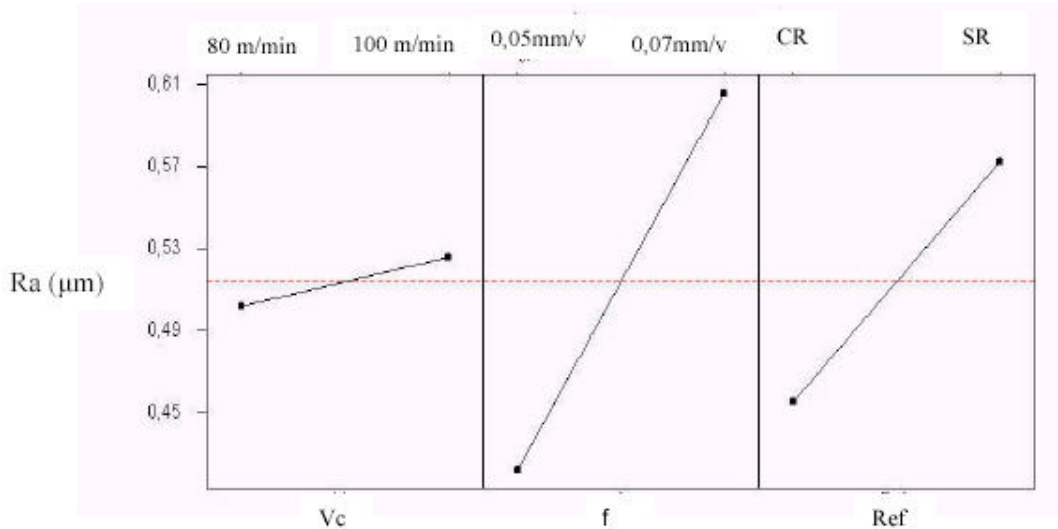


Figura 1. Grau de influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade

Na Figura 2 é mostrado o efeito das interações entre parâmetros de usinagem para a ferramenta de metal duro, avaliadas em conjunto e dispostas de forma decrescente, permitindo uma visualização comparativa sobre o grau de influência de cada parâmetro e entre os possíveis grupos de interações. O limite indicado pela linha tracejada no gráfico mostra o ponto a partir do qual as interações e/ou parâmetros não são mais significativos (à esquerda da linha tracejada) para influenciar o grau de rugosidade.

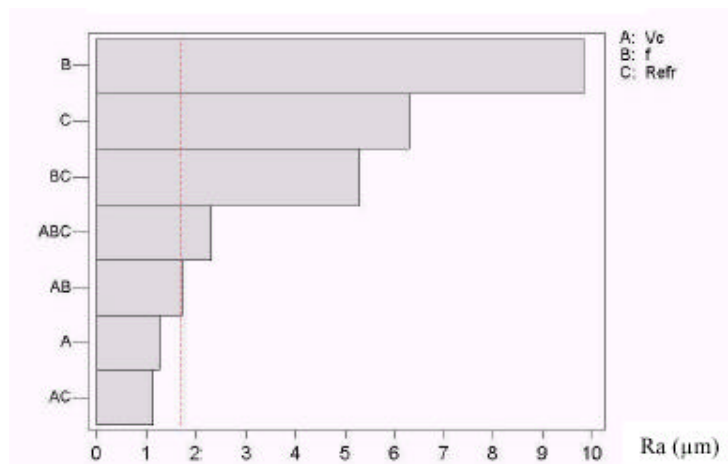


Figura 2. Efeitos dos parâmetros e suas interações na rugosidade, para ferramenta de metal duro

Analisando os resultados obtidos com a ferramenta de metal duro e visando estritamente um melhor acabamento superficial, nos parece lógico adotar velocidades de corte mais baixas $V_c = 80$ m/min, avanços de corte também mais baixos, $f = 0,05$ mm/v e utilizar fluido refrigerante em abundância. Essa decisão, porém, ainda não pode ser concluída de forma individual, lembrando que, como estamos fazendo uma análise comparativa entre duas ferramentas distintas, a eficiência na usinagem é um fator muito importante. Assim sendo, a próxima etapa onde se fará a análise da

ferramenta PCD servirá de subsídio para a próxima fase, que será a avaliação econômica e de desempenho.

