UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA MICROUSINABILIDADE DO Ti (CP) E DA LIGA Ti-6Al-4V
NO TORNEAMENTO COM FERRAMENTA DE DIAMANTE

JOÃO PAULO COLAFEMINA

Engenheiro Mecânico

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: **Prof. Assoc. Renato Goulart Jasinevicius**

São Carlos

- 2005 -

*Nem tudo que se enfrenta pode ser modificado,
mas nada poder ser modificado até que seja enfrentado.*

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Assoc. Renato Goulart Jasinevicius pela orientação, amizade, confiança e oportunidade.

Ao Prof. Assoc. Jaime Gilberto Duduch pela colaboração, amizade, sugestões e discussões sobre o trabalho.

A Taylor Hobson do Brasil Ltda em especial ao funcionário Marcelo Bulhões Montagnani pelo auxílio nos ensaios de perfilometria mecânica e óptica.

Aos amigos do Grupo do Laboratório de Engenharia de Precisão que me acompanharam desde o início deste trabalho em 2003, Luciana, Helder, Carlos Burato, Alan, Lucas, Sherfis, Paulo e Fabiano pelas ajudas constantes e o ótimo ambiente de trabalho proporcionado.

A minha Mãe pela dedicação, força, carinho e amor que tem me dado.

Ao meu Pai e irmãos pelo incentivo e apoio necessário. Em especial meu pai pelo grande amparo e estímulo que tem me oferecido em prol aos meus estudos.

A minha namorada Flávia Cassarotti, pelo carinho, companheirismo e principalmente amor.

Aos grandes e velhos amigos do peito que sempre serão lembrados, Breno e André, pelas grandes risadas, discussões sobre a vida e apoio nos momentos mais difíceis.

A todos os grandes amigos que fiz em São Carlos, Geraldo, Kelen, Luciane, Alessandro Roger, Paulo Barbiere, Demian, André Mirandola, além de outros não citados, pelos ótimos momentos proporcionados e que estarão em minhas lembranças para o resto da minha vida.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC – USP.

Ao pessoal da pós-graduação, principalmente Beth e Ana Paula pela grande ajuda oferecida nesses anos.

A CNPq pelo apoio financeiro dado a este projeto.

Resumo

COLAFEMINA, J. P. (2005) *Estudo da Microusinabilidade do Ti (CP) e da Liga Ti-6Al-4V no Torneamento com Ferramenta de Diamante*. 132p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

Dentre as diversas aplicações onde o titânio e suas ligas são empregados destaca-se a indústria aeroespacial, pois suas excelentes propriedades de resistência à fratura, resistência à corrosão e razão resistência/peso, a qual se mantém a elevadas temperaturas, torna imprescindível o seu uso. Por outro lado, a usinabilidade de titânio e suas ligas é geralmente considerada como sendo ruim devido a algumas características, como por exemplo, baixa condutividade térmica, reatividade química com a maioria dos materiais ferramenta, alta resistência em altas temperaturas e baixo módulo de elasticidade, entre outras. Por esses motivos, foram realizadas operações de torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante, a fim de determinar o comportamento do Ti comercialmente puro (CP) e sua liga mais comercialmente usada (Ti-6Al-4V). 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 (resolução 10 nanômetros). As técnicas de caracterização de superfície usadas foram: microscopia eletrônica de varredura, óptica e de força atômica, microdureza Vickers, perfilometria mecânica e óptica. Os danos superficiais observados devido à interação ferramenta/material foram associados ao fenômeno conhecido como “*delaminação*”. Os resultados obtidos de microdureza superficial mostraram aumentos que chegaram à ordem de 85% para o Ti (CP) e de 77% para o Ti-6Al-4V. Os menores valores encontrados para Ra ficaram em torno de 30 nm para o Ti (CP) e de 46 nm para o Ti-6Al-4V enquanto os menores valores encontrados de Rt para o Ti(CP) foi de 590 nm e para o Ti-6Al-4V foi de 416 nm sob as mesmas condições de usinagem. Portanto, a usinagem de ultraprecisão se torna uma alternativa eficiente no uso de operações de acabamento melhorando a integridade superficial do Ti (CP) e suas ligas.

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

Abstract

COLAFEMINA, J. P. (2005) 135p. *Micromachinability Study of Ti (CP) and Ti-6Al-4V Alloy by means of Single Point Diamond Turning*. 132p. Dissertation (M.Sc.) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

Among the various applications where titanium and its alloys are employed, the aeronautic industry is one of the most important, because of their excellent properties such as fracture strength, corrosion resistance and high strength to weight ratio, which is maintained at high temperatures. However, the machinability of titanium and its alloys is generally considered poor due to some of their characteristics as low thermal conductivity, chemical reactivity with most tool materials, high resistance to mechanical work at high temperature and low Young's modulus, etc. Ultraprecision Diamond turning has been carried out in order to determine the behaviour of commercially pure Ti and the most used alloy ((Ti-6Al-4V). Cutting fluid has been applied in the form of mist (~100 ml/hora) during the experiments. A high stiffness and high precision machine tool has been used (positioning precision of 10 nm). Scanning Electron Microscopy, Optical Microscopy, Atomic Force Microscopy, Vickers Microhardness test and contact and optical profilometry have been used to characterize the machined surfaces. The surface damage observed due to the interaction tool-workpiece have been associated with the known phenomenon of “*delamination*”. The microhardness results presented an increase of the order of 85% for Ti (CP) and of 77% for the Ti-6Al-4V alloy after machining. The lowest values for Ra are around 30 nm for Ti (CP) and 46 nm for Ti-6Al-4V and the lowest values of Rt for Ti (CP) are about 590 nm and 416 nm for the Ti-6Al-4V, for the same conditions. The ultraprecision machining of titanium and its alloys may be an efficient alternative for finish operations resulting in better surface integrity.

Keywords: Titanium, Titanium Alloys, Diamond Tools, Surface Integrity, Ultraprecision Diamond Turning.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Alotropia da estrutura cristalina do titânio comercialmente puro (CP) (SMITH, 1981).....	8
FIGURA 2.2 - Estrutura do Ti não ligado. Grãos recristalizados de alfa primário, e beta transformado contendo alfa acicular. Microscopia óptica 500x.	9
FIGURA 2.3 – Liga Ti-6Al-4V a estrutura consiste numa matriz com grãos equiaxiais alfa (cor azul) e beta intergranular (cor preta) em uma matriz alfa. Microscopia óptica 500x.....	11
FIGURA 2.4 - Imagem da superfície de uma liga Al-Mg, onde é possível observar a transferência do perfil da ferramenta sobre a peça (JASINEVICIUS, 2005).	16
FIGURA 2.5 - Fotomicrografia da superfície usinada da liga Al 7075, aumento de 100x (JASINEVICIUS, 2005).	17
FIGURA 2.6 – Imagem da parte inferior dos cavacos da liga Al 7075 analisados no MEV, imagem com aumento de 400 x (JASINEVICIUS, 2005).	17
FIGURA 2.7 - Modelo ortogonal de corte (BLACK, 1979).....	19
FIGURA 2.8 - Modelo de velocidade (BLACK, 1979).....	19
FIGURA 2.9 - Modelo esquemático para tensão de escoamento no corte de metais (BLACK, 1979).	22
FIGURA 2.10 – Fotomicrografia de uma secção transversal de um típico cavaco de cisalhamento catastrófico do Ti-6Al-4V (KOMANDURI & BROWN, 1981).	29
FIGURA 2.11 - Fotomicrografia de uma secção transversal de um típico cavaco serrilhado de aço de baixo carbono (AISI 1015) com periódica variação na espessura e deformação homogenia na zona primária de cisalhamento (KOMANDURI & BROWN, 1981).	29
FIGURA 2.12 – Micrografia das bandas de cisalhamento localizadas (ou bandas de cisalhamento adiabáticas) formadas no corte ortogonal do Ti-6Al-4V a uma velocidade de $V_c=1,2\text{m/s}$ (MOLINARI, MUSQUAR & SUTTER, 2002).	31

FIGURA 2.13 – Banda de cisalhamento localizadas ou adiabáticas demonstradas pelas setas em um cavaco de Ti-6Al-4V obtida pelo corte ortogonal a uma velocidade de $V_c=13\text{m/s}$ (MOLINARI, MUSQUAR & SUTTER, 2002).	32
FIGURA 2.14 – Cavaco contínuo obtido de um aço (KOMANDURI & TURKOVICH, 1981).	32
FIGURA 2.15 – Diagrama esquemático de uma sequência de eventos mostrando os vários estágios envolvidos na formação do cavaco quando se usina ligas de titânio (KOMANDURI & TURKOVICH, 1981).	34
FIGURA 2.16 – Diagrama esquemático mostrando os modos de deformação alternativo na usinagem (KOMANDURI & TURKOVICH, 1981).	36
FIGURA 2.17 – Modelo da formação do cavaco (a) aço (b) titânio (BOSTON et al. apud KOMANDURI, 1982).	38
FIGURA 2.18 - Esquema demonstrativo das várias etapas do cisalhamento localizado na usinagem do titânio e suas ligas (HOU & KOMANDURI, 1995).	43
FIGURA 2.19 – Energia distribuída (calor gerado e calor dissipado) na usinagem do aço (KOMANDURI, 1982).	44
FIGURA 2.20 – Cavaco com deformação contínua do Ti-6Al-4V (XIE, BAYOUMI & ZBIB, 1995).	47
FIGURA 2.21 - Morfologia do cavaco (a) resultados experimentais (b) resultados simulados (HUA & SHIVPURI, 2004).	49
FIGURA 2.22 – Predição realizado por métodos de elementos finitos da (a)morfologia do cavaco (b) deformação, e (c) distribuição da temperatura, na usinagem do Ti-6Al-4V a uma velocidade de corte de $1,2\text{m/min}$ e avanço de $0,127\text{ mm/rev}$ (SHIVPURI et al., 2002).	50
FIGURA 2.23 – Elementos finitos da (a)morfologia do cavaco (b) deformação, e (c) distribuição da temperatura, na usinagem do Ti-6Al-4V a uma velocidade de corte de 600m/min e avanço de $0,127\text{ mm/rev}$ (SHIVPURI et al., 2002).	50
FIGURA 2.24 – Efeito das condições de corte na distância entre as bandas de cisalhamento do Ti-6Al-4V (BAYOUMI & XIE, 1995).	52

FIGURA 2.25 - Frequência de segmentação f em função da velocidade de corte com $\alpha = 0$ do Ti-6Al-4V (MOLINARI, MUSQUAR & SUTTER, 2002).	52
FIGURA 2.26 – Esquema do corte ortogonal nos metais mostrando que a deformação de compressão precede o processo de cisalhamento (BLACK, 1979).....	58
FIGURA 2.27 - Resultados de microdureza mostrando os danos causados pelo encruamento durante a formação do cavaco. Usinagem de aço inoxidável austenítico ($V_c = 100$ m/min) (TRENT & WRIGHT, 2000).	59
FIGURA 2.28 - Espectro de difração de raio x do Ti-6Al-4V no cavaco e no material não cortado (BAYOUMI & XIE, 1995).	60
FIGURA 2.29 - Ti-6Al-4V (a) Fase primária alfa com uma banda de cisalhamento (b) escoamento e separação do material ao longo da banda de cisalhamento (BAYOUMI & XIE 1995).	61
FIGURA 3.1 - Torno de ultraprecisão gerador de superfícies anesféricas ASG-2500, da RANK PNEUMO® (atualmente Precitek Components®).	69
FIGURA 3.2 - Suporte de alumínio para auxiliar a fixação da amostra na placa de vácuo.	71
FIGURA 3.3 - Micro endentador Vickers de diamante usado neste trabalho, onde a é o raio de contato do endentador, d é a diagonal da medida completa da amostra e p é a profundidade da endentação.	75
FIGURA 3.4 - Talysurf CCI 3000 da TAYLOR HOBSON PRECISION®.	78
FIGURA 3.5 - Talysurf Intra da TAYLOR HOBSON PRECISION®.	80
FIGURA 4.1 - Peças usinadas no torno ASG 2500. Liga de titânio Ti-6Al-4V (esquerda) e Ti (CP) (direita).	81
FIGURA 4.2 – Perfil obtido no Talysurf Intra da face de uma amostra de Ti (CP) usinada com várias condições de corte com a_p (do centro para o exterior da peça) $a_p = 10$ μm e $f = 5, 10, 15$ e 20 $\mu\text{m/rev}$	82
FIGURA 4.3 - Influência do avanço no acabamento superficial (R_a) medidos no Talysurf Intra. Rotação 1000 rpm, $a_p = 10$ μm , ferramenta Contour®.	83
FIGURA 4.4 - Influência do avanço no acabamento superficial (R_t) medidos no Talysurf Intra. Rotação 1000 rpm, $a_p = 10$ μm , ferramenta Contour®.	84

FIGURA 4.5 - Gráfico mostrando o perfil usinado medido nas amostras com condições de corte de $a_p = 10 \mu\text{m}$ e $f = 20 \mu\text{m/rev}$ do (a) Amostra de Ti (CP) mostrando alguns picos e fissuras e (b) Amostra de Ti-6Al-4V no qual é possível ver de forma clara o perfil traçado pela ferramenta.	86
FIGURA 4.6 - Análise dos parâmetros S_a e S_t do Ti (CP) usinado com a ferramenta CONTOUR®.	87
FIGURA 4.7 - Análise dos parâmetros S_a e S_t do Ti -6Al-4V usinado com a ferramenta CONTOUR®.	89
FIGURA 4.8 - Espectro de frequência de amostras usinadas com $f = 20 \mu\text{m/rev}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$ (a) Ti(CP) onde mostra que o comprimento de onda de $20 \mu\text{m/rev}$ apareceu com menor intensidade em relação aos outros comprimentos de onda (b) Ti-6Al-4V onde mostra que o comprimento de onda de $20 \mu\text{m/rev}$ apareceu de forma proeminente em relação aos outros comprimentos de onda.	90
FIGURA 4.9 - Influência da profundidade de usinagem no acabamento superficial (R_a) medidos no Talysurf Intra. Rotação 1000 rpm, $f = 10 \mu\text{m/rev}$, ferramenta Contour®.	91
FIGURA 4.10 - Influência da profundidade de usinagem no acabamento superficial (R_t) medidos no Talysurf Intra. Rotação 1000 rpm, $f = 10 \mu\text{m/rev}$, ferramenta Contour®.	92
FIGURA 4.11 - Influência do avanço no acabamento superficial (R_t) medidos no Talysurf Intra. Rotação 1000 rpm, $a_p = 5 \mu\text{m}$, ferramenta DIAMANGEOR® com ângulo de folga de 5° e ferramenta CONTOUR® com ângulo de folga de 12°	93
FIGURA 4.12 - a) Desenho esquemático do perfil da rugosidade gerado na usinagem realizada com ferramenta de ponta arredondada; b) Fotomicrografias feitas através de microscopia óptica das superfícies geradas com ferramenta com ponta circular e ; c) Desenho esquemático do perfil da rugosidade gerado na usinagem realizada com ponta seca; d) imagem da superfície (magnificação 500 x).	94
FIGURA 4.13 – Microdureza do Ti (CP) e do Ti-6Al-4V no estado polido.	95
FIGURA 4.14 – Microdureza Vickers em função da carga aplicada do Ti (CP) e da liga Ti-6Al-4V, usinado com a ferramenta Contour®.	97
FIGURA 4.15 – (a) Fotografia óptica do Ti (CP) mostrando as diagonais das endentações. Superfície usinada com $a_p = 5 \mu\text{m}$ e $f = 10 \mu\text{m/rev}$, ampliado 500x. (b)	

