

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM SOBRE A INTEGRIDADE SUPERFICIAL NO TORNEAMENTO DE FACE COM FERRAMENTAS DE DIAMANTE NOS MATERIAIS: TI (CP) E A LIGA Ti-6Al-4V

João Paulo Colafemina

Universidade de São Paulo – EESC – Av Trabalhador São Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos
cola@sc.usp.br

Renato Goulart Jasinevicius

Universidade de São Paulo – EESC – Av Trabalhador São Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos

Jaime Gilberto Duduch

Universidade de São Paulo – EESC – Av Trabalhador São Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos

Arthur José Vieira Porto

Universidade de São Paulo – EESC – Av Trabalhador São Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos

Resumo. Na usinagem, os erros de forma, ondulação e rugosidade são diretamente afetados por fatores como propriedades físicas e mecânicas do material, estado de afiação e da geometria da ferramenta, condições de usinagem e por aspectos relacionados à dinâmica das máquinas-ferramentas. Este trabalho tem por objetivo investigar o efeito do material da ferramenta e das condições de corte na usinagem de titânio comercialmente puro (Ti-CP) e ligado (Ti-6Al-4V). Para isso, um torno de ultraprecisão com elevada rigidez e precisão de posicionamento foi usado para os testes de usinagem. Acabamento superficial e microdureza da superfície foram analisados. Os resultados mostraram que para o acabamento superficial a mínima rugosidade (R_t) foi de 283 nm para o Ti (CP) e 416 nm para Ti-6Al-4V. Este tipo de análise é fundamental, pois a rugosidade está intrinsecamente ligada à resistência à fadiga o que torna um fator determinante no dimensionamento de projetos. As amostras (Ti-(CP) e de Ti-6Al-4V) apresentaram aumento significativo da microdureza na superfície usinada demonstrando que houve um severo encruamento após a usinagem, os aumentos foram de 40% tanto para o Ti (CP) quanto para a liga Ti-6Al-4V, usinados em condições finas. Microscopia óptica foi usada para observar os aspectos qualitativos da superfície usinada e polida.

Palavras Chave: Titânio, ligas de titânio, ferramentas de diamante, integridade superficial, torneamento de ultraprecisão.

1. INTRODUÇÃO

Titânio e suas ligas são amplamente usados na indústria aeroespacial por causa de sua excelente combinação de elevada resistência (razão resistência/peso) a qual se mantém a elevadas temperaturas, suas características de resistência à fratura, e sua resistência à corrosão. Devido a essas propriedades aplicações na área de implantes médicos também tem despertado bastante interesse pela sua usinabilidade, pois este material apresenta alta biocompatibilidade⁽¹⁾.

Apesar, de outras inúmeras aplicações do titânio e suas ligas, sua utilização torna-se restritiva devido ao fato de ser um material muito caro se comparado a outros metais. Seu elevado custo está relacionado às complexidades de sua extração, dificuldades de fusão e usinagem.

Grande parte das peças conformadas em titânio e suas ligas ainda são fabricadas através de métodos de usinagem convencional. De maneira geral, todos os processos de usinagem são aplicados na produção de componentes. No entanto, a usinabilidade de titânio e suas ligas geralmente são consideradas ruins devido a diversas propriedades inerentes do material. O titânio é muito reativo quimicamente, portanto apresenta a tendência de soldar-se na ferramenta durante a usinagem, levando-a assim ao lascamento e falhas prematuras. Sua baixa condutividade térmica aumenta a temperatura na interface ferramenta/peça, a qual afeta a vida da ferramenta de

maneira adversa. Além disso, sua alta resistência a altas temperaturas e seu baixo módulo de elasticidade são considerados prejudiciais a sua usinabilidade ⁽¹⁾.

O torneamento com diamante é o processo onde se utiliza uma ferramenta especial monocortante de diamante monocristalino em uma máquina ferramenta de ultraprecisão, especialmente projetada para produzir acabamentos de superfícies, sob condições precisamente controladas: de máquinas, ferramenta e ambiente.

A integridade superficial de componentes usinados é um importante aspecto para os tipos de usinagem fina. A microestrutura da camada superficial pode ser profundamente alterada pelos processos de usinagem. A interação ferramenta/peça, introduz danos à peça, tais como, mudanças microestruturais devido à deformação plástica que resultam em encruamento. Como já se sabe, ferramentas de diamante monocristalino causam pequenos danos à camada superficial, mas mesmos pequenos encruamentos podem afetar o desempenho do componente usinado ⁽²⁾.