3.2. Resultados dos Ensaios com Ferramenta de Diamante (PCD)

Na Figura 3, observa-se o efeito individual de cada parâmetro da tabela 4 em relação ao grau de rugosidade obtido com ferramenta PCD. Menores avanços propiciam menor rugosidade, como também a refrigeração propicia menor rugosidade, e assim como o ocorrido com o MD, a menor velocidade de corte favoreceu um menor grau de rugosidade, embora sua influência também tenha sido pouco significativa para o intervalo analisado.

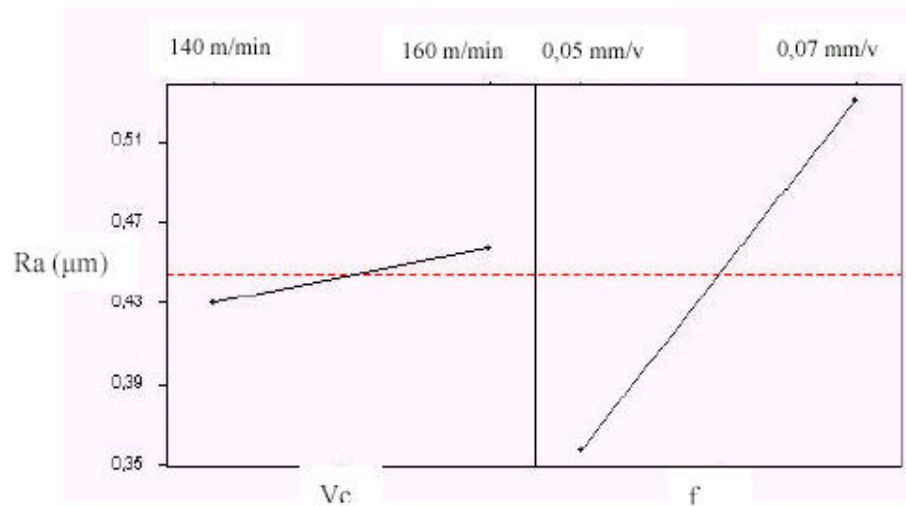


Figura 3. Influência individual dos parâmetros de usinagem na rugosidade para ferramenta de PCD

Na Figura 4 observa-se o efeito dos parâmetros de usinagem com ferramenta de PCD. Esse tipo de análise interativa é fundamental para a compreensão do processo de usinagem pois permite que se faça alterações em parâmetros pouco influentes no acabamento, mas que sejam significativos por exemplo no aumento da produtividade como é o caso da velocidade de corte.

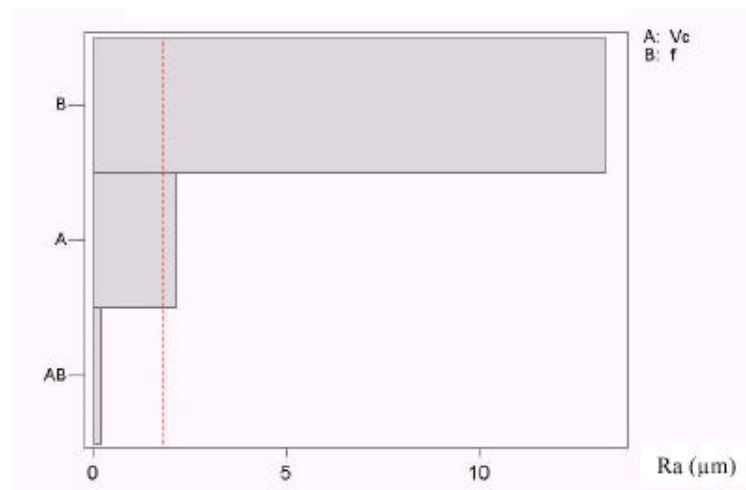


Figura 4. Efeitos dos parâmetros / interações na rugosidade Ra, para ferramenta de PCD

Diante das informações analisadas, pode-se concluir que, o controle do avanço é preponderante na determinação da rugosidade. Como para ambas as ferramentas testadas a velocidade e corte teve pequena influência no resultado da rugosidade torna-se vantajoso trabalhar com velocidades mais

altas limitadas em função da vida da ferramenta e menores avanços em função do grau de rugosidade que se deseja obter.