Fotografia óptica da liga Ti-6Al-4V mostrando as diagonais das endentações. Superfície usinada com $a_p = 5 \mu\text{m}$ e $f = 10 \mu\text{m/rev}$, ampliado 500x.....	97
FIGURA 4.16 - Microdureza Vickers do Ti (CP) e da liga Ti-6Al-4V para diferentes condições de usinagem realizadas com a ferramenta Contour®.	98
FIGURA 4.17 - Microdureza Vickers em função da carga aplicada do Ti (CP), usinado com a ferramenta com ângulos de folga diferentes.....	99
FIGURA 4.18 - Microdureza Vickers em função da carga aplicada da liga Ti-6Al-4V, usinado com a ferramenta com ângulos de folga diferentes.	100
FIGURA 4.19 - Microdureza Vickers em função da carga aplicada do Ti (CP) e da liga Ti-6Al-4V, usinado com a ferramenta com ângulo de folga de 5° com ponta arredondada.....	101
FIGURA 4.20 - Desenho esquemático mostrando a usinagem com (a) Ferramenta CONTOUR® (b) Ferramenta DIFER® (<i>burnishing</i>).....	102
FIGURA 4.21 - Desenho esquemático de testes de microdureza realizados em uma camada superficial encruada.	104
FIGURA 4.22 – Visualização 2D do Ti (CP) obtida por meio do microscópio de força atômica no qual é possível observar uma endentação com carga aplicada de 25 g com condições de usinagem de $f=5 \mu\text{m/rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$. $R_{\text{max}} = 1,853 \mu\text{m}$	105
FIGURA 4.23 - Determinação da profundidade de encruamento após a usinagem, a) imagem feita da amostra usinada e polida mostrando o degrau obtido após o polimento; b) perfil traçado pelo Form Talysurf Intra® em uma peça de Ti (CP) usinada com $a_p = 20 \mu\text{m}$ e $f = 20 \mu\text{m/ver}$; a) fotomicrografia da região polida e; b) perfil da superfície medida no perfilômetro mecânico.....	106
FIGURA 4.24 – a)Imagem adquirida por meio de um microscópio óptico mostrando a região do degrau obtido entre a região polida e usinada, Ti-6Al-4V com $a_p = 20 \mu\text{m}$ e $f = 20 \mu\text{m/rev}$, ampliação de 200x; b) determinação da profundidade de encruamento após a usinagem, perfil traçado pelo Form Talysurf Intra® em uma peça de Ti-6Al-4V usinada com $a_p = 20 \mu\text{m}$ e $f = 20 \mu\text{m/rev}$	107
FIGURA 4.25 - (a) Fotografia da superfície usinada obtida por meio de um microscópio óptico, no qual Ti (CP) foi usinado com $f= 10\mu\text{m/rev}$ e $a_p = 10\mu\text{m}$ ampliado 200x. (b)	

Imagem obtida no MEV do Ti (CP) mostrando a ampliação de uma partícula circulada na figura (a) com uma ampliação de 5000x.	108
FIGURA 4.26 - Desenho esquemático do processo de delaminação.....	109
FIGURA 4.27 - Ti (CP) usinado com $f=5\mu\text{m/rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$. (a) Espectro das superfícies usinadas obtidas por meio do <i>Talysurf CCI 3000</i> . O traço preto representa o perfilômetro passando pela superfície. (b) Perfil obtido no <i>Talysurf CCI 3000</i> de uma amostra de Ti (CP) que esta de acordo com esta figura (a) mostrando uma fissura na superfície e logo após uma elevação delaminada.	110
FIGURA 4.28 - (a) imagem tridimensional da superfícies usinadas do Ti (CP) usinado com $f=15\mu\text{m/rev}$ $a_p=10\mu\text{m}$ obtidas por meio do <i>Talysurf CCI 3000</i> , no qual é possível observar pequenos picos; (b) Micrografia das superfícies usinadas obtidas por meio do MEV, ampliado 1000x. (c) Perfil obtido no <i>Talysurf CCI 3000</i> de uma amostra de Ti (CP) que esta de acordo com esta figura (a) mostrando alguns picos e fissuras que foram causados pelo processo de delaminação.	111
FIGURA 4.29 – Ti-6Al-4V usinado com $f=10\mu\text{m/rev}$ $a_p=10\mu\text{m}$ ampliado (a) Fotografia das superfícies usinadas obtidas por meio de um microscópio óptico ampliação de 200x. (b) Micrografia da superfície usinada do Ti-6Al-4V obtida por meio do MEV, ampliado 1000x.....	112
FIGURA 4.30 - Ti-6Al-4V usinada com $f=15\mu\text{m/rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$. (a) Espectro das superfícies usinadas obtidas por meio do <i>Talysurf CCI 3000</i> do Ti-6Al-4V usinado com $f=15\mu\text{m/rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$. (b) Perfil obtido no <i>Talysurf CCI 3000</i> de uma peça de Ti-6Al-4V que está de acordo com esta figura (a) mostrando o grau de repetibilidade e precisão da usinagem com ferramenta de ponta única de diamante.	113
FIGURA 4.31 - (a) Espectro das superfícies usinadas obtidas por meio do <i>Talysurf CCI 3000</i> do Ti-6Al-4V usinado com $f=20\mu\text{m/rev}$ $a_p=10\mu\text{m}$ (b) Micrografia das superfícies usinadas do Ti-6Al-4V com $f=15\mu\text{m/rev}$ $a_p=10\mu\text{m}$ obtidas por meio do MEV mostrando algumas partículas delaminadas com uma ampliação de 1000x. (c) Perfil obtido no <i>Talysurf CCI 3000</i> de uma amostra de Ti-6Al-4V que esta de acordo com esta figura (a) mostrando também que na liga também ocorreu alguns picos e fissuras que foram causados pelo processo de delaminação.	114
FIGURA 4.32 - Análise do cavaco no M.E.V. do Ti (CP) usinado com a ferramenta CONTOUR® com $f=10\mu\text{m/rev}$ e $a_p=15\mu\text{m}$; (a) Lateral do cavaco ampliado 5000x;	

(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 3000x (d) Cavaco com forma de fita, ampliação de 50x. 116

FIGURA 4.33 - Análise do cavaco no M.E.V. da liga Ti-6Al-4V usinado a ferramenta CONTOUR® com $f = 10 \mu\text{m/rev}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$; (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 (d) Cavaco com forma de fita, ampliação de 50x. 118

FIGURA 4.34 - Desenho esquemático da usinagem realizada com a ferramenta de ponta arredondada. 119

FIGURA 4.35 - Análise do cavaco no M.E.V. da liga Ti-6Al-4V usinado com $f = 10 \mu\text{m/rev}$ e $a_p = 5 \mu\text{m}$; (a) Lateral do cavaco ampliado 2000x; (b) Visão geral do cavaco com formato helicoidal, ampliação de 200x (c) Parte inferior do cavaco, onde a superfície de saída da ferramenta faz contato com o cavaco, ampliação de 3000x. 120

FIGURA 4.36 - Desenho esquemático da usinagem realizada com a ferramenta de ponta seca. 121

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Propriedades do Ti (CP) e da liga Ti-6Al-4V comparadas com as de um aço de médio carbono (MACHADO & WALLBANK, 1990; DONACHIE, 1998).	7
TABELA 2.2- Tolerâncias de componentes para diversos produtos fabricados utilizando processos de usinagem (McKEOWN, 1987).	14
TABELA 2.3 - Materiais usados na usinagem de ultraprecisão (SILVA, 1999).....	15
TABELA 2.4 - Condições críticas de corte para formar cavaco de cisalhamento localizado (BAYOUMI & XIE, 1995).....	48
TABELA 2.5 - Alterações Superficiais e subsuperficiais que definem a integridade superficial (ANSI, 1978).....	55
TABELA 2.6 - Formas de energia aplicadas no processo de manufatura e possíveis resultados que podem alterar a superfície e a subsuperfície (GROOVER, 2001).	56
TABELA 2.7 - Efeito dos métodos de usinagem relacionados com a resistência à fadiga (FIELD & KAHLES, 1971).....	62
TABELA 2.8 - Rugosidade da superfície e Integridade superficial produzida por vários processos de manufatura (GROOVER, 2001).	63
TABELA 2.9 - Efeitos específicos do material de superfícies em usinagem de ultraprecisão (KÖNIG et al., 1991).....	66
TABELA 3.1 - Análise química da liga Ti-6Al-4V (Ti Brasil Ltda [®]).	67
TABELA 3.2 - Características mecânicas da liga Ti-6Al-4V (Ti Brasil).....	68
TABELA 3.3 - Características geométricas das ferramentas de diamante monocristalino empregadas.....	70
TABELA 3.4 - Parâmetros de corte usados nos ensaios de torneamento de face.	72
TABELA 3.5 - Especificações técnicas do Talysurf CCI 3000.....	79
TABELA 4.1 - Profundidade das endentações calculadas teoricamente para as superfícies usinadas. Os parâmetros de corte adotados foram de $f=10\mu\text{m/rev}$ e $a_p=5\mu\text{m}$	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ccc	–	Estrutura cúbica de corpo centrado.
hc	–	Estrutura hexagonal compacta.
CNC	–	Computer Numerical Control.
(CP)	–	Comercialmente puro.
n	–	Velocidade do eixo árvore (rpm).
PCD	–	Diamante policristalino.
μm	–	Micrometro (10^{-6} m).
nm	–	Nanômetro (10^{-9} m).
mm	–	Milímetro (10^{-3} m).
V_c	–	Velocidade de corte
V_p	–	Velocidade da peça
V_{ca}	–	Velocidade do cavaco
V_{cm}	–	Velocidade do cisalhamento
f	–	Avanço ($\mu\text{m}/\text{revolução}$).
a_p	–	Profundidade de usinagem (μm).
R_p	–	Raio de ponta da ferramenta (mm).
b	–	Largura da aresta cortante.
α_1	–	Ângulo de folga primário.
α_2	–	Ângulo de folga secundário.
γ	–	Ângulo de saída.
ϕ	–	Ângulo de cisalhamento.
U_{ca}	–	Energia do cavaco
U_f	–	Energia da ferramenta
U_p	–	Energia da peça
Ti (CP)	–	Titânio comercialmente puro.
Ti-6Al-4V	–	Liga a base de titânio com 6% de alumínio e 4% de vanádio em massa.
HV	–	Dureza Vickers.
Ra	–	Rugosidade Média (Rugosidade da média aritmética das alturas do perfil)
Rt	–	Rugosidade de Pico a vale do perfil

Sa	–	Rugosidade superficial média
St	–	Rugosidade superficial de Pico a vale
MEV	–	Microscopia eletrônica de varredura
MFA	–	Microscopia de força atômica

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Titânio e Suas Ligas.....	2
1.2 Objetivos e Estrutura da Dissertação	5
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.....	6
2.1 Titânio e Suas Ligas.....	6
2.1.1 Aplicações.....	6
2.1.2 Metalurgia do Titânio e suas ligas	7
2.2 Usinagem de Ultraprecisão	12
2.2.1 Geração de superfícies no torneamento de ultraprecisão.....	15
2.3 Modelo Ortogonal de Corte	18
2.4 Bandas de Cisalhamento Adiabáticas	20
2.5 Usinagem do Titânio (CP) e Suas Ligas	23
2.6 Cavacos Serrilhados.....	27
2.7 Formação dos Cavacos no Titânio e Suas Ligas.....	30
2.7.1 Zona primária de corte do Titânio e suas Ligas	38
2.7.2 Zona secundária de corte do Titânio e suas Ligas	39
2.7.3 “Espessura do cavaco do titânio” X “Ângulo de cisalhamento”	40
2.7.4 Prováveis razões para a elevação de temperatura quando se usina ligas de titânio.....	43
2.7.5 A natureza dúctil dos cavacos de titânio	46
2.8 Influência das Condições de Corte no Cavaco do Titânio	48
2.9 Integridade Superficial.....	53
2.9.1 Possíveis alterações ou danos causados por energia mecânica – Alteração da dureza superficial e deformações plásticas.....	57

2.9.2 Possíveis alterações ou danos causados por energia térmica – Mudanças metalúrgicas.....	59
2.9.3 Possíveis alterações ou danos causados por energia mecânica – Alteração devido ao processo de manufatura.	61
2.9.4 Possíveis alterações ou danos causados por energia química - Absorção de certos elementos tais como o H e o Cl na superfície do material	63
2.9.5 Influência do material no processo de usinagem de ultraprecisão.....	64
Capítulo 3 – Materiais e Metodologia	67
3.1 Materiais e Equipamentos Usados	67
3.1.1 Titânio (CP) e Ti-6Al-4V	67
3.1.2 Máquina-ferramenta usada nos ensaios de faceamento	68
3.1.3 Ferramentas usadas nos ensaios de faceamento.....	69
3.2 Procedimento Experimental	70
3.2.1 Preparação das Amostras	71
3.2.2 Torneamento com ferramenta de ponta única de diamante	72
3.2.3 Técnicas para as análises da integridade superficial	73
3.2.3.1 Microscopia de força Atômica	73
3.2.3.2 Microscopia Óptica	74
3.2.3.3 Ensaio de Microdureza	74
3.2.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.).....	76
3.2.3.5 Rugosidade Superficial	77
Capítulo 4 - Resultados e Discussão.....	81
4.1 Considerações gerais.....	81
4.1.1 Amostras usinadas.....	81
4.2 Integridade Superficial.....	82
4.2.1 Acabamento Superficial (Ra, Rt, Sa e St).....	82

4.2.1.1 Influência do avanço da ferramenta (f) no acabamento superficial	83
4.2.1.2 Influência da profundidade de usinagem (ap) no acabamento superficial.....	90
4.2.1.3 Influência da geometria da ferramenta (Rp e ângulo de folga) no acabamento superficial.....	92
4.2.2 Microdureza obtida no estado polido.....	94
4.2.3 Influência das condições de usinagem e da geometria da ferramenta sobre o encruamento da amostra após a usinagem	96
4.2.3.1 Influência do avanço e da profundidade de usinagem quando se usa a ferramenta com ângulo de folga de 12°	96
4.2.3.2 Encruamento em função da geometria da ferramenta.....	98
4.2.3.3 Influência do avanço e da profundidade de usinagem quando se usa a ferramenta com ângulo de folga de 5°	101
4.2.3.4 Profundidade de encruamento no Ti (CP) e na liga Ti-6Al-4V	103
4.2.4 Danos causados nas superfícies dos materiais	108
4.2.4.1 Superfície do Ti (CP)	108
4.2.4.2 Superfície do Ti-6Al-4V	112
4.3 Análise do Cavaco	115
Capítulo 5 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	122
5.1 Conclusões	122
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	125
Bibliografia.....	126

Capítulo 1 - Introdução

A usinagem de ultraprecisão se preocupa com a produção de componentes com alta exatidão e qualidade superficial. A precisão requerida está na ordem de nanômetros, conseqüentemente o projeto da máquina ferramenta e o comportamento do processo devem ser bem entendidos, juntamente com a interação entre o processo e a máquina, isto é, a interação entre a ferramenta e a peça.