Este artigo irá detalhar alguns aspectos da integridade superficial das peças após a usinagem. Como a superfície da peça, tanto de Ti (CP) quanto da liga Ti-6Al-4V, podem sofrer danos impostos pela interação ferramenta/material. A microdureza Vickers foi usada para investigar a variação do grau de encruamento induzido pelas condições de corte.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado para determinar o comportamento de uma liga de Titânio (Ti-6Al-4V, isto é, 6% em massa de alumínio e 4% em massa de vanádio em uma base de titânio) e Titânio comercialmente puro Ti (CP) no processo de torneamento de face com ferramenta de diamante monocristalino. Os ensaios foram feitos com uso de fluido de corte aplicado em forma de névoa (~100 ml/hora) em uma máquina ferramenta com alta rigidez e precisão de posicionamento ASG 2500 da Rank Pneumo[®] (resolução 10 nanômetros). As profundidades de usinagem (ap) usadas são descritas na Tabela 1. A geometria da ferramenta e as condições de usinagem são descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Geometria da ferramenta e condições de corte usadas nos ensaios.

| Condições de corte e geometria da ferramenta | Valores |
|--|------------------|
| Avanço ($\mu\text{m}/\text{rev}$) | 5, 10, 15, 20 |
| Profundidade de corte (μm) | 1, 5, 10, 15, 20 |
| Rotação (rpm) | 1000 |
| Raio de ponta (mm) | 1,508 |
| Ângulo de saída $\gamma(^{\circ})$ | -5 |
| Ângulo de folga $\alpha(^{\circ})$ | 12 |

Para avaliação do acabamento superficial foi usado um rugosímetro modelo Form Talysurf Intra, da TAYLOR HOBSON PRECISION[®]. Os resultados foram apurados por meio da média de 4 medidas repetidas para cada condição de corte. O parâmetro escolhido para avaliar o acabamento superficial foi a rugosidade de pico-a-vale (R_t) uma vez que a altura relativa da microtopografia é mais representativa para o acabamento superficial.

As metalografias do Ti (CP) e do Ti-6Al-4V podem ser observadas na Figura 1 (a) e 1 (b) respectivamente, atacadas com reagente KROLL. O titânio tem duas estruturas cristalinas: uma é cúbica de corpo centrado (beta) e a outra é hexagonal compacta (alfa) ⁽³⁾.

Uma das propriedades mais importantes da liga Ti-6Al-4V para usinagem é sua baixa condutividade térmica (7,3 W/mK) que influencia negativamente na dissipação do calor fazendo com que este se concentre na aresta de corte da ferramenta.

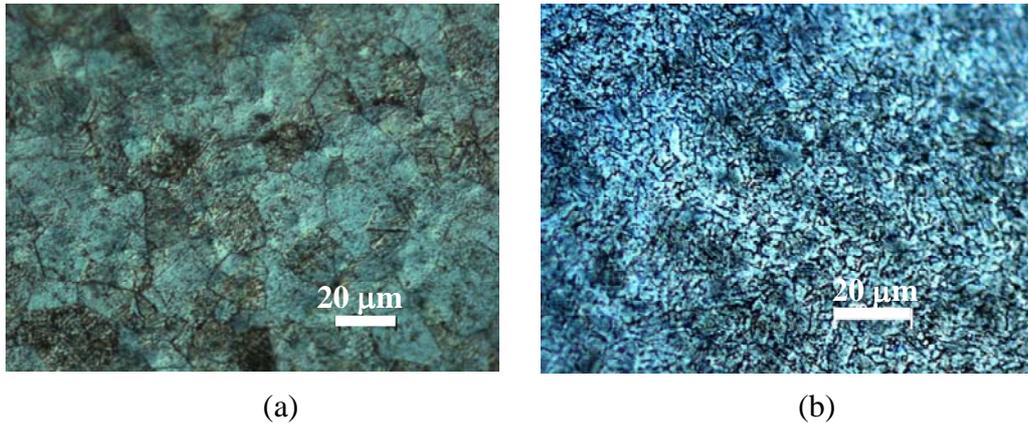


Figura 1. Metalografias; (a) Microscopia óptica do Ti (CP) ampliado 500x; (b) Liga Ti-6Al-4V, pode-se observar matriz com grãos equiaxiais alfa (cor azul) e beta intergranular (cor preta) em uma matriz alfa, ampliação de 500x.