3.3. Avaliação de Vida de Ferramentas

Tomando como base os parâmetros escolhidos, pode-se fazer uma analogia entre vida de ferramentas para se estabelecer quais das ferramentas testadas é economicamente viável para a fabricação nas condições reais de chão de fábrica. Uma vez definidas as condições de usinagem e determinadas as ferramentas tecnicamente mais viáveis para usinagem no torneamento da liga Ti-6Al-4V, faz-se necessário avaliar o custo envolvido na operação, de modo a baixá-lo tornando o produto atraente também do ponto de vista comercial.

O titânio, como já foi mencionado, é considerado uma matéria prima de custo elevado (US\$ 375.00/kg). Assim, os custos envolvidos na fabricação devem ser muito bem planejados sob pena de não se conseguir um produto a preço competitivo junto ao mercado internacional. Nesta etapa do trabalho se avaliará a eficiência das ferramentas de Metal Duro e PCD em função de seus desempenhos no que tange a vida (comprimento de corte) e assim definir qual ferramenta será mais viável no torneamento da liga Ti-6Al-4V. Na Figura 5 é mostrada a evolução da rugosidade Ra da peça em função do comprimento de corte usinado com ferramenta de diamante.

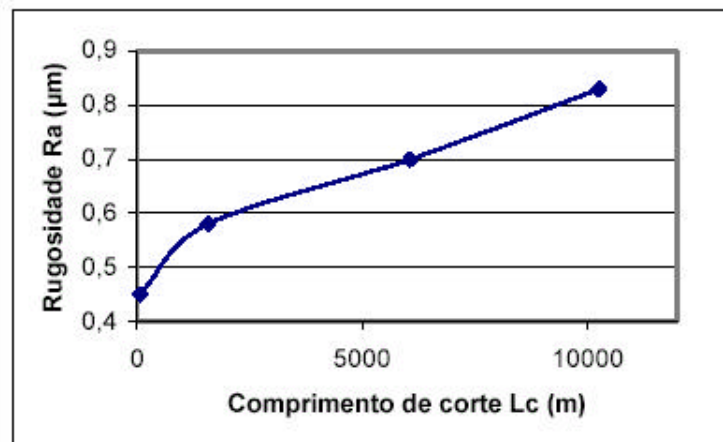


Figura 5. Variação da rugosidade Ra em função do comprimento usinado l_c para ferramenta de PCD ($V_c= 160$ m/min ; $f= 0,07$ mm/v ; $a_p= 0,25$ mm ; CR)

Na Figura 6 é mostrada a ferramenta de PCD, onde se observa que apesar de alguma aderência de material usinado na superfície de saída e um pequeno desgaste de entalhe a ferramenta, ainda se apresenta em boas condições considerando o $l_c=10266$ m, não fosse pelo grau de acabamento obtido no último passe de usinagem ($R_a = 0,83$ µm).