Nos últimos anos, a usinagem e metrologia de ultraprecisão têm ocupado significativo espaço na indústria e entidades de pesquisa, refletindo-se nos números de trabalhos publicados e no nível de investimento em atividades de pesquisa no assunto. A principal razão para este crescente desenvolvimento pode ser atribuída à necessidade de se produzir produtos de alta qualidade de forma econômica, aliando ao uso de novos materiais tecnológicos os quais, normalmente oferecem maior dificuldade de serem usinados que os materiais convencionais.

Embora os termos “precisão” e “ultraprecisão” não sejam definições fixas, isto é, mudam com o progresso e tempo, pode-se definir “ultraprecisão” como a maior exatidão atingida, economicamente, em um determinado instante com os equipamentos disponíveis. Atualmente, ultraprecisão inclui dimensões de componentes da ordem de 1nm e medidas de resoluções na ordem de 1 angstrom, daí o termo “Nanotecnologia” (DUDUCH, 1993). Tais ordens de grandeza não são alcançadas por meio de adaptações ou modificações de processos convencionais, mas unicamente pelo desenvolvimento de novas técnicas de usinagem e medição, envolvendo: posicionadores de ultraprecisão, metrologia e controle, usinabilidade de ultraprecisão de materiais disponíveis, materiais ferramenta (exemplo: diamante) e a interação entre ferramenta de corte e peça de trabalho durante a usinagem (JASINEVICIUS, 1994).

Processos convencionais (não determinísticos) tais como polimento, lapidação e “etching” (usinagem química) comumente usados para o acabamento superficial desses componentes, são considerados ineficientes com baixa taxa de remoção requerendo longo tempo, portanto, caros, tornando-se um obstáculo à fabricação em série (JASINEVICIUS, 1994).

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

As ferramentas de diamante monocristalino são insuperáveis em termos de acabamento e integridade superficial e vida útil, portanto, são consideradas únicas em termos de aplicação para o torneamento de peças que requerem superfícies com baixos danos.

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, pelas condições de usinagem e por aspectos relacionados à dinâmica das máquinas ferramentas.

Para garantir uma integridade superficial “ótima” foi usado para aferir os resultados um torno ASG 2500 de ultraprecisão, pois este equipamento possui alta rigidez além de não permitir que vibrações e trepidações interfiram nos resultados, a sala onde se este se encontra possui temperatura e umidade controlada.

1.1 Titânio e Suas Ligas

O titânio foi descoberto em 1791 por William Gregor (Inglaterra) quando investigava a areia magnética (menachanite) existente em Menachan na Cornualha. Denominou-o “menachin”. Três anos mais tarde, M. H. Klaproth descobriu o que supunha ser uma terra nova no rutilo. Chamou-lhe “titânio” (titânio, é derivado do grego (latim) Titán, da mitologia grega, filhos mitológicos do Céu (Uranus) e da Terra (Gaia). Eram gigantes e considerados personificações das forças da natureza. Eram em número de doze) e mostrou que era idêntico ao “menachin” de Gregor. O metal foi pela primeira

vez isolado numa forma impura por J. J. Berzelius em 1825. Hunter preparou titânio puro em 1910 aquecendo tetracloreto de titânio e sódio numa bomba de aço.

Desde então, nos últimos anos o desenvolvimento das ligas de titânio tem sido conduzido principalmente pelas indústrias aeroespaciais e militares, no qual a relação resistência/peso é muito atrativa e fundamental. Ligas de titânio são consideradas mais resistentes do que ligas de alumínio, possuindo resistência comparável com ligas de aço, e possuem apenas 60% do valor da densidade do aço inoxidável. Sua relação resistência/peso, resistência à corrosão e fadiga e a preservação das propriedades mecânicas em elevadas temperaturas torna este material apropriado no uso de turbinas compressoras, motores de turbinas a gás e estruturas quentes de aviões. Além das indústrias aeronáuticas, as ligas de titânio estão sendo aplicadas também no ramo automotivo, engenharia biomédica, indústria naval e química, no qual resistência à fadiga e corrosão é extremamente importante (WANG, 2000).

Materiais aeroespaciais tais como ligas a base de níquel e ligas de titânio são usadas em aplicações aeronáuticas devido ao desempenho alcançado nos projetos e serviços requeridos. No entanto, o sucesso do uso das ligas de titânio, se deve ao conhecimento de sua usinagem (WANG, 2000). Estes materiais possuem baixa usinabilidade, que tem como consequência o desgaste excessivo no uso de ferramentas convencionais, o que prejudica muito a sua integridade superficial.

A maioria das ligas de titânio é usada em componentes manufaturados que requerem grande confiabilidade e por esta razão o acabamento superficial usado no processo de corte convencional e danos sub-superficiais devem ser controlados (MACHADO & WALLBANK, 1990).

Infelizmente, a dificuldade de usinar titânio se deve à sua baixa condutividade térmica (um sexto do valor dos aços) e sua alta reatividade química, torna o corte deste material impreciso e ineficiente, causando alta tensão residual na superfície usinada (WANG, 2000).

O uso de ferramentas de corte de metal duro à base de carbeto, mostrou resultados catastróficos, devido o titânio ser um péssimo condutor de calor, altas temperaturas se concentravam muito próximas à aresta de corte ocorrendo altas deformações plásticas levando a fratura prematura das ferramentas de corte (NABHANI, 2001).

Ferramentas de cerâmica não são comumente usadas, pois na usinagem das ligas de titânio, este material apresenta baixa performance devido a altas taxas de desgaste por causa de sua alta reatividade química com este tipo de liga (EZUGWU et al., 2003).

Por estas razões, a usinagem de titânio requer ferramentas com características de alta dureza, resistência ao desgaste, dureza e resistência a quente, e alto coeficiente de condutividade térmica (RAHMAN, WONG & ZAREENA, 2003; NARUTAKI & MURAKOSHI, 1983). Estas características são intrinsecamente encontradas nas ferramentas de diamante monocristalino, o que tornou este material atraente e justificável no uso desta pesquisa (NABHANI, 2001).

Além disso, a natureza do processo de formação cíclica dos cavacos induz às forças de corte cíclicas e indesejáveis vibrações na ferramenta, podendo prejudicar o acabamento superficial. Portanto, o estudo dos mecanismos de formação do cavaco segmentado no titânio e suas ligas são de extrema importância na indústria, pois é possível observar como ele é influenciado pelas mudanças nas condições de corte. Por exemplo, o entendimento do processo pode melhorar a vida da ferramenta, acabamento superficial e controle dimensional, que no torneamento tem-se como consequência o aumento da produtividade (SHEIKH-AHMAD & BAILEY, 1997). Por este motivo os cavacos são estudados neste trabalho.

1.2 Objetivos e Estrutura da Dissertação

O objetivo deste trabalho é investigar o efeito da microusinagem com ferramentas de diamante monocristalino sobre a integridade superficial de amostras de Ti (CP) e Ti-6Al-4V (liga comercialmente mais encontrada). Os aspectos analisados foram: o efeito das condições de usinagem de precisão (profundidade de usinagem e avanço) sobre o acabamento superficial (rugosidade, microtopografia, microtrincas, exatidão dimensional) relacionando com os mecanismos de formação do cavaco. O grau de encruamento também foi verificado, por meio de ensaios de microdureza.

A dissertação esta estruturada em capítulos, incluindo este capítulo introdutório, onde é abordado uma visão geral do titânio e suas ligas, e suas principais aplicações.

O capítulo 2 faz uma revisão bibliográfica sobre as aplicações do titânio e suas ligas, metalurgia, mecanismos de formação do cavaco e aborda também os aspectos físicos da usinagem de precisão (mecanismo de formação de superfícies e do cavaco, forças de usinagem, influência do material no processo) com o uso de ferramentas de diamante no acabamento superficial correlacionando a integridade superficial e seus métodos de verificação.

O capítulo 3 apresenta a metodologia experimental expondo as montagens executadas para os ensaios e os equipamentos usados nos procedimentos experimentais.

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões obtidas nos ensaios.

O capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

E por último, as referências bibliográficas.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

2.1 Titânio e Suas Ligas

2.1.1 Aplicações

O titânio e suas ligas são materiais importantes para componentes de alto desempenho onde alta relação peso/resistência é importante. São largamente empregados na indústria devido a suas excelentes propriedades. Para citar algumas, a densidade do titânio ($4,51 \text{ g/cm}^3$) é aproximadamente 60% a do valor do aço ($7,8 \text{ g/cm}^3$), seu módulo de elasticidade é cerca de 55% em relação ao valor do aço (a rigidez do titânio é menor que o do aço); resistência específica (relação resistência-peso) maior que as ligas de aço; resistência à fadiga maior que a do aço; alta resistência à corrosão, mas são classificados como difíceis de serem usinados (DONACHIE, 1988).

A maior aplicação desse material é na indústria aeronáutica na fabricação de pás para turbinas, compressores e componentes da fuselagem de mísseis, da mesma forma encontra utilização na fabricação de vasos de pressão, nas indústrias naval, química, petroquímica onde a propriedade de alta resistência à corrosão é importante, e biomédica, devido a sua resistência a ionização na corrente sanguínea (MACHADO & WALLBANK, 1990 e DONACHIE, 1988).

No entanto, a produção do titânio é cara em relação aos outros metais devido à complexidade do seu processo de extração, dificuldades na fundição e problemas durante sua fabricação. Por outro lado suas grandes propriedades contrabalanceiam os altos custos de produção (MACHADO & WALLBANK, 1990).

A liga de titânio mais usada é a Ti-6Al-4V que domina mais que 50% do mercado de titânio (POLMEAR, 1989). Ti-6Al-4V é uma liga do tipo alfa-beta que

contém 6% de alumínio e 4% de vanádio em massa. Tem excelente combinação de resistência e tenacidade aliada à excelente resistência à corrosão.

A TABELA 2.1 mostra um comparativo das propriedades mecânicas do Ti (CP) e da liga Ti-6Al-4V com as de um aço AISI – 1045.

TABELA 2.1 - Propriedades do Ti (CP) e da liga Ti-6Al-4V comparadas com as de um aço de médio carbono (MACHADO & WALLBANK, 1990; DONACHIE, 1998).

Material	Limite Elástico (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Dureza (HV)	Densidade (g/cm ³)	Condutividade Térmica (W/mK)	Calor Específico (J/kgK)
Ti (CP)	241	170	102	220	4,51	6	518
Ti-6Al-4V	895	825	110	340	4,43	7,3	580
AISI-1045	625	530	207	179	7,84	50,7	486

É importante notar as boas propriedades mecânicas que a liga de titânio tem a oferecer, mas suas propriedades térmicas são baixas.

2.1.2 Metalurgia do Titânio e suas ligas

As ligas de titânio podem ser divididas de acordo com suas aplicações em dois grupos: ligas resistentes à corrosão e ligas estruturais. Titânio CP (ligas α) são materiais usados onde a resistência à corrosão é fundamental. Ligas alfa-beta e beta são mais usadas em projetos estruturais.

O titânio tem duas estruturas cristalinas: uma é cúbica de corpo centrado (beta) e a outra hexagonal compacta (alfa). O grupo alfa é o titânio comercializado puro, com tensão de ruptura que abrange de 179 a 480 MPa, tem como principal aplicação ambientes altamente corrosivos que requerem baixa temperatura em seu uso, não são tratáveis termicamente e apresentam excelente soldabilidade. As ligas alfa-beta mostram alta resistência mecânica e boa combinação de propriedades em operações de trabalho

em torno de 315-400°C, alta resistência à corrosão, além de serem tratáveis termicamente. O grupo beta é caracterizado pelas suas propriedades de alta resistência mecânica e resistência à corrosão, podendo ser tratados termicamente, porém menos atrativos na indústria manufatureira por ser um material de alto encruamento (EZUGWU et al., 2003).

Em temperatura ambiente o titânio se constitui na forma alfa (hc). Sofre transformação alotrópica a aproximadamente 885°C, passando para a fase beta (ccc). A temperatura de transformação de fase muda dependendo dos elementos de liga. Esta transformação pode ser verificada na FIGURA 2.1. Há materiais de liga que aumentam a temperatura de transformação (estabilizadores α) e são o Al, O, Ga, Ge, N e C, e há outros que diminuem a temperatura de transformação (estabilizadores β) como o Cr, H, Cu, Mo, V, Nb e Si. Há elementos que são neutros com relação a esse aspecto (Sn e Zr), estes apenas atrasam o processo de mudança de fase. Dessa forma, as ligas de titânio são classificadas em 4 categorias principais: titânio não ligado que são as ligas alfa, ligas próximas a α , ligas beta e ligas alfa-beta (DONACHIE, 1988).

FIGURA 2.1 – Alotropia da estrutura cristalina do titânio comercialmente puro (CP) (SMITH, 1981).