As medições de microdureza da amostra usinadas foram realizadas em um Microdurômetro marca *BUEHLER*[®] Micromet III Digital. Um endentador de diamante Vickers foi pressionado durante um ciclo de 15 segundos em cada amostra. As cargas aplicadas foram 10g, 25g, 50g, 100g e 200g. Os resultados foram apurados por meio da média de 5 medidas repetidas para cada carga.

Os cavacos removidos foram analisados através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com objetivo de investigar se sua formação muda em função do material da ferramenta e dimensões de corte.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, poliu-se uma amostra de Ti (CP) e outra de Ti-6Al-4V para obter suas durezas no estado polido, no qual os valores médios apresentados com diversas cargas foram de 210 HV e de 310 HV para as respectivas amostras.

A Figura 2 mostra os gráficos das microdurezas feitas no Ti (CP) usinado com $f = 10\mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 1\mu\text{m}$ e no Ti-6Al-4V usinado com $f=10\mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p=1\mu\text{m}$. Em ambas as amostras é possível observar que houve um elevado encruamento que foram de 40% para o Ti, e de 40% para o Ti-6Al-4V aproximadamente.

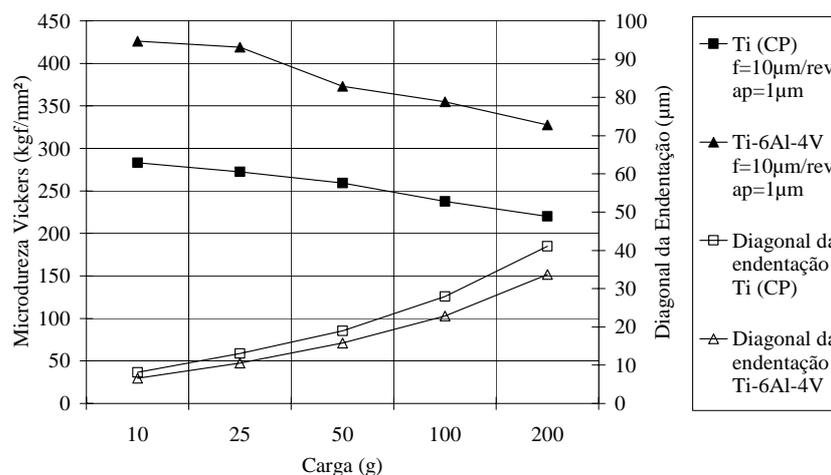


Figura 2. Gráfico das durezas e diagonais Vickers do Ti (CP) e da liga Ti-6Al-4V obtidas com cargas de 10, 25, 50, 100 e 200 g.

Como a afiação das ferramentas de diamante gera aresta de corte muito delgada esperava-se que o encruamento na amostra não fosse tão alto em condições finas de usinagem. De acordo com Jasinevicius et al.⁽²⁾ na usinagem de ligas de alumínio a variação da dureza na amostra deixada após

a usinagem com condições de corte semelhantes foi da mesma ordem de grandeza. Além do mais, observa-se um decréscimo nas durezas enquanto aumentam-se os valores dos carregamentos (Figura 3). Isto se deve ao encruamento formado na camada superficial, quando se aplica cargas elevadas a pirâmide de diamante atinge o substrato que possui uma dureza menor ocorrendo então um decréscimo na dureza.

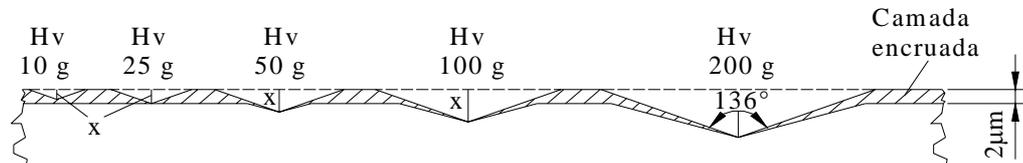


Figura 3. Desenho esquemático de testes de microdureza realizados em uma camada superficial encruada.

A camada superficial encruada pode ser medida por meio de uma amostra usinada, que posteriormente é polida em apenas uma parte até que se obtenha uma média de dureza nominal na parte polida igual aos valores obtidos das amostras polidas anteriormente (Figura 4 (a)). Após este processo torna-se possível medir a profundidade de encruamento com o auxílio de um rugosímetro (Figura 4 (b)) obtendo-se o valor de 2 μm para a liga Ti-6Al-4V usinada com $a_p = 20 \mu\text{m}$ e $f = 20 \mu\text{m/rev}$. Este valor corrobora com o que foi esquematicamente mostrado na Figura 3. De acordo com os trabalhos de Evans et al.⁽⁴⁾ e Horio et al.⁽⁵⁾, a profundidade da camada danificada para materiais não-ferrosos (AL, Cu, Ti, etc.) usinados com ferramentas afiadas de ponta única de diamante esta dentro de uma faixa de 1 a 17 μm .