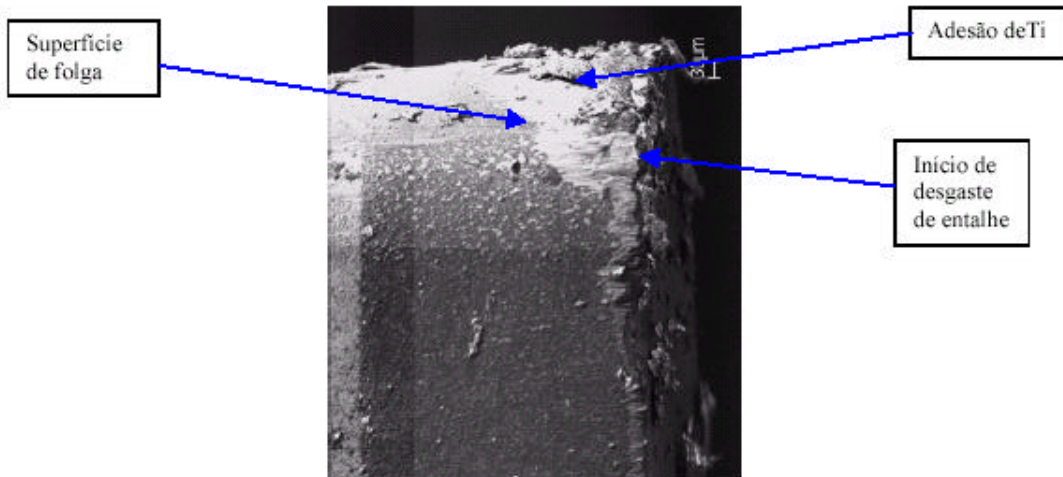


Figura 6. Ferramenta de PCD ($l_c=10266$ m, $V_c=160$ m/min, $f=0,07$ mm/v, $a_p=0,25$ mm, CR)

Vale considerar que o teste foi interrompido quando superou a rugosidade R_a de $0,8 \mu\text{m}$ (critério para fim de vida) e o comportamento da vida da ferramenta com tempo de corte de 64,15 minutos é considerado bom (Sandvik, 2002). Observou-se também o comportamento da vida de ferramentas de metal duro. Na Figura 7 é apresentada a evolução da rugosidade da peça em função do comprimento de corte usinado.

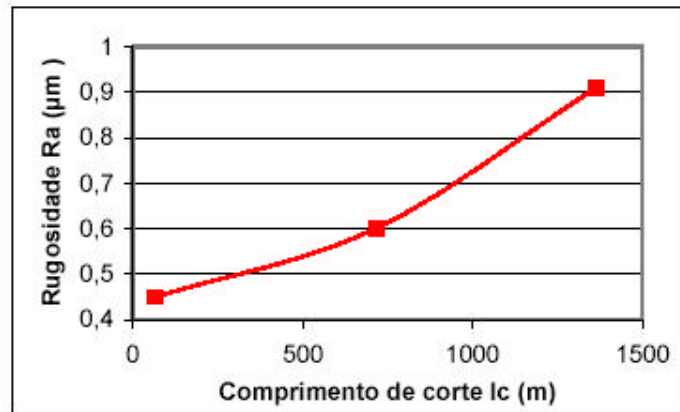


Figura 7. Variação da rugosidade R_a em função do comprimento usinado, com ferramenta de MD ($V_c=100$ m/min ; $f=0,07$ mm ; $a_p=0,25$ mm ; CR)

Na Figura 8 é mostrada a ferramenta de metal duro onde observa-se grande adesão de material usinado, porém, um pequeno desgaste, considerando o $l_c=956$ m.

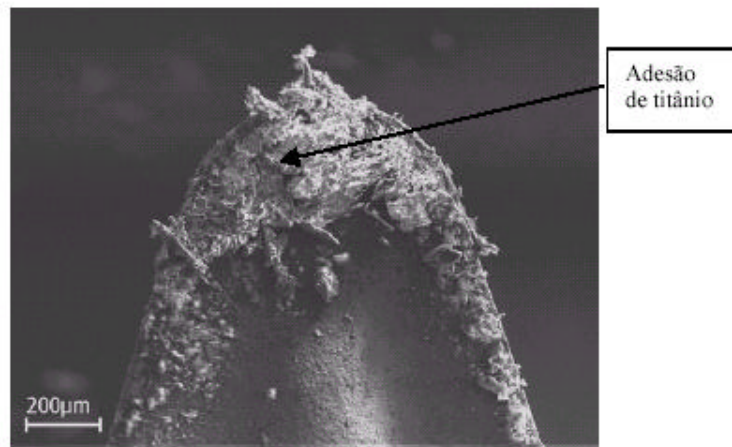


Figura 8. Ponta da ferramenta de metal duro ($l_c = 956$ m, $V_c = 100$ m/min, $f = 0,07$ mm/v, $a_p = 0,25$ mm, CR).