Descrições dos tipos de ligas de titânio:

1. Ligas alfa (α):

Este grupo pertence ao titânio comercialmente puro (Ti (CP)) que é geralmente selecionado em projetos que necessitam de alta resistência à corrosão e não há grandes tensões aplicadas na estrutura. Pode-se aumentar a sua resistência por meio da adição de pequenas quantias de Fe e O. Sua estrutura obtida no microscópio óptico pode ser observada na FIGURA 2.2 (esta microestrutura esta de acordo com a micrografia 2657 da AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM), 1972). Diferente das outras ligas as ligas alfa não podem ser tratadas termicamente, devido à liga ser de apenas uma fase, porém possuem excelentes propriedades de soldagem (EZUGWU et al., 2003 e MACHADO & WALLBANK, 1990).

FIGURA 2.2 - Estrutura do Ti não ligado. Grãos recrystalizados de alfa primário, e beta transformado contendo alfa acicular. Microscopia óptica 500x.

2. Ligas próximas à alfa (α):

Estas ligas contêm estabilizadores α (Al) com um pouco de adição de estabilizador- β (Mo e V), mas seu comportamento é semelhante aos da ligas α . Na temperatura ambiente a microestrutura é caracterizada principalmente fase α com um pouco de β . A ligas mais comuns deste grupo são: Ti-8Al-1Mo-1V (Ti-8-1-1) e Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti-6-2-4-2s). Ligas próximas à alfa são principalmente usadas em operações com temperaturas que variam de 400 – 500 °C, pois possuem alta resistência a fluência (EZUGWU et al., 2003).

3. Ligas alfa-beta:

Este liga em temperatura ambiente apresenta uma mistura de fase alfa e fase beta contendo estabilizadores alfa e beta. A proporção de fase beta depende da quantidade de estabilizadores beta e também do tratamento térmico. Geralmente, estas ligas são usadas preferivelmente em projetos estruturais, daí o uso na indústria aeroespacial (estrutura aeronáutica, turbinas) e biomédica, no qual Ti-6Al-4V é a liga mais usada, a FIGURA 2.3 mostra a microestrutura obtida no microscópio óptico desta liga (esta microestrutura esta de acordo com a micrografia 2719 da AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM), 1972). A temperatura de transição para fase β é em torno de 955°C – 1010°C (AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM), 1980) (segundo DONACHIE (1988), a temperatura de transição do Ti-6Al-4V para a fase β é em torno de 980 °C). KIKUCHI et al. (2003) dizem que elementos de cobre adicionados em torno de 5-10% à liga Ti-6Al-4V aumentam a estabilidade da fase beta, melhorando a sua usinabilidade, pois este elemento forma inclusões lamelares que reduzem a ductilidade da liga, não permitindo ocorrer aresta postiça de corte ou adesão de cavaco da peça na ferramenta.

FIGURA 2.3 – Liga Ti-6Al-4V a estrutura consiste numa matriz com grãos equiaxiais alfa (cor azul) e beta intergranular (cor preta) em uma matriz alfa. Microscopia óptica 500x.

4. Ligas beta:

As ligas β possuem mais estabilizadores beta e menor quantidade de estabilizador alfa do que as ligas alfa-beta. A sua estrutura é cúbica de corpo centrado podendo-se aumentar a sua resistência por meio de uma pequena quantidade de fase alfa. As vantagens das ligas beta são: alta dureza, resistência a corrosão, capacidade de têmpera, boa conformação a frio e boa capacidade de forjamento (EZUGWU et al., 2003).

ROSEN et al. (1975) mostraram que a exposição do titânio a altas temperaturas causa a penetração do oxigênio na liga e a formação de uma camada frágil. Quando ligas de titânio são aquecidas à temperatura de 800°C sob condições atmosféricas, oxigênio, nitrogênio e hidrogênio penetram na superfície. A penetração desses elementos pode causar efeitos indesejáveis, tais como, endurecimento da superfície, aumento da sua fragilidade e queda da tenacidade. O oxigênio pode agir como estabilizador da fase alfa ou o oxigênio pode formar uma solução sólida intersticial de oxigênio no titânio. A formação da fase alfa, afeta a resistência da liga. Devido às concentrações de oxigênio, a liga torna-se extremamente frágil e a fratura ocorre com

maior facilidade. Esta penetração de oxigênio que aumenta a fragilidade da camada superficial é chamada de α -case.

2.2 Usinagem de Ultraprecisão

O papel dos materiais no desenvolvimento da tecnologia moderna é de suma importância. Quanto mais específico a aplicação de um material maior os requisitos de confiabilidade, segurança e alto desempenho em termos de eficiência. Além disso, os materiais têm que ser cada vez mais leves para a grande maioria das aplicações. Por fim, devem ter uma combinação de propriedades que possibilite seu uso para fins específicos.

Os produtos atuais são usados cada vez mais em meio ambientes especiais e/ou agressivos, como alta temperatura, em aplicações de criogenia, altamente corrosivos, vácuo, condições de alta pressão hidrostática entre outros. Materiais convencionais nem sempre são aplicáveis a esses fins. Em função desses fatores, a usinagem de ultraprecisão é cada vez mais requerida para o processamento de tais materiais, com destaque para o torneamento de ultraprecisão, ou torneamento com ponta única de diamante (NGOI & SREEJITH, 2001).

A definição de torneamento de ultraprecisão ou torneamento com ponta única de diamante passa antes pela definição de “ultraprecisão”. Segundo DUDUCH (1993), “ultraprecisão” está relacionada ao maior nível de exatidão alcançável, em uma determinada época, com um determinado tipo de equipamento. É uma operação de usinagem que foi inicialmente desenvolvida para a produção de componentes ópticos a partir de materiais dúcteis, como alumínio e cobre. Surgiu como uma segunda opção à retificação de ultraprecisão após a 2ª Guerra Mundial, em empresas privadas da Europa e por Departamentos Militares dos Estados Unidos, sendo que uma das primeiras máquinas-ferramenta de ultraprecisão com ferramenta de diamante foi construída em 1962 naquele país, impulsionando pesquisas em máquinas-ferramenta de ultraprecisão em todo o mundo (KRAUSKOPF, 1984; CORBETT et al., 2000).

Na década de 60 J. Bryan (BRYAN, 1968; BRYAN, 1979) e sua equipe e McKeown (McKEOWN, 1987) no Cranfield Unit for Precision Engineering (CUPE),

aperfeiçoaram a tecnologia de máquinas-ferramenta de ultraprecisão. Estes pesquisadores determinaram novos padrões para máquinas ferramenta de ultraprecisão para a usinagem de materiais dúcteis com ferramentas de diamante monocristalino e para a retificação de cerâmicas avançadas e vidros usando rebolos diamantados. Muitas destas máquinas-ferramenta construídas nos Estados Unidos, Japão e Europa começaram a ser comercializadas para determinadas aplicações em Engenharia de ultraprecisão (KOMANDURI, 1996).

McKEOWN (1987) definiu uma possível classificação das usinagens convencionais, de precisão e de ultraprecisão, em termos de tolerância e variedades de produtos por processo, mostradas na TABELA 2.2.

O torneamento de ultraprecisão exige alguns requisitos básicos, tais como: máquinas ferramentas com mancais aerostáticos, elevada rigidez, controle ultrapreciso de posicionamento, ferramenta de diamante, e o material a ser usinado, que deve ser escolhido de forma a permitir um nível de acabamento superficial de ordem nanométrico. Assim, segundo PAUL et al. (1996), material “torneável com diamante” significa que o custo do desgaste da ferramenta é aceitável em termos do valor do componente usinado, por exemplo, lentes anesféricas de silício. Alguns dos materiais mais usados na usinagem de ultraprecisão estão listados na TABELA 2.3 (SILVA, 1999).

TABELA 2.2- Tolerâncias de componentes para diversos produtos fabricados utilizando processos de usinagem (McKEOWN, 1987).

	Faixa de Tolerância	Mecânico	Eletrônico	Óptico
Usinagem Convencional	200 μm	Elementos gerais para aplicações domésticas, autopeças em geral, etc.	Elementos eletrônicos em geral, motores e conectores	Corpos de câmeras, telescópios e binóculos
	50 μm	Elementos gerais para motores	Transistores e diodos, cabeçotes magnéticos para gravadores	Diafragma de câmeras, porta lentes para câmeras e telescópios
Usinagem de Precisão	5 μm	Partes mecânicas para relógios, mancais para máquinas ferramenta, engrenagens	Relés elétricos, resistores, condensadores, wafers de silício	Lentes, prismas, fibras ópticas e conectores (múltiplo modo)
	0.5 μm	Mancais de esfera e rolo, válvulas servo-hidráulicas, mancais aerostáticos, bicos injetores para impressoras, etc.	Escalas magnéticas, osciladores de quartzo para câmera CCD, memórias magnéticas ("bubbles"), transdutores de pressão finos, cabeçotes de impressão térmicos, cabeçotes de videocassete	Lentes de precisão, escalas ópticas, espelhos poligonais para laser, espelhos de deflexão, conectores e fibra óptica (modo único)
Usinagem de Ultraprecisão	0.05 μm	Blocos padrões, pontas de endentadores de diamante, mesas X-Y de ultraprecisão	Memórias de circuito integrado, videodisc eletrônicos e Large Scale Integrated LSI	Espelhos planos, lentes de Fresnel, redes de difração, cabeçotes de leitura de DVD video-disc óptico
	0.005 μm		Very Large Scale Integrated VLSI	Redes de difração de ultraprecisão

TABELA 2.3 - Materiais usados na usinagem de ultraprecisão (SILVA, 1999).

METAIS	POLÍMEROS	CRISTAIS
Alumínio	Acrílico	Silício
Cobre	Nylon	Germânio
Latão	Policarbonato	Arseneto de Gálio
Bronze	Poliestireno	Antimoneto de Índio
Níquel	Polisulfonados	Sulfeto de Zinco
Zinco	Acetato	Niobato de Lítio
Prata	Fluoroplásticos	Fosfato de Potássio
Ouro		Sulfeto de Cádmio
Chumbo		Dióxido de Telúrio
Estanho		Iodeto de Césio
Platina		Fluoreto de Cálcio
Magnésio		Fluoreto de Estrôncio

2.2.1 Geração de superfícies no torneamento de ultraprecisão

KÖNIG (1991) diz que na usinagem de ultraprecisão, os parâmetros de corte são da ordem de micrômetros ou menores. Portanto, o processo de remoção de material e geração de superfícies torna-se crítico em razão da microinteração entre a aresta de corte da ferramenta e o material. Por exemplo, materiais policristalinos apresentam microestrutura com tamanho médio de grão da ordem de algumas dezenas a centenas de micrômetros o que conseqüentemente torna as dimensões de usinagem muito menores que o tamanho médio dos grãos. Portanto, em seções de corte reduzidas (profundidade de usinagem versus avanço), a ferramenta estará cortando no domínio de um único grão.

Segundo KÖNIG (1991), a microtopografia da superfície ou rugosidade resulta da transferência do perfil da ferramenta sobre a peça, sendo o movimento relativo entre eles especificamente controlado (FIGURA 2.4). Portanto, a rugosidade é gerada tanto pelo controle dos movimentos da máquina-ferramenta (movimento relativo entre ferramenta e peça) quanto pelas características de transferência do perfil da aresta cortante para a peça.

FIGURA 2.4 - Imagem da superfície de uma liga Al-Mg, onde é possível observar a transferência do perfil da ferramenta sobre a peça (JASINEVICIUS, 2005).

A quantidade e o tamanho de partículas duras (impurezas, inclusões, etc.) em metais e ligas podem ser considerados fatores limitantes para obtenção de melhores acabamentos superficiais no torneamento de ultraprecisão.

Estas impurezas geralmente são resíduos de processos pirometalúrgicos e/ou de refino aplicados para obtenção de metais e ligas. Essas partículas possuem durezas elevadas e se encontram em uma matriz dúctil.

Existem alguns materiais como, por exemplo, ligas de alumínio contendo altas concentrações de silício que apresentam inclusões duras em sua matriz dúctil. Estas partículas são difíceis de serem cortadas (FIGURA 2.5). Por isso, durante o corte, a ferramenta irá arrancar e arrastar essas inclusões, causando riscos que prejudicam a função da superfície usinada. Além disso, estas partículas, por serem muito resistentes, podem danificar severamente a aresta de corte causando micro-fraturas através de um mecanismo de fadiga que, conseqüentemente, prejudica o acabamento superficial.

FIGURA 2.5 - Fotomicrografia da superfície usinada da liga Al 7075, aumento de 100x (JASINEVICIUS, 2005).

O reflexo deste fenômeno também pode ser observado na FIGURA 2.6 por meio da superfície do cavaco. É possível observar que na extremidade mais fina do cavaco pequenos furos demonstram que, durante o passo da ferramenta, esta não consegue retirá-los, removendo apenas o material ao seu redor.

FIGURA 2.6 – Imagem da parte inferior dos cavacos da liga Al 7075 analisados no MEV, imagem com aumento de 400 x (JASINEVICIUS, 2005).

O problema de inclusões duras na matriz dúctil pode ser contornado utilizando-se ferramentas com ângulo de saída mais negativo. Em contrapartida, ferramentas com essa geometria tendem a causar maiores danos à superfície devido a maiores taxas de

deformação introduzidas pela geometria da ferramenta, pois ângulos de saída mais negativos dificultam a remoção de material e aumentam as forças de corte.

O mecanismo de geração de superfície em microusinagem pode ser afetado por vibrações relativas, sendo estas em escala de amplitude nanométrica, assim como pela microgeometria do processo de remoção do cavaco. Além do erro relativo de movimento da usinagem, as propriedades do material (metalurgia e pureza) podem afetar muito a microestrutura da superfície usinada. Em microusinagem de policristais há imperfeições inevitáveis na rugosidade superficial, decorrentes de fatores como anisotropia, inclusões duras na matriz metálica, contornos de grão, dureza superficial, etc. (KÖNIG, 1991).

2.3 Modelo Ortogonal de Corte

O processo de *corte ortogonal com formação de cavaco contínuo* é muito usado na área de pesquisa de usinagem dos metais devido a sua simplicidade. A formação do cavaco é considerada aqui um fenômeno bidimensional, o qual se realiza em um plano normal a aresta cortante, isto é, no plano de trabalho. Esta simplificação não altera, porém a essência do fenômeno, pois as conclusões obtidas nesta teoria são aplicáveis ao corte tridimensional (FERRARESI, 1970 e BAYOUMI & XIE, 1995).