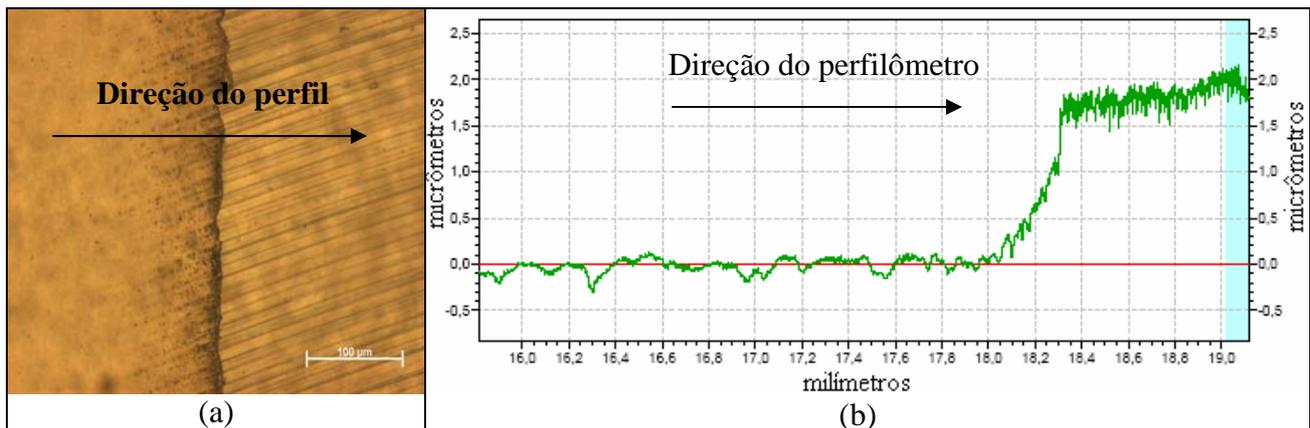


Figura 4. Determinação da profundidade de encruamento após a usinagem; a) imagem feita através de microscopia óptica mostrando a região do degrau obtido entre a região polida e usinada, ampliação de 200x; b) perfil traçado pelo Form Talysurf Intra[®].

O efeito do avanço no parâmetro da rugosidade de pico-a-vale (R_t) é mostrado na Figura 5 (a). O parâmetro R_t foi usado para poder observar diferenças entre as rugosidades uma vez que as propriedades mecânicas desses materiais são diferentes. A variação da rugosidade superficial aumentou em função do aumento do avanço como já era esperado. A diferença entre a rugosidade teórica e experimental pode ser atribuída diversos fatores tais como: propriedades mecânicas do material usinado, geometria da ferramenta, etc.. Por outro lado, não se observou diferença significativa na rugosidade superficial entre o Ti (CP) e a liga Ti-6Al-4V para faixa de avanço de 5-15 $\mu\text{m/rev}$. A maior diferença observada foi para avanço de 20 $\mu\text{m/rev}$, nesse caso a diferença entre os valores de R_t foi de 40% a mais para a liga Ti-6Al-4V. Esse é um valor que acreditamos ser inesperado, pois a liga de Ti deveria apresentar uma capacidade de encruamento menor que o Ti-CP. Em função disso, a rugosidade deveria ser menor para a liga, como já foi observado para o alumínio por Jasinevicius et al.⁽²⁾. O efeito da profundidade de corte no parâmetro de pico-a-vale (R_t) é mostrado na Figura 5 (b). Observa-se que a rugosidade variou com o aumento da

profundidade de corte. Entretanto, nenhuma relação sistemática foi encontrada entre a profundidade de corte e o valor de rugosidade. Além do mais, para pequenas profundidades de corte (5 μm), a liga Ti-6Al-4V obteve um valor de 60% maior de rugosidade em comparação com o titânio puro.