As ferramentas de metal duro, apesar de se mostrarem resistentes nos ensaios de desbaste não mantiveram uma aresta de corte capaz de conservar o padrão de rugosidade por muito tempo. O tempo médio de vida de aresta, 11,34 minutos, ficou aquém dos valores esperados para usinagem de materiais convencionais que é de 15 a 20min, porém considerando-se a liga em questão, pode-se dizer que esta bem próximo do ideal. A Figura 9 apresenta o comportamento das ferramentas de PCD e MD em função do l_c usinado, respeitando as velocidades de corte adotadas: $V_c = 100$ m/min para o MD e $V_c = 160$ m/min para o PCD e considerando a rugosidade R_a de $0,8 \mu\text{m}$ como critério para fim de vida.

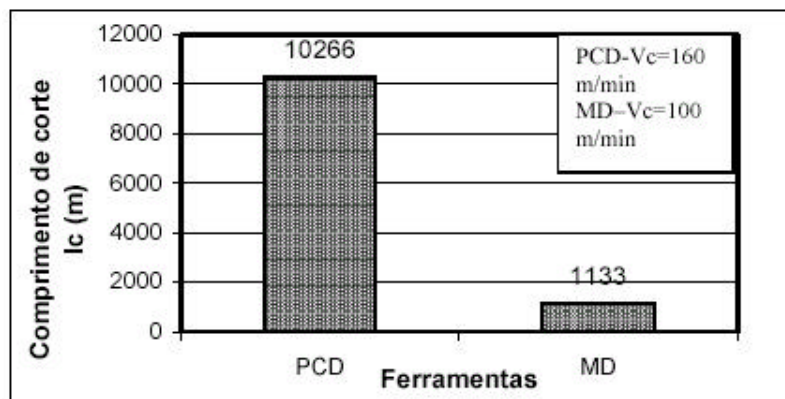


Figura 9. Vida das ferramentas de PCD x MD em função do comprimento de corte l_c ($f = 0,07$ mm/v, $a_p = 0,25$ mm, CR).

Considerando-se o preço aproximado da ferramenta de metal duro: VBGT 160404-UM H10A como sendo de US\$ 17.82 ou seja, US\$ 8.90 por aresta de corte (o inserto dispõe de duas arestas), e para o inserto de diamante: VBGT 160404 PCD como sendo US\$ 40.00 (o inserto dispõe de apenas uma aresta), poderemos fazer uma avaliação de custo baseado apenas em tempo de corte sobre o desempenho econômico das ferramentas estudadas.

Iniciando pelo inserto de PCD apuramos que, com uma única aresta pude-se usinar um comprimento de corte $l_c = 10266$ m, o que nos indica um custo em ferramenta de US\$ 0.0038 por metro de corte. No caso da ferramenta de MD observamos que com uma aresta é possível usinar um comprimento de corte $l_c = 1133$ m, indicando um custo em ferramenta de US\$ 0.0078 por metro usinado. Na Figura 10, é feito um comparativo entre os custos das duas ferramentas.

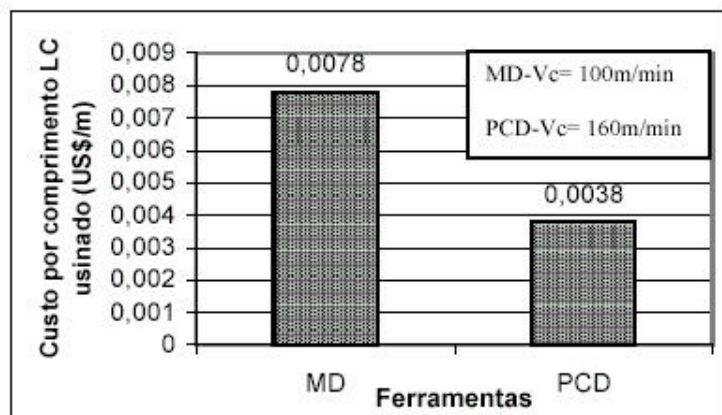


Figura 10. Comparativo de custo da ferramenta, por comprimento l_c usinado ($f=0,07$ mm/v, $a_p=0,25$ mm, CR).