Para um tratamento analítico simplificado, FERRARESI (1970), admite por meio da teoria do corte ortogonal, as seguintes considerações:

- O tipo de cavaco formado é contínuo, sem formação da aresta postiça de corte;
- A ferramenta é suficientemente afiada, tendo uma única aresta cortante a qual é retilínea e perpendicular ao plano de trabalho ($\chi = 90^\circ$ e $\lambda = 0^\circ$);
- Não existe contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça usinada;
- A espessura de corte é pequena em relação à largura de corte;
- A aresta cortante é maior que a largura de corte;

- A espessura de corte e a velocidade de corte são constantes com o tempo;
- A largura de corte e a largura do cavaco é idêntica;

O modelo ortogonal bidimensional da geometria do processo de corte pode ser visto na FIGURA 2.7 (BLACK, 1979). O material na região delimitada pela área indeformada (t) à frente da ferramenta será separado da peça pela aresta de corte e face de saída da ferramenta formando a espessura do cavaco (t_1). V_{ca} é a velocidade do cavaco, V_{cm} é a velocidade do cisalhamento, V_p é a velocidade da peça passando pela ferramenta, F_{cm} é a força de cisalhamento. A linha AB e o ângulo ϕ representam o plano e o ângulo de cisalhamento, respectivamente (BAYOUMI & XIE, 1995).

FIGURA 2.7 - Modelo ortogonal de corte (BLACK, 1979).

FIGURA 2.8 - Modelo de velocidade (BLACK, 1979).

O ângulo ϕ assume um valor de forma a minimizar o trabalho realizado durante o corte. Uma zona secundária de deformação ocorre onde o cavaco é forçado a mover-

se sobre a face de saída da ferramenta; nesse ponto considera-se que o material seja friccionado sobre a superfície de saída da ferramenta, com forças de atrito significativas.

2.4 Bandas de Cisalhamento Adiabáticas

Para BLACK (1979), quando um material exaure sua capacidade de encruamento ou deformação, expressando que não há mais possibilidades de rearranjos nas discordâncias em suas células, isto quer dizer que a partir deste momento, uma instabilidade dinâmica ocorre em uma pequena região localizada, este efeito é denominado cisalhamento adiabático. Este fenômeno ocorre em uma estreita região que se torna quente por meio da conversão da energia de trabalho em energia térmica. Durante a deformação plástica, as discordâncias movem-se e multiplicam-se sob certa configuração, sendo que cada discordância possui certa quantidade finita de energia de deformação. Por meio de um mecanismo não entendido até o momento, a configuração das discordâncias produzidas naquele ponto são repentinamente rearranjadas numa pequena região de banda localizada. Estas discordâncias, se anuladas com esta banda delgada, resulta sua energia de deformação em calor. Quanto mais rápida é essa deformação, menor é o tempo disponível para o calor fluir para longe das pequenas regiões. Nas deformações volumétricas, um decréscimo alto na tensão de escoamento, é associado com esta banda adiabática de amolecimento.

Este mecanismo foi proposto em operações de corte de metais, que apresentam a deformação plástica de forma não homogênea, com o cisalhamento ocorrendo em bandas delgadas (chamadas frentes de cisalhamento) segmentando o cavaco em uma estrutura do tipo lamelar. A periodicidade das frentes de cisalhamento é notavelmente uniforme (BLACK, 1979) independente das variações nas condições de corte.

BLACK (1979) notou também que estas lamelas sempre se desenvolvem perpendicularmente à direção de corte da ferramenta e a periodicidade dos espaços na estrutura fundamental quase não variou às mudanças das condições de corte.

De acordo com BLACK (1979), a tensão de escoamento total no corte dos metais seria a soma da tensão de escoamento ativada termicamente na frente de cisalhamento, τ_{fe} , mais a tensão de escoamento ativada sem calor na região da lamela,

τ_L . Estes fenômenos ocorrem de maneira cíclica. τ_L ocorre devido principalmente a processos de intersecção de discordâncias controlados pela energia de falha de empilhamento. τ_{fc} ocorre devido principalmente ao colapso de células metaestáveis, com subsequente aquecimento térmico e amolecimento de uma região estreita.

Para propósito de explicação segundo BLACK (1979), este processo é visto ao longo da direção x . O material encruado devido à tensão compressiva experimenta o seguinte padrão de tensões. A tensão cresce com o aumento da densidade de discordâncias contra a estrutura meta-estável. O nível máximo desta tensão será determinado pela energia exigida para a criação de discordâncias através da deformação imposta pela ponta da ferramenta penetrar na distribuição da célula meta-estável (discordâncias *alien*). A penetração, quando ela ocorre, fará com que as células metaestáveis entrem em colapso e se rearranjem novamente. Nesse instante energia em forma de calor será gerada. Isto é o que ocorre na frente de cisalhamento, a qual irá operar sobre uma largura de banda muito delgada, $2d$, com evidente decréscimo no nível da tensão de escoamento, τ_{fc} (FIGURA 2.9).

A tensão é relaxada, mas imediatamente começa a crescer novamente na forma de empilhamento de discordâncias. Durante o tempo de empilhamento, a lamela será formada. Com a elevação da tensão, densos arranjos de discordâncias (“*tangles*”) são formados e um cisalhamento catastrófico vem a ocorrer – uma nova frente de cisalhamento será formada. A largura da lamela “ d_L ” será criada. Este processo cíclico está representado na FIGURA 2.9. A dificuldade de penetração das estruturas de redes de células (ou qualquer barreira que bloqueie o movimento de discordâncias, os quais podem estar incluídos contornos de grão, etc.) será por necessidade refletida pela falha de energia de empilhamento das discordâncias do metal (BLACK, 1979).

FIGURA 2.9 - Modelo esquemático para tensão de escoamento no corte de metais (BLACK, 1979).

Segundo BLACK (1979), ferramentas com aresta de corte muito afiada agem como fontes mais concentradas para discordâncias enquanto que ferramentas menos afiadas ou “cegas” (ferramenta com aresta postiça) se comportarão como fontes difusas.

BLACK (1979) diz que as variações nas propriedades mecânicas podem ser detectadas também através do cavaco. A espessura das lamelas formadas pode mudar aleatoriamente de acordo com a mudança de um grão para outro. Essa variação na espessura dessas lamelas decorre da variação do ângulo de cisalhamento que muda em função da mudança nas propriedades mecânicas de cada grão.

Este tipo de estrutura fina não deve se confundir com a estrutura grosseira dente de serra que ocasionalmente é observada na zona de escorregamento e no topo dos cavacos. A periodicidade da estrutura dente de serra pode ser variada por meio das mudanças das condições de corte, podendo-se concluir que a estrutura dente de serra reflete a resposta elástica das condições de corte (BLACK 1979). Este tipo de estrutura pode ser variada mudando-se a rigidez do sistema de corte.

2.5 Usinagem do Titânio (CP) e Suas Ligas

Titânio e suas ligas são considerados extremamente difíceis de serem usinados. O desgaste de ferramenta ocorre de forma rápida e progressiva devido às altas temperaturas de corte e alta adesão entre a ferramenta e o material a ser usinado resultado da sua baixa condutividade térmica (NARUTAKI & MURAKOSHI, 1983; NABHANI, 2001; CHE-HARON 2001; RAHMAN, WONG & ZAREENA, 2003).

A baixa usinabilidade do titânio tem conduzido muitas empresas (ex: Rolls-Royce e General Electric) a investir grandes quantias de dinheiro no desenvolvimento de técnicas que venham a minimizar o seu custo (MACHADO & WALLBANK, 1990).

A maior parte dos componentes feitos de titânio são produzidos através de processos de fabricação convencionais. Melhorar a eficiência da usinagem de ligas de titânio é fundamental para minimizar os custos de remoção de material e evitar perda de integridade superficial, em alguns casos para se atingir a forma principal de uma peça de titânio, os cavacos formados podem atingir 50% - 90% em massa. As forças de corte para o titânio são somente pouco maiores em relação aos aços de mesma dureza, porém as características metalúrgicas especiais fazem com que estes materiais sejam muito mais difíceis de usinar (DONACHIE, 1988; KAHLES et al., 1985). Entre essas características podem-se citar:

1. Baixa condutividade térmica: a condutividade térmica do titânio é cerca de um sexto ao do aço (POLMEAR, 1989). Esta baixa condutividade faz com que o material se torne sensível aos danos causados pelo calor excessivo. O calor específico do titânio é maior que o do aço, mas o calor específico volumétrico é menor devido sua densidade ser muito menor. Esses dois fatores causam altas temperaturas localizadas durante a usinagem (RAHMAN, WONG & ZAREENA, 2003). Estas baixas propriedades térmicas interagem nas propriedades físicas controlando a natureza da deformação plástica (cisalhamento concentrado) na zona primária de corte (KOMANDURI, 1982).

2. Conservação da resistência à tração e escoamento: mesmo a altas temperaturas, a resistência à tração e escoamento das ligas de titânio se mantém alta. Isso se opõe à formação de cavaco. A alta resistência à tração resulta em altas forças

durante a usinagem e leva a alta força de atrito, de tração e de cisalhamento sobre a ferramenta de corte. Como o titânio é muito resistente, grande parte da energia de torneamento é convertida em calor (KÖNIG, 1979). Sua alta capacidade de encruar aumenta ainda mais as forças de corte. A dureza do titânio é aproximadamente igual a dos aços estruturais, mas as forças de corte na usinagem do titânio são maiores que as necessárias para se usinar o aço (ZHAO & HONG, 1992). Esta alta resistência começa a decrescer consideravelmente acima de 800 °C (MACHADO & WALLBANK, 1990).

3. Baixo coeficiente de elasticidade: o coeficiente de elasticidade do titânio é cerca de metade do aço. Esse baixo coeficiente pode causar vibração (trepidação) e deflexão da peça (especialmente quando se usina partes delgadas da peça), e problemas de tolerância dimensional no acabamento final (KOMANDURI, 1982).

4. Há grande afinidade química às altas temperaturas: (>500 °C) com a maior parte dos materiais de ferramenta disponíveis (MACHADO & WALLBANK, 1990 e KOMANDURI, 1982). Isso leva à fratura ou desgaste prematuro da ferramenta. Também, pelo mesmo motivo, há grande tendência de os cavacos aderirem aos grãos abrasivos a altas temperaturas, causando empastamento do rebolo na retificação (REN et al., 1991; RAHMAN, WONG & ZAREENA, 2003). As temperaturas na usinagem do titânio podem atingir em torno de 1100°C na ponta da ferramenta, portanto deve-se ter cuidado para não ocorrer o início de uma chama (NARUTAKI & MURAKOSHI, 1983).

5. Perda da resistência à fadiga: ligas de titânio perdem significativamente a resistência à fadiga com a deterioração da integridade superficial. As propriedades básicas de fadiga dependem muito da tensão de compressão induzida pela ferramenta sobre a superfície. Os parâmetros de usinagem devem ser cuidadosamente escolhidos (KAHLES et al., 1985).

6. Instabilidade no processo de formação do cavaco: na usinagem do titânio e suas ligas o cavaco é cíclico ou serrilhado, devido a deformação grosseira não homogênea na zona primária de corte (KOMANDURI, 1982).

7. Componentes das forças de corte e forças axiais: oscilam causando trepidação havendo a necessidade de ter um sistema máquina-ferramenta de alta rigidez (KOMANDURI, 1982). Isto não ocorre no caso deste estudo, pois a máquina-ferramenta usada neste trabalho possui alta rigidez.

8. Os cavacos do titânio são muito finos: que consequentemente produz um contato entre o cavaco e a ferramenta muito pequeno (um terço da área de contato que o aço forma com o mesmo avanço e profundidade de usinagem). Altas temperaturas e alta solicitação ocorrem de modo concentrado próximo à aresta de corte prejudicando o tempo de vida da ferramenta (RAHMAN, WONG & ZAREENA, 2003 e MACHADO & WALLBANK, 1990).

Todos esses fatores causam perda da integridade superficial e desgaste excessivo da ferramenta, durante o torneamento ou retificação. Enfim, a superfície de ligas de titânio é facilmente danificada pela usinagem (WANG, 2000).

Titânio e suas ligas normalmente trabalham em situações de carregamento dinâmico. Portanto, a rugosidade e integridade superficial (micro trincas, deformação plástica, tensão residual, etc.) precisam ser controladas. Em serviço, esses danos podem levar à fadiga prematura e corrosão causada por tensão (WANG, 2000).

Segundo HONG et al. (2001), a usinagem de Ti-6Al-4V forma cavacos serrilhados e não uniformes, ou seja, as forças provocadas na ferramenta de corte são alternadas podendo levar à fadiga desta, além de que no caso do torneamento, estas forças favorecem o surgimento de trepidações, resultando na ondulação do acabamento superficial.

Por estas razões, as propriedades requeridas para os materiais ferramentas na usinagem do titânio segundo RAHMAN, WONG & ZAREENA, 2003; NARUTAKI & MURAKOSHI, 1983 e MACHADO & WALLBANK (1990) devem ser:

- Alta dureza em elevadas temperaturas para resistir a alta tensão envolvida;
- Resistência ao lascamento, especialmente devido a formação segmentada do cavaco;
- Tenacidade e resistência a fadiga também para evitar os danos causados pela segmentação do cavaco;
- Baixa reatividade com o titânio;
- Alta resistência a compressão;

- Boa condutividade térmica para minimizar os gradientes térmicos e o choque térmico na ferramenta;

NABHANI, (2001) concluiu em seus estudos que a ferramentas de diamante foi a que apresentou menor taxa de desgaste e produziu os melhores acabamentos superficiais. Constatou-se também que as ferramentas de CBN e PCD são muito mais caras que os carbetos, mas que em operações de acabamento superficial estes materiais ultra-duros estão sendo cada vez mais empregados, atraindo consumidores por sua alta confiabilidade e resistência ao desgaste, concluindo, portanto, que a ferramenta comercial disponível de maior satisfação foi a ferramenta de diamante.

Segundo ENOMOTO & TABOR, (1981) no caso do coeficiente de atrito do diamante, o valor é relativamente pequeno na direção cristalográfica {110} que encontra-se na faixa de $(0,06 \leq \mu \leq 0,08)$, e na direção cristalográfica {100} este valor encontra-se na faixa de $(0,1 \leq \mu \leq 0,15)$

HONG et al. (2001) estudaram o uso da criogenia como forma de resfriamento e notaram que o coeficiente de atrito diminuía significativamente, pois diminuindo a temperatura, a dureza do titânio aumenta, desfavorecendo a forte adesão na interface cavaco e ferramenta. Por outro lado, quando se elevava a velocidade de corte, a temperatura do cavaco aumentava melhorando o escoamento do cavaco sobre a ferramenta (*hot-softening*), resultando numa leve queda na taxa de atrito. No estudo realizado por HONG et al. (2001) observou-se que o nitrogênio líquido, além de refrigerante, é um lubrificante. A evidência deste fenômeno está correlacionada com a alta redução na taxa de atrito.