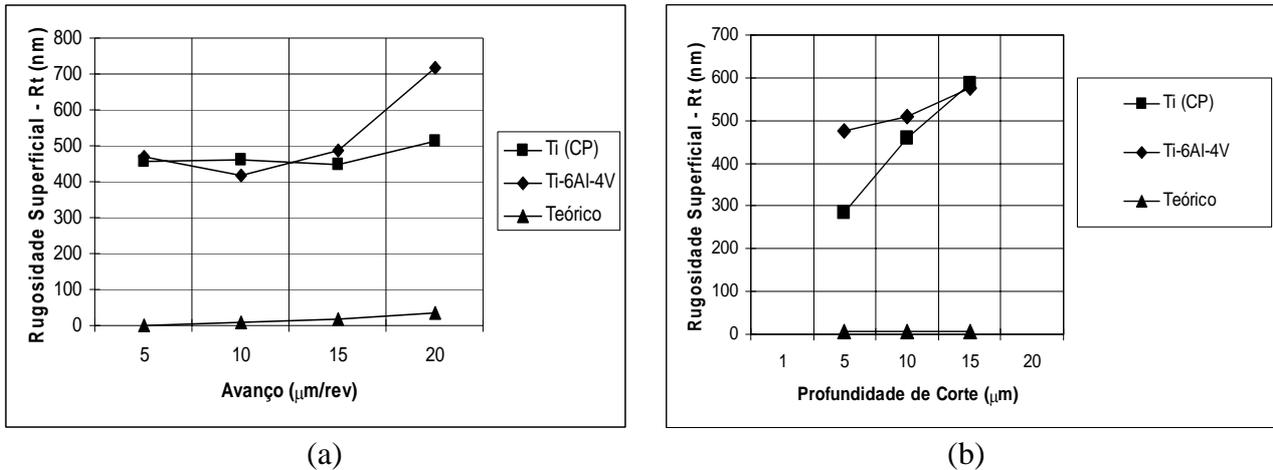


Figura 5. Gráficos de Rugosidade; (a) Comparação dos valores das rugosidades em função do avanço com $a_p = 10 \mu\text{m}$; (b) Comparação dos valores das rugosidades em função da profundidade de corte com $f = 10 \mu\text{m}/\text{rev}$.

A Figura 6 mostra um cavaco típico da liga Ti-6Al-4V usinado com $f = 10 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$ o qual apresenta estrutura lamelar. A vista lateral do cavaco mostra que mesmo sob condições muito finas, cavacos do tipo serrilhado foram removidos tanto no caso do Ti (CP) quanto na liga Ti-6Al-4V. Ao observar a Figura 6 (b) é possível observar lamelas justapostas com tamanhos equivalentes. Outro fato interessante é que a superfície livre do cavaco não apresenta variação na sua estrutura em função da mudança de grão (Figura 6 (c)), ou seja, não ocorreu formação de estrutura degrau.

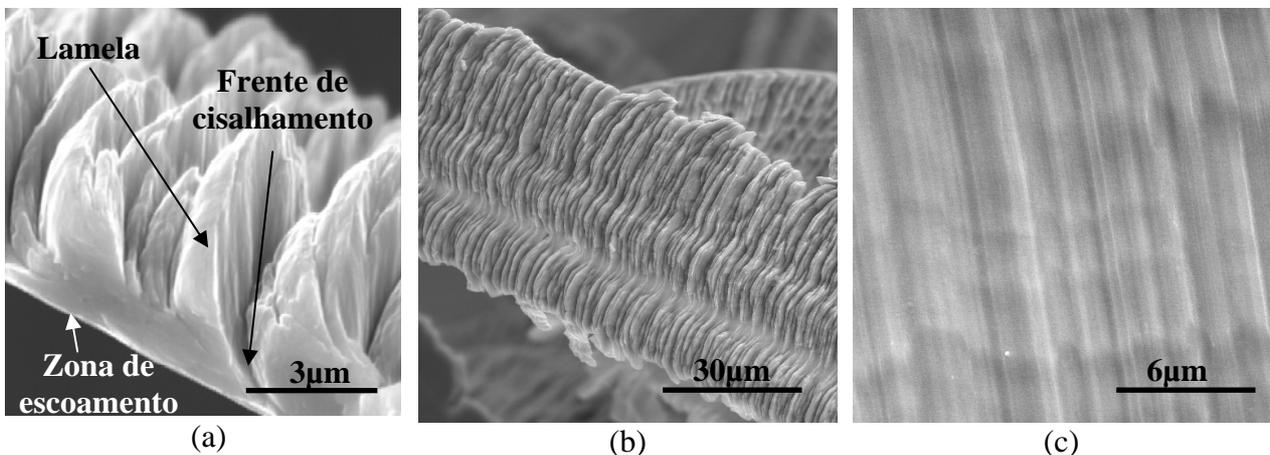


Figura 6. Análise do cavaco no M.E.V. da liga Ti-6Al-4V; (a) Lateral do cavaco ampliado 10000x; (b) Parte superior do cavaco, ampliação de 1000x (c) Parte inferior do cavaco, onde a superfície de saída da ferramenta faz contato com o cavaco, ampliação de 5000x.

4. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que o acabamento superficial a mínima rugosidade (R_t) foi de 283 nm para o Ti CP e 416 nm para Ti-6Al-4V. Este tipo de análise é fundamental, pois a rugosidade está intrinsecamente ligada à resistência à fadiga o que torna um fator determinante no dimensionamento de projetos. As amostras (Ti-(CP) e de Ti-6Al-4V) apresentaram aumento significativo da microdureza na superfície usinada demonstrando que houve deformação plástica severa e encruamento após a usinagem, os aumentos foram de 40% tanto para o Ti (CP) quanto para a liga Ti-6Al-4V, usinados em condições finas. Por fim, a microusinagem com ferramenta de diamante monocristalino pode ser considerada um processo alternativo em relação ao processo convencional,

para que se possa obter melhores acabamentos superficiais e menores níveis de encruamento da camada superficial usinada.

5. AGRADECIMENTOS

O aluno João P. Colafemina e Professor JG Duduch agradecem a CNPq e FAPESP pelo apoio financeiro e a *Taylor Hobson do Brasil*[®] pela valiosa atenção dada nos ensaios de rugosidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DONACHIE, M. J. **Titanium – A Technical Guide**, ASM International, 1988. 469 p.
2. JASINEVICIUS, R. G.; CAMPOS, G. P.; MONTANARI, L.; TSUKAMOTO, R.; GARCIA, J. P.; DUDUCH, J.G.; PORTO, A. J. V. Influence of Mechanical and Metallurgical State of An Al-Mg Alloy on the Surface Integrity in Ultraprecision Machining **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science** Vol.25 (3): 222-228, 2003.
3. EZUGWU, E. O.; BONNEY, J. & YAMANE, Y. An Overview of the Machinability of Aeroengine alloys, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 134, p. 233-253, março 2003.
4. EVANS, C.; POLVANI, R.; POSTEK, M., RHORER, R. Some observations on tool sharpness and subsurface damage in single point diamond turning. **SPIE – In Process Optical Metrology for Precision Machining**, v. 802, p. 52-66, 1987.
5. HORIO, K.; KASAI, T.; OGATA, Y.; KOBAYASHI, A. A study on damaged layer remaining in diamond mirror cut surface, **Annals of the CIRP**, v. 41, n. 1, p. 137-140, 1992.

INFLUENCE OF THE CONDITIONS OF MACHINING ON THE INTEGRITY SURFACE IN THE FACE TURNING WITH DIAMOND TOOLS IN THE MATERIALS: Ti (CP) AND ITS ALLOY Ti-6Al-4V

João Paulo Colafemina

Universidade de São Paulo – EESC – Av Trabalhador São Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos
cola@sc.usp.br

Renato Goulart Jasinevicius

Universidade de São Paulo – EESC – Av Trabalhador São Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos

Jaime Gilberto Duduch

Universidade de São Paulo – EESC – Av Trabalhador São Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos

Arthur José Vieira Porto

Universidade de São Paulo – EESC – Av Trabalhador São Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos

Abstract. *Form errors, surface waviness and roughness are directly affected by physical and mechanical properties of the material, state of sharpening and the geometry of the tool, machining conditions and aspects related to the dynamics of the machine-tools. The objective of this work is to investigate the effect of cutting conditions on the micromachining of commercially pure titanium (Ti-CP) and its alloy (Ti-6Al-4V). For this purpose, an ultraprecision lathe with high stiffness and precision of positioning was used for the cutting tests. Surface finishing and microhardness were analyzed. The results showed that the minimum roughness (R_t) is 283 nm for Ti (CP) and 416 nm for Ti-6Al-4V, under the same condition of machining. The samples (Ti-(CP) and Ti-6Al-4V) presented significant increase in microhardness of the machined surface, demonstrating that it suffered severe plastic deformation and strain hardening after the cutting process. The increase was of about 40% for Ti (CP) and 40% for alloy Ti-6Al-4V, machined with fine conditions. Optical microscopy was used to observe the qualitative aspects of machined and polished surfaces.*

Keywords: *Titanium, Titanium Alloys, Diamond tool, Surface Integrity, Ultraprecision Machining.*