Se levarmos em conta somente esses aspectos do custo por comprimento usinado, já seria intuitiva a escolha do inserto de PCD, porém se levarmos ainda em consideração que a velocidade de corte $V_c=160$ m/min utilizada na usinagem com esta ferramenta é 60% superior a utilizada com a ferramenta de MD, podemos afirmar com certeza que sua produtividade será comparativamente maior diminuindo, portanto, o tempo de fabricação da peça.

4. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos no torneamento de acabamento da liga Ti-6Al-4V pode-se concluir que:

- A ferramenta de CBN não apresentou resultado satisfatório na usinagem da liga Ti-6Al-4V apresentando elevado desgaste de cratera seguido de quebra (falha catastrófica);
- A taxa de avanço apresentou elevada influência na rugosidade R_a da peça, sendo que, para maiores avanços obteve-se maior rugosidade;
- A ferramenta de diamante (PCD) foi a que assegurou por mais tempo a rugosidade R_a abaixo do patamar de $0,8 \mu\text{m}$, apresentando maior vida que a ferramenta de metal duro;
- A velocidade de corte deve ser menor que 100 m/min para o metal duro e menor que 160 m/min para o PCD, o avanço máximo de $0,07\text{mm/v}$ e a profundidade de corte máxima de $0,25$ mm, para ambas as ferramentas, considerando a rugosidade como critério para fim de vida;
- O fator refrigeração foi bastante significativo para assegurar maior vida das ferramentas;
- O custo da ferramenta de PCD por comprimento usinado, se mostrou mais baixo que a de metal duro, apesar de seu custo inicial mais alto;
- Na condição de usinagem com refrigeração observou-se menor tendência de adesão de cavaco na superfície de saída das ferramentas.

5. REFERÊNCIAS

1. MACHINING. Metals Handbook, 9 ed, ASM, V 16, 1997.
2. JAWAID, A., CHE-HARON, C.H., ABDULLAH, A. **Tool Wear Characteristics in Turning of Titanium Alloy Ti-6246.**: Journal of Processing Technology, p329-334, 1999.
3. MACHADO, A.R. , WALLBANK, J. **Machining of Titanium and its Alloys - a review.** Proc. Instn. Mech. Engrs, v.204, n. B1, p.53-60, 1990.
4. NARUTAKI, N., MURAKOSHI, A. **Study on Machining of Titanium Alloys.** Hiroshima University/ Japan: CIRP ANNALS, v.32/1, 1983.

5. ZOYA, Z.A., KRISHNAMURTHY, R. **The Performance of CBN Tools in Machining of Titanium Alloys**. Journal of Processing Technology 100, p80-86, 1998.
6. MONTGOMERY, D. C., **Design and Analysis of Experiments**. New York: Georgia Institute of Technology, 1984.
7. MOREIRA, Marcos R.V. **Estudo da Usinagem por Torneamento da liga Ti-6Al-4V**. Lorena-SP, Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia de Materiais): Departamento de Materiais, FAENQUIL, 2002.

TURNING OF THE Ti-6Al-4V ALLOY IN FINISH OPERATION WITH CARBIDE AND PCD TOOLS

MSc Carlos Alberto Magalhães

IMBEL-FI industry of armaments of Brazil / UNIFEI – Federal University of Itajubá.
calmagal@ig.com.br

Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Institute of production engineering of UNIFEI
jorofe@unifei.edu.br

Abstract : *The constant evolution, with demands every larger of mechanical solicitations time and the consequent development of new materials, it turns necessary the discovery of new production processes, optimization of parameters for processes already existent and the development of new tools. The objective of this work is to study the finishing machining process for external turning of titanium alloy Ti-6Al-4V that has been applied in wide industrial scale such as: Chemistry, Naval, Aerospace, Biomedical and mainly in the Defense Industry.*

Keywords : *Turning, Ti-6Al-4V Alloy, Tool life, Carbide, PCD*