O uso de quebra cavacos também diminuiu as forças de atrito na usinagem do Ti-6Al-4V, pois este mecanismo permite que o lubrificante chegue à zona de trabalho com maior facilidade, melhorando o escoamento do cavaco na interface da ferramenta. A redução no coeficiente de atrito tem como consequência a menor deformação plástica do material o que leva a diminuir o seu encruamento, melhorando a integridade superficial da peça (HONG et al., 2001).

2.6 Cavacos Serrilhados

Cavacos serrilhados são comumente observados na usinagem de vários materiais. Estes cavacos são formados devido às instabilidades no processo de corte em certas faixas de velocidade e sua formação é argumentada pela resposta dinâmica da máquina-ferramenta. Sérias vibrações são frequentemente encontradas quando se usina estes materiais, impondo um limite na taxa remoção do material e, conseqüentemente, na produtividade (KOMANDURI & BROWN, 1981).

Na usinagem alguns materiais classificados como “difíceis de serem usinados” tais como as ligas de aço encruado, ligas de titânio e ligas a base de níquel, ocorrem instabilidades no processo de corte quando se variam às velocidades de corte. HOU & KOMANDURI (1997) dizem que estas instabilidades são o resultado da resposta termodinâmica do material às condições de corte. A conseqüência disto é o cisalhamento localizado e formação de cavacos cíclicos.

O cisalhamento localizado resulta na variação cíclica das forças a uma magnitude significativa e conseqüentemente causa vibrações e trepidações no processo de corte dos metais. Isto ocorre mesmo em sistemas de máquinas - ferramenta com alta rigidez. Conseqüentemente, o entendimento do processo, o critério para a instabilidade no cisalhamento, e as condições que conduzem ao cisalhamento localizado são importantes considerações para aumentar a produtividade, vida da ferramenta e qualidade e especialmente a eficiência da operação de corte.

Nem todos os cavacos são formados pelo mesmo mecanismo. Inicialmente é necessário distinguir tipo de forma clara e depois entender os seus mecanismos de formação. Há pelo menos 4 tipos de cavacos serrilhados que KOMANDURI & BROWN (1981) classificou:

1. Cavaco ondulado;
2. Cavaco de cisalhamento catastrófico ou cavacos de cisalhamento localizado ou adiabático;
3. Cavaco segmentado;
4. Cavaco descontínuo;

O *cavaco ondulado* é formado do resultado de variações cíclicas na espessura do cavaco não deformado, devido aos ângulos de folga e saída causados, pela trepidação regenerativa sobre condições de vibrações auto-excitadas. A ondulação de cada cavaco é geralmente simétrica semelhante-se com uma onda harmônica ou senoidal. Rigidez limitada e baixo coeficiente de amortecimento da ferramenta ou do sistema são os principais responsáveis por isto. Quando o processo de corte oscila perto da frequência natural do sistema da máquina-ferramenta, isto causa ressonância e consequentemente grandes amplitudes de vibração.

O *Cavaco de cisalhamento catastrófico ou cavaco de cisalhamento localizado ou adiabático* é peculiar a certos materiais (ligas de titânio, ligas a base de níquel ligas de aço) que possuem planos de escorregamento limitados (estrutura cristalina hc), propriedades de baixa condutividade térmica, alta dureza e variação na deformação plástica devido à variação da temperatura causada pela transformação de fase que consequentemente muda a estrutura do cristal (HOU & KOMANDURI, 1997).

Este tipo de cavaco serrilhado é principalmente causado por sua instabilidade térmica na zona primária de cisalhamento levando a falha de cisalhamento catastrófica ao longo da superfície de cisalhamento. A formação das bandas concentradas de cisalhamento durante este processo, é causada pelas propriedades de baixa condutividade térmica de certos materiais e consequentemente concentram energia térmica nestas bandas. A maior parte dos segmentos são formados pelo processo de desarranjo submetendo pequenas quantidades de deformações separadas por uma banda de cisalhamento favoravelmente fina deformada e concentrada que atua como um ponto crítico plástico. A FIGURA 2.10 mostra um cavaco de cisalhamento catastrófico, as flechas brancas mostram bandas concentradas de cisalhamento.

FIGURA 2.10 – Fotomicrografia de uma secção transversal de um típico cavaco de cisalhamento catastrófico do Ti-6Al-4V (KOMANDURI & BROWN, 1981).

O *cavaco segmentado* é um cavaco contínuo, mas com uma variação periódica na espessura. Cavaco segmentado é obtido apenas em certas faixas de velocidade e condições de corte. Embora a ondulação do segmento seja assimétrica, a deformação dentro do cavaco é homogênea (FIGURA 2.11). Além das condições de corte, a formação do cavaco segmentado depende muito da composição e da microestrutura da peça a ser usinada. As forças instantâneas variam periodicamente com uma grande amplitude durante a segmentação do cavaco.

FIGURA 2.11 - Fotomicrografia de uma secção transversal de um típico cavaco serrilhado de aço de baixo carbono (AISI 1015) com periódica variação na espessura e deformação homogenia na zona primária de cisalhamento (KOMANDURI & BROWN, 1981).

O *cavaco descontínuo* é um caso especial do cavaco de cisalhamento catastrófico. Neste caso, a completa separação entre os segmentos do cavaco ocorre como um resultado da ruptura periódica da falha da superfície de cisalhamento.

Consequentemente a deformação desta banda será bem menor. Este tipo de cavaco é comumente obtido quando se usina materiais frágeis e outros materiais com velocidades de corte baixas. Ao contrário dos cavacos de cisalhamento catastrófico, não ocorre resoldagem dos segmentos individuais.

2.7 Formação dos Cavacos no Titânio e Suas Ligas

O entendimento dos aspectos metalúrgico na formação de cavaco é fundamental nos processos de usinagem, pois auxilia na seleção das condições ótimas de corte para o aumento da taxa de produção e redução dos custos de manufatura. Procurar dominar o conhecimento sobre seus mecanismos é essencial para aperfeiçoar a precisão/qualidade do processo e melhorar o acabamento superficial (BAYOUMI & XIE, 1995).

Geralmente a usinabilidade dos materiais pode ser avaliada por diversos tipos de medidas incluindo o tipo de cavaco, desgaste e vida da ferramenta, temperatura, forças de corte e energia consumida. No entanto, materiais diferentes comportam-se de maneiras diversas com respeito a essas medidas. Ficou constatado também que a usinabilidade está diretamente relacionada com a formação e separação do cavaco (BAYOUMI & XIE, 1995).

Muitos problemas na prática, tais como vibrações devido à segmentação do cavaco, arestas postiças de corte e controle de quebra do cavaco, também são relacionados com a usinabilidade, limitando a taxa de remoção do material e consequentemente a produtividade (XIE, BAYOUMI & ZBIB, 1995).

De acordo com HUA & SHIVPURI (2004) a morfologia do cavaco influencia significativamente no comportamento termomecânico da interface ferramenta-peça, e por sua vez afeta a vida da ferramenta em operações com ferramentas com geometria definida. Com o objetivo de aumentar a produtividade e a vida da ferramenta na usinagem das ligas de titânio, torna-se necessário o estudo dos mecanismos de sua formação e seu efeito sobre a usinabilidade

Segundo KOMANDURI & TURKOVICH (1981) na usinagem das ligas de titânio, as vibrações nas ferramentas são provocadas pela deformação plástica

grosseiramente não homogênea na zona primária, produzindo cavaco segmentado que pode ser acentuada pela rigidez inadequada da estrutura da máquina ferramenta.

A FIGURA 2.12 e a FIGURA 2.13 mostram um típico cavaco da liga Ti-6Al-4V polido e atacado mostrando a micrografia da secção longitudinal da liga Ti-6Al-4V com o tipo de formação de cisalhamento catastrófico, e na FIGURA 2.14 mostra o cavaco contínuo de um aço, no qual é possível observar as diferenças na natureza de deformação.

FIGURA 2.12 – Micrografia das bandas de cisalhamento localizadas (ou bandas de cisalhamento adiabáticas) formadas no corte ortogonal do Ti-6Al-4V a uma velocidade de $V_c=1,2\text{m/s}$ (MOLINARI, MUSQUAR & SUTTER, 2002).

FIGURA 2.13 – Banda de cisalhamento localizadas ou adiabáticas demonstradas pelas setas em um cavaco de Ti-6Al-4V obtida pelo corte ortogonal a uma velocidade de $V_c=13\text{m/s}$ (MOLINARI, MUSQUAR & SUTTER, 2002).

FIGURA 2.14 – Cavaco contínuo obtido de um aço (KOMANDURI & TURKOVICH, 1981).

Os cavacos da liga de titânio são serrilhados e a sua deformação não é uniformemente distribuída, mas confinada em bandas delgadas entre os segmentos como o indicado entre as flechas brancas (FIGURA 2.12). Já no cavaco contínuo a deformação é basicamente uniforme e estável.

Segundo KOMANDURI & TURKOVICH (1981), o cavaco serrilhado nas ligas de titânio é formada devido ao início da instabilidade no processo de corte que resulta do amolecimento térmico e mecanismos de encruamento na zona primária de cisalhamento. KOMANDURI & TURKOVICH (1981) sugerem também que a

formação das bandas concentradas de cisalhamento (também chamada de cisalhamento adiabático) ocorre também devido às baixas propriedades térmicas (baixa condutividade térmica e baixo calor específico) destas ligas e a conseqüente concentração da energia térmica nestas bandas.

As bandas de cisalhamento adiabáticas são manifestações da instabilidade termodinâmica resultando na concentração de grandes deformações de cisalhamento em camadas delgadas. Esta deformação localizada é acompanhada por uma grande elevação local da temperatura, que é uma condição necessária para se obter o cisalhamento adiabático (MOLINARI, MUSQUAR & SUTTER, 2002).

KOMANDURI & TURKOVICH (1981) fazem algumas observações específicas na formação do cavaco na usinagem do titânio que serão apresentadas a seguir:

(1) A seqüência de eventos que conduz ao cisalhamento catastrófico do cavaco é basicamente dividida em dois estágios. O primeiro estágio envolve a instabilidade plástica levando à deformação localizada ao longo da superfície de cisalhamento (segundo TURLEY & DOYLE (1982) a deformação na zona de cisalhamento adiabática é de aproximadamente $\gamma_h \approx 7$). Esta superfície se origina da ponta da ferramenta quase que paralela ao vetor da velocidade de corte e gradualmente se curva com o formato côncavo dirigido para cima até que este encontra uma superfície livre. A falha por cisalhamento do lado externo no cavaco aparece na forma de trinca e da parte interna mantém-se com uma banda larga severamente deformada que, quando quimicamente atacada, aparece como uma banda concentrada (as setas brancas indicam na FIGURA 2.13).

O segundo estágio envolve o gradual achatamento de uma meia cunha de maior ductibilidade (a superfície inclinada cisalhada no lado do material do segmento anterior) que sofre pouca deformação feita pela compressão da superfície da ferramenta (segundo TURLEY & DOYLE (1982) esta deformação é de aproximadamente $\gamma_h \approx 1,3$).

A malha resulta na espessura do cavaco que é aproximadamente a mesma que a profundidade do corte ortogonal. Esta observação leva alguns pesquisadores a acreditar falsamente que quando se usina ligas de titânio, o ângulo de cisalhamento é muito grande (aproximadamente 45°) (KOMANDURI, 1982). O uso do termo ângulo de cisalhamento é inapropriado para este tipo de formação de cavaco e seria melhor cessar o seu uso.

A FIGURA 2.15 de a-f, mostra um diagrama esquemático da seqüência de eventos (baseado na análise de vídeos do processo de formação do cavaco dentro do microscópio eletrônico de varredura), mostrando que na usinagem das ligas de titânio, vários estágios envolvem a falha de cisalhamento catastrófico na formação de seu cavaco.

FIGURA 2.15 – Diagrama esquemático de uma seqüência de eventos mostrando os vários estágios envolvidos na formação do cavaco quando se usina ligas de titânio (KOMANDURI & TURKOVICH, 1981).

A formação dos segmentos forma-se com o achatamento gradual do material em forma de cunha à frente da ferramenta. Esta fase do processo é similar ao processo da formação do cavaco descontínuo. O contato inicial na face da ferramenta com o segmento sendo formado é extremamente pequeno e o comprimento do contato aumenta com o progresso do achatamento (de acordo com o procedimento da ferramenta de corte

em direção do material da peça). Até o final do estágio de achatamento do processo de segmentação do cavaco, quase não há movimento relativo entre a interface da parte de baixo do cavaco que esta sendo formado, com a face da ferramenta.

As forças envolvidas no processo de formação do cavaco, rapidamente transferem o calor gerado para a ponta da ferramenta e permite uma interação química entre o cavaco e a ferramenta podendo acelerar o desgaste da ferramenta. A formação lenta e gradual do cavaco segmentado empurra o segmento anteriormente formado para cima. O contato entre o segmento anterior e o segmento sendo formado varia gradualmente, começando perto da superfície da peça e movendo-se em direção à face da ferramenta, com o processo de achatamento do segmento. Esta parte do ciclo envolvendo a movimento do segmento do cavaco na face da ferramenta é similar à porção de escorregamento do processo oscilatório de “*stick-slip*”, exceto que pouca força é requerida para empurrar o segmento.

O processo descrito possui grande influência na dinâmica de corte. Primeiro, a principal força de corte aumenta gradualmente durante o início do estágio da formação do segmento (isto flexiona gradualmente a ferramenta para fora da peça) e logo após esta força diminui de forma precipitada, assim que a falha por cisalhamento ocorre (isto alivia o carregamento na ferramenta permitindo o seu retorno rapidamente). O processo é repetido, levando as vibrações severas e possível fadiga da ferramenta. Segundo, dependendo da flexibilidade do sistema ferramenta-peça e máquina-ferramenta, eventos de vibrações (tais como o batimento da ferramenta) complexas podem ocorrer durante o corte.

(2) A deformação no segmento do cavaco no caso do titânio pode ser elucidada por métodos clássicos de plasticidade e pode ser comparado com a formação do cavaco contínuo. Considerando a FIGURA 2.16 que mostra esquematicamente o modo de deformação alternativo na usinagem. No momento que a ferramenta avança da posição 1 para 2, a camada original 1234 será transformada pela deformação na camada (a) 2365 também pelo processo do cisalhamento simples, levando a formação do cavaco contínuo, como pode ser descrito pelo modelo clássico de Merchant-Piispanen. Entretanto esta camada (1234) pode se transformar em um segmento apenas deslocado 237 com a linha 15 igual à linha 27 ou em um segmento com o deslocamento combinado com uma pequena quantidade de cisalhamento 2398. Contudo, para completar a formação do segmento na forma de 2398, uma intensa deformação (ou

banda adiabática) se desenvolve, começando do ponto 1 e propagando ao longo do caminho 12 e depois 23. A superfície cisalhada sofrerá um extensivo cisalhamento por laminação durante o deslocamento do próximo segmento e se transformará em um formato similar ao 2398. Deste modo, parte da deformação observada na FIGURA 2.12 deve ser interpretada de acordo com o contexto acima, e não como uma *deformação convencional secundária* ao longo da face da ferramenta como que ocorre na formação do cavaco contínuo.

FIGURA 2.16 – Diagrama esquemático mostrando os modos de deformação alternativo na usinagem (KOMANDURI & TURKOVICH, 1981).

(3) Uma característica distinta do processo, é o desenvolvimento periódico de uma banda de cisalhamento concentrada de grande deformação acompanhada por uma falha por cisalhamento rápido devido à instabilidade plástica. O processo de deformação nesta banda de cisalhamento delgada é provavelmente um cisalhamento adiabático.

(4) Durante o achatamento do segmento do cavaco a superfície que falhou por cisalhamento quase não deslizou na face de saída da ferramenta. A superfície do cavaco que estava em contato com a ferramenta se tornou uma camada de alto cisalhamento (no lado do material da peça) removida do segmento anterior que falhou por cisalhamento.

(5) Em seus estudos, KOMANDURI & TURKOVICH (1981), observaram que o achatamento ocorre até que a superfície superior do segmento do cavaco se torne aproximadamente normal à face de saída da ferramenta.

(6) Quase não ocorre deformação na zona secundária de deformação ao longo da superfície de saída na usinagem da liga Ti-6Al-4V diferente da usinagem convencional de um material dúctil que origina um cavaco contínuo. Também foi observado que é necessária uma pressão mínima para que o segmento anterior desloque o cavaco já formado para o processo continuar. A partir deste ponto de vista, o processo de formação do cavaco é similar à formação do cavaco de ruptura (não contínuo). Portanto o desgaste de cratera que ocorre não é convencional, pois as forças de corte se concentram próximas à aresta de corte fazendo que o desgaste ocorra na ponta da ferramenta.

(7) Pelo balanço de energia obtido na energia de deformação plástica e a energia térmica resultante na zona primária de corte, é possível observar que a temperatura aumenta na nascente do segmento do cavaco e será moderada durante a formação da maior parte do segmento, isto devido às baixas deformações envolvidas durante a compressão do segmento. Entretanto, a temperatura aumenta na camada rompida por cisalhamento devido à deformação ser substancialmente maior nesta camada. Nas ligas de titânio, o calor gerado tende a se manter na superfície rompida por cisalhamento, e durante o processo de achatamento da segmentação do cavaco o calor é transferido para a ponta da ferramenta. Como não há movimento relativo entre a face da ferramenta e o segmento sendo formado, fortes danos químicos e térmicos podem ocorrer na ferramenta próxima à aresta de corte. Devido o escoamento ser de maneira análoga à trefilação, o material abaixo da camada de cisalhamento esfrega severamente a face de folga, produzindo alta temperatura na face de flanco e forte deformação da superfície usinada. Infelizmente, as altas temperaturas neste tipo de material ocorrem nas regiões mais críticas da ferramenta (ponta da ferramenta). Esta é provavelmente a principal razão para o rápido desgaste das ferramentas de corte quando se usina ligas de titânio nas mais diversas velocidades.

KOMANDURI & TURKOVICH (1981) sugerem que para usinar este tipo de material de forma econômica e em altas velocidades, deve-se diminuir o desgaste da ferramenta, por meio talvez da modificação das propriedades térmicas ou mecânicas deste tipo de material, para que se possa obter um cavaco contínuo ao invés das largas

bandas de cisalhamento adiabáticas. Deste modo provavelmente se reduzirão: as vibrações, a temperatura da interface ferramenta-cavaco e o desgaste da ferramenta. Outro caminho seria favorecer o movimento relativo entre o segmento que está sendo formado e a ferramenta (usinagem de ferramenta rotativa).

2.7.1 Zona primária de corte do Titânio e suas Ligas

A FIGURA 2.17 mostra esquematicamente o modelo de formação do cavaco comparando a usinagem de um aço e o do titânio.

FIGURA 2.17 – Modelo da formação do cavaco (a) aço (b) titânio (BOSTON et al. apud KOMANDURI, 1982)

É presumível nesta figura, que o autor tenta enfatizar que para uma mesma espessura de corte, a espessura de corte nominal do cavaco do titânio é menor que a do aço. Deve-se lembrar como já foi dito anteriormente, que isto não ocorre devido ao alto ângulo de cisalhamento como é atribuído erroneamente por alguns investigadores, mas por causa do fato que pouca deformação é envolvida na formação volumétrica do segmento do cavaco. Também é um pouco enganoso representar o processo de formação do cavaco como mostra a FIGURA 2.17 (b), pois quando se usina titânio, a formação do cavaco é periódica com um intenso cisalhamento localizado, separado

pelos segmentos do material no qual a deformação é muito pequena (KOMANDURI, 1982).

Para KOMANDURI (1982), o efeito do amolecimento térmico em altas temperaturas na deformação plástica é característica da maioria dos metais, mas no caso da usinagem do titânio há um outro fator envolvido. O titânio (CP) em temperatura ambiente possui estrutura cristalina hexagonal compacta (hc) com um limitado número de sistemas de escorregamento nos planos ortorrômnicos. Com o aumento da temperatura, o titânio (CP) sofre uma transformação alotrópica de α (hexagonal compacta (hc)) para β (cúbico de corpo centrado (ccc)). A estrutura ccc possui mais sistemas de escorregamento e conseqüentemente isto permite maior deformação localizada. Com baixas propriedades térmicas e deformação localizada em uma banda delgada na zona primária, todo o calor gerado se concentrará nesta banda, e por esta razão a temperatura local aumentará atingindo altos valores. Se a temperatura aumentar o suficiente para ocorrer a transformação alotrópica, os sistemas de escorregamento irão aumentar consideravelmente, causando no caso do torneamento um calor adicional. Este mecanismo pode tornar localizado o cisalhamento e causar a instabilidade na zona primária. Mudanças na estrutura cristalina poderão resultar também, em mudanças no volume provocando microtrincamento.

2.7.2 Zona secundária de corte do Titânio e suas Ligas

A intensa região de cisalhamento na parte de baixo do cavaco perto da face da ferramenta, não ocorre devido à deformação secundária convencional, como é encontrada no caso da formação do cavaco contínuo. Na verdade, o cavaco é formado pelo intenso cisalhamento em uma banda delgada, originada durante o estágio de deslocamento do segmento sendo formado, e de outro segmento anteriormente já formado. Quando isso acontece o segmento formado desliza sobre a face da ferramenta. No entanto, não existe a aderência do cavaco na face da ferramenta e nem cisalhamento considerável entre o cavaco e a ferramenta. Consequentemente a chamada “zona secundária de corte” do cavaco na face da ferramenta aparece de forma relativamente insignificante e pode ser omitida no caso da usinagem das ligas de titânio (KOMANDURI, 1982).

Freemam apud MACHADO & WALLBANK (1990) confirmou a presença de uma fina camada chamada “zona de escoamento” (também chamada de “zona de ataque”) entre o cavaco e a ferramenta e ao comparar a estrutura nesta zona e na seção transversal do cavaco, ele concluiu que na zona secundária de corte ocorre o mecanismo de cisalhamento termoplástico catastrófico.

Este fenômeno foi observado também por BAYOUMI & XIE (1995) este autor explica que isto pode ter acontecido devido à alta pressão e temperatura na interface cavaco-ferramenta, causando uma condição similar de severa deformação, nesta fina camada na base do cavaco.

2.7.3 “Espessura do cavaco do titânio” X “Ângulo de cisalhamento”

Visto que os cavacos do titânio são mais finos, para uma mesma espessura de cavaco não deformada, a razão para a espessura do cavaco calculada para a formação do cavaco contínuo convencional será alto r ($r=t/t_c$, no qual t_c é a espessura do cavaco e t é a espessura não deformada do cavaco). Uma razão de espessura alta, no processo convencional de formação do cavaco contínuo, significa um alto ângulo de cisalhamento ϕ (próximo de 45° quando $r = 1$) e alta velocidade do cavaco na face da ferramenta (visto que $V_{ca} = V_c \cdot r$ onde V_c é a velocidade de corte e V_{ca} é a velocidade do cavaco) (KOMANDURI 1982).

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{r \cos \gamma}{1 - r \sin \gamma} \right)$$

A verdadeira razão porque os cavacos do titânio são mais finos que os do aço é que os segmentos individuais no cavaco do titânio são pouco deformados e são formados predominantemente pelo gradual achatamento de uma meia cunha quando ocorre o avanço da ferramenta. Consequentemente, não se espera um cavaco fino, como no caso da usinagem do aço onde o cisalhamento concentrado sujeita o cavaco às deformações consideráveis (deformações da ordem de 2 ou mais) tornando o cavaco

espesso com baixo ângulo de cisalhamento e baixa velocidade do cavaco (KOMANDURI, 1982).

KOMANDURI (1982) diz que quando se usina ligas de titânio ocorre um paradoxo entre a prática e a teoria.

Geralmente na formação do cavaco contínuo, a razão da espessura do cavaco r é uma boa medida da eficiência da usinagem. Deste modo, um operador de máquina ferramenta experiente pode dizer por exame superficial dos cavacos em diferentes condições de corte como as variáveis de corte podem ser mudadas para otimizar o processo de corte melhorando a eficiência da usinagem. Por exemplo: aumento no ângulo de saída, aumento na velocidade de corte ou melhoria nas condições de atrito na face da ferramenta (melhor lubrificação) irá resultar em alto ângulo de cisalhamento, baixa deformação do cavaco (menor deformação na zona primária de corte), decréscimo na magnitude das forças de corte e melhoria no acabamento superficial da peça (KOMANDURI, 1982).

Por estes motivos, deve-se otimizar a geometria de sua ferramenta e as condições de corte para se obter maior ângulo de cisalhamento possível. Se tais valores de ângulo de cisalhamento fossem realmente obtidos na usinagem do titânio e suas ligas, este material não seria constatado difícil de usinar, pois o ângulo de cisalhamento obtido é muito menor do que os pesquisadores afirmam, ou seja, em torno de $\frac{1}{4}$ do valor afirmado por estes pesquisadores, ou seja, aproximadamente 12° .

Uma explicação similar pode ser oferecida pela tensão residual elástica na superfície usinada quando se usina ligas de titânio. Por esta razão, fica claro que ambos os parâmetros, ângulo de cisalhamento e razão de corte, são talvez escolhas inadequadas na descrição do processo grosseiro da deformação plástica não homogênea (KOMANDURI, 1982).

Altos ângulos de cisalhamento podem causar alta energia de atrito na face da ferramenta, mas baseado em estudos detalhados KOMANDURI (1982), descobriu que a energia de atrito entre a face da ferramenta e o cavaco mostrou ser relativamente insignificante devido à deformação nas bandas de cisalhamento catastrófico. O atrito entre o titânio e a face da ferramenta foi relatado baixo devido à transferência do titânio para a face da ferramenta e a formação de uma camada fina de óxido que agia como um lubrificante.

Portanto, na ausência da formação de um cavaco contínuo, surge a necessidade de parâmetros apropriados para caracterizar o processo e possibilitar que o operador faça um julgamento similar quando se usinar ligas de titânio (KOMANDURI, 1982).

A FIGURA 2.18 (a) mostra o estágio inicial onde o segmento I está sendo formado sob pressão exercida pela face da ferramenta no plano mais fraco a , e o cisalhamento S_1 inicia no plano de cisalhamento principal. Esta intensa zona fina de cisalhamento é designada por ABCD. Nota-se que o segmento II (segmento a ser formado) sofre pouca deformação plástica. A FIGURA 2.18 (b) mostra o estágio intermediário no qual a ferramenta de corte moveu de A' para A . O comprimento do cisalhamento cresce de AB (FIGURA 2.18 (a)) para AC (FIGURA 2.18 (b)). Também ocorre a rotação da zona de cisalhamento devido ao deslocamento do segmento, e a deformação do segmento II ocorre pelo movimento da ferramenta de corte. Esta deformação é causada pelo cisalhamento S_2 no plano mais fraco b fazendo com que esta parte do segmento do cavaco possua seu próprio ângulo de cisalhamento ϕ' . A FIGURA 2.18 (c) mostra o estágio final onde o segmento I foi cisalhado ao longo do plano principal para a sua máxima extensão e o plano mais fraco do segmento II atingiu sua posição extrema. Logo após, o plano mais fraco irá mudar de a para a' como se pode observar na FIGURA 2.18 (c) e novamente irá começar um novo plano de cisalhamento a' . Neste instante o comprimento da zona de cisalhamento no plano de cisalhamento principal do cavaco formado atingiu seu maior valor $A'C$ ou ABC (FIGURA 2.18 (c)) (HOU & KOMANDURI, 1995).

FIGURA 2.18 - Esquema demonstrativo das várias etapas do cisalhamento localizado na usinagem do titânio e suas ligas (HOU & KOMANDURI, 1995).

2.7.4 Prováveis razões para a elevação de temperatura quando se usina ligas de titânio

Ligas de titânio estão entre os materiais difíceis de usar exceto em baixas velocidades de corte. A maior dificuldade vem das altas temperaturas que a ferramenta sofre em sua ponta sob condições que são normais para a maioria dos materiais de comparável resistência e dureza. Consequentemente, o desgaste da ferramenta se torna rápido, e por esta razão limita a produtividade (KOMANDURI, 1982).

Na usinagem o calor é gerado em três zonas FIGURA 2.19: (1) zona primária de cisalhamento; (2) zona secundária de cisalhamento (interface cavaco-ferramenta); (3) interface entre o flanco (face de folga da ferramenta) e a superfície usinada.

FIGURA 2.19 – Energia distribuída (calor gerado e calor dissipado) na usinagem do aço (KOMANDURI, 1982).

Na formação convencional do cavaco contínuo, as energias U_{ca} , U_f e U_p por unidade de volume do metal removido que vai para o cavaco, ferramenta e peça respectivamente são funções das energias específicas do processo de corte (energia de cisalhamento U_{cm} por unidade de volume e energia de atrito U_a por unidade de volume na face de saída) e frações R_1 e R_2 do calor indo para o cavaco gerado pelo plano de cisalhamento e da interface cavaco-ferramenta respectivamente, então:

$$U_{ca} = R_1 U_{cm} + R_2 U_a \quad (2.1)$$

$$U_f = (1 - R_2) U_a \quad (2.2)$$

$$U_p = (1 - R_1) U_{cm} \quad (2.3)$$

Na equação 2.2 é evidente que não há contribuição de calor oriundo da zona primária de corte ou devido ao atrito entre o flanco e a superfície usinada que vai para a ferramenta. Apenas uma porção de calor gerado na interface cavaco-ferramenta devido

à zona secundária de cisalhamento vai para a ferramenta. Isto significa que apenas uma pequena fração do total de calor gerado no processo de usinagem vai realmente para a ferramenta explicando porque as ferramentas perseveram tanto tempo na usinagem dos aços e a importância do atrito na face da ferramenta na usinagem convencional (KOMANDURI, 1982).

Na usinagem do aço, foi verificado que a maioria (por volta de 75%) do calor é gerado na zona primária de cisalhamento, seguido por uma significativa porção (por volta de 20%) na zona secundária de cisalhamento, apenas uma pequena porção (5%) na interface entre o flanco e a superfície usinada (FIGURA 2.19).

Por volta de 80% da soma do calor gerado, é conduzido pelo cavaco e pequenas frações (10%) são conduzidas para a ferramenta e a superfície usinada.

Portanto quando se leva em conta (1) a alta deformação de cisalhamento periódica na zona primária de cisalhamento, (2) o contato íntimo da superfície rompida por cisalhamento com a face da ferramenta durante o deslocamento do segmento que se segue, (3) o intenso calor conduzido para a ferramenta devido ao atrito entre o flanco e a superfície usinada, (4) a relativa pequena quantia de calor levada pelo cavaco, então pode-se estimar porque o titânio e suas ligas são difíceis de serem usinados. Assim, não fica difícil contabilizar as altas temperaturas na ponta da ferramenta quando se usina ligas de titânio, e é claro a alta reatividade química com a maioria dos materiais que em conjunto com o contato íntimo da face da ferramenta com a superfície que falhou por cisalhamento na zona primária de corte, provocam o rápido desgaste da ponta das ferramentas (KOMANDURI, 1982).

NARUTAKI & MURAKOSHI (1983) usinaram com uma ferramenta de carbeto de tungstênio K10 e mostraram que a temperatura em função da velocidade de corte para 2 amostras de ligas de titânio (Ti-6Al-4V e Ti-5Al-2,5Sn) ultrapassou 1000 K mesmo em baixas velocidades de corte (1 m/s) e quando a usinagem era realizada com $V_c=3,33$ m/s a temperatura chegou à 1350 K que representa 250 K a mais que a temperatura de usinagem do aço carbono 1045 usinado sob as mesmas condições de corte.

2.7.5 A natureza dúctil dos cavacos de titânio

KOMANDURI (1982) diz que o grau de ductibilidade dos cavacos na usinagem do titânio é importante não apenas do ponto de vista de sua classificação, mas também concerne potencial função no controle do cavaco em espiral e qualquer dano na superfície usinada como consequência. Na usinagem do titânio e suas ligas, a questão dos cavacos serem ou não dúcteis se torna pertinente, pois a sua ductibilidade oferece indícios do mecanismo de sua formação.

Os cavacos do titânio não são tenazes. Eles possuem baixa resistência à flexão devido à constituição dos segmentos dos cavacos permanecerem intactos e delimitados pelas regiões de intensas bandas de cisalhamento localizadas. Quando se dobra os cavacos de titânio eles se quebram nestas junções (KOMANDURI, 1982).

Visto que o mecanismo básico de formação do cavaco é o mesmo para todas as velocidades de corte quando se usina ligas de titânio (resultados observados também por GENTE & HOFFMEISTER, (2001) no corte do Ti-6Al-4V e SHEIKH-AHMAD & BAILEY, (1997) no corte do Ti (CP)). Então, não se deve esperar nenhuma transição na forma do cavaco, diferente do caso da usinagem do aço que quando se aumentando a velocidade de corte os cavacos descontínuos se tornam contínuos, devido ao fato que tremenda quantidade de calor gerado, torna o material dúctil (KOMANDURI, 1982).

A afirmação acima ficou constatada estar correta segundo SHEIKH-AHMAD & BAILEY, (1997) no corte do Ti (CP). Em seus experimentos o autor usinou Ti (CP) e cavacos com cisalhamento localizado ocorreram em toda a faixa de velocidade de corte que $V_c = 8,5 \times 10^{-5} - 3,2$ m/s, concluindo que não havia nenhuma transição de cavaco uniforme para cavaco com cisalhamento localizado. Além disso, este autor constatou também que quanto maior era a V_c mais uniforme era o formato serrilhado.

Entretanto, MACHADO & WALLBANK (1990) e BAYOUMI & XIE (1995) dizem o cisalhamento localizado não é criado em todas as condições de corte para o Ti-6Al-4V. A FIGURA 2.20 mostra uma cavaco com deformação contínua do Ti-6Al-4V que foi cortado com baixa velocidade de corte e baixo avanço.

FIGURA 2.20 – Cavaco com deformação contínua do Ti-6Al-4V (XIE, BAYOUMI & ZBIB, 1995).

Segundo estes autores, as condições de corte crítico precisam ser alcançadas para se obter o cavaco com cisalhamento localizado. Estes valores críticos de corte variam para diferentes combinações de materiais e de ferramenta-peça. Resultados experimentais mostram que a velocidade de corte e o avanço possuem um efeito significativo no início da instabilidade do cisalhamento dos cavacos. Por esta razão, é razoável usar a velocidade de corte e o avanço como parâmetros para descrever e analisar as condições nos quais cavacos serrilhados de cisalhamento irão ocorrer. A TABELA 2.4 mostra os valores críticos para diferentes materiais. Acredita-se que a razão para este resultado ocorrer é devido ao início do cisalhamento localizado estar principalmente relacionado com o amolecimento térmico do material na zona de cisalhamento, portanto diferentes materiais possuem capacidades inerentes de encruamento, consequentemente as condições de corte precisam exceder estes valores.

TABELA 2.4 - Condições críticas de corte para formar cavaco de cisalhamento localizado (BAYOUMI & XIE, 1995).

Material da peça	Condições de carregamento crítico (V_{cf}) _c
Ti-6Al-4V	0,004
Aço inoxidável AISI 304	0,0054
Aço AISI 4340	0,006
Aço AISI 1020	0,097

2.8 Influência das Condições de Corte no Cavaco do Titânio

A teoria de Komanduri diz que o cisalhamento catastrófico no cavaco do titânio ocorre em todas as faixas de velocidade e é independente da geometria da ferramenta, entretanto esta teoria não explica porque a morfologia do cavaco é diferente para diferentes velocidades de corte (HUA & SHIVPURI, 2004).

BAYOUMI & XIE (1995) concluíram que a velocidade de corte foi o fator dominante na influência no ponto de inicial dos cavacos de cisalhamento. A velocidade de corte e o avanço também afetavam as configurações das bandas de cisalhamento.

OBIKAWA & USUI (1996) diz que no caso dos metais com baixa ductibilidade tais como as ligas de titânio, trincas aparecem como um efeito na descontinuidade que resultam na banda de cisalhamento localizada na zona primária de corte.

SHIVPURI et al. (2002) e HUA & SHIVPURI (2004) apresentam uma nova interpretação para a segmentação do cavaco do Ti-6Al-4V baseado na simulação de elementos finitos, no qual, estes autores comparam diferentes velocidades de corte com os diferentes locais de início da propagação de uma trinca na zona primária de corte. A FIGURA 2.21 mostra uma comparação da morfologia dos cavacos para resultados experimentais e simulados por elementos finitos.

FIGURA 2.21 - Morfologia do cavaco (a) resultados experimentais (b) resultados simulados (HUA & SHIVPURI, 2004).

SHIVPURI et al. (2002) em seus experimentos notou que quando se aumentava a velocidade de corte a morfologia do cavaco mudava. Na FIGURA 2.21 nota-se que quando se aumenta a velocidade de corte, a fratura no segmento do cavaco gradualmente diminui e o escoamento localizado e a deformação entre o ligamento do cavaco gradualmente aumentam resultando em mudanças na morfologia do cavaco. Isto pode ter ocorrido devido à transformação da fase α para a fase mais dúctil β demonstrando um grande escoamento dúctil.

Para mostrar a interação entre a fratura, a tendência ao amolecimento e a mudança de fase do material, SHIVPURI et al. (2002) conduziu simulações por meio de elementos finitos para diferentes velocidades de corte e fixou a profundidade de usinagem e o avanço.

Quando o corte é realizado a uma velocidade de corte baixa ($V_c = 1,2$ m/min) a fratura inicia na zona primária de corte e se propaga em direção à superfície da ferramenta (FIGURA 2.22). Os segmentos do cavaco são separados uns dos outros (surgimento de trinca) na face de saída da ferramenta e o material na superfície livre do cavaco ainda continua unido, resultando em um cavaco descontínuo. A máxima deformação e temperatura ocorrem próximas à ponta da ferramenta. A temperatura na zona primária e secundária de cisalhamento está abaixo da transição β indicando que não há transformação de fase durante a sua formação (SHIVPURI et al., 2002).

FIGURA 2.22 – Predição realizado por métodos de elementos finitos da (a)morfologia do cavaco (b) deformação, e (c) distribuição da temperatura, na usinagem do Ti-6Al-4V a uma velocidade de corte de 1,2m/min e avanço de 0,127 mm/rev (SHIVPURI et al., 2002).

Na FIGURA 2.23 é possível observar que em altas velocidades de corte (600 m/min), a fratura ou trinca, inicia na zona primária de corte e propaga em direção a superfície livre do cavaco. Isto resulta na separação dos segmentos dos cavacos na superfície livre, enquanto um segmento continua conectado ao outro na face de saída da ferramenta (SHIVPURI et al., 2002).

FIGURA 2.23 – Elementos finitos da (a)morfologia do cavaco (b) deformação, e (c) distribuição da temperatura, na usinagem do Ti-6Al-4V a uma velocidade de corte de 600m/min e avanço de 0,127 mm/rev (SHIVPURI et al., 2002).

Com o aumento da velocidade de corte para 600m/min a temperatura na zona secundária de deformação excedeu a temperatura de transformação β . Isto pode ter resultado em maior microestrutura β no ligamento entre os segmentos do cavaco. Por esta razão a ductibilidade nesta zona localizada aumentou e este lado do cavaco pôde se deformar sem fratura. Por este motivo a base do cavaco é maior em velocidades de corte altas em relação às velocidades de corte baixas. Deve-se notar também que as deformações na zona primária de corte são similares para as duas velocidades de corte, mas na zona secundária as deformações são significativamente diferentes, mostrando alto cisalhamento concentrado em altas velocidades de corte (SHIVPURI et al., 2002).

Outro fator que é alterado de acordo com a V_c são as frequências das bandas de cisalhamento f (eq. 2.4) que são definidas como o número de segmentos produzidos por unidade de tempo (MOLINARI, MUSQUAR & SUTTER, 2002).

$$f = \frac{\text{Número de segmentos}}{\text{Tempo de corte}} \quad (2.4)$$

Este parâmetro é muito útil para o propósito do controle do cavaco ou para um dispositivo de automação das operações de usinagem. A FIGURA 2.24 mostra os efeitos das condições de corte sobre as distâncias entre as bandas de cisalhamento para a liga Ti-6Al-4V. Pode-se notar que as distâncias entre as bandas de cisalhamento aumentam com o aumento do avanço ou quando a velocidade de corte diminui. A taxa de avanço possui um efeito mais significativo do que a velocidade de corte quando se refere nas distâncias entre as bandas de cisalhamento. Resultados similares foram encontrados no aço inoxidável AISI 304 (BAYOUMI & XIE, 1995).

FIGURA 2.24 – Efeito das condições de corte na distância entre as bandas de cisalhamento do Ti-6Al-4V (BAYOUMI & XIE, 1995).

MOLINARI, MUSQUAR & SUTTER (2002) notaram um cisalhamento adiabático mais intenso para velocidades de corte ≥ 12 m/s.

A FIGURA 2.25 mostra um diagrama log-log da frequência de segmentação do cavaco em função da velocidade de corte:

FIGURA 2.25 - Frequência de segmentação f em função da velocidade de corte com $\alpha = 0$ do Ti-6Al-4V (MOLINARI, MUSQUAR & SUTTER, 2002).

2.9 Integridade Superficial

O titânio é um material geralmente usado em partes que requerem grande confiabilidade e por esta razão a rugosidade superficial e qualquer outro dano deve ser controlado (MACHADO & WALLBANK, 1990).

Para GROOVER (2001), estudar a integridade superficial é importante por uma série de fatores:

1. Razões estéticas: Superfícies polidas, livres de arranhões e falhas são preferíveis para impressionar o consumidor;
2. Aspecto de segurança;
3. Atrito;
4. Propriedades mecânicas e físicas: Uma falha ou fenda pode ser um concentrador de tensão;
5. Superfícies polidas obtêm um melhor contato elétrico;

Integridade superficial deve ser empregada nos processos de manufatura onde as peças a serem utilizadas serão altamente solicitadas envolvendo altos custos, previsão do tempo de vida útil do componente, e segurar a vida humana (GROOVER, 2001).

Carregamentos dinâmicos são os principais fatores para diversas estruturas modernas, e estes fatores são limitados pela característica estrutural dos materiais. Historicamente pode-se observar que a maior parte das falhas por fadiga começa a nuclear próxima da superfície do componente (GROOVER, 2001). Considerando a resistência à tensão com o componente oxidado, novamente identifica-se a superfície como a principal causa na determinação da suscetibilidade ao ataque da fadiga (FIELD & KAHLES, 1971).

FIELD, KAHLES & CAMMETT (1972) dizem que para aplicações mais críticas no qual são influenciadas pela integridade superficial, devem-se seguir os seguintes cuidados:

1. Conjunto de dados para a integridade superficial
 - a. Acabamento superficial
 - b. Macroestrutura
 - i. Macrotrincas
 - ii. Indicações de ataque químico
 - c. Microestrutura
 - i. Microtrincas
 - ii. Deformação plástica
 - iii. Transformação de fase
 - iv. Ataque intergranular
 - v. Saliências, cavidades, falhas
 - vi. Camadas fundidas
 - vii. Ataque químico selectivo
 - d. Microdureza
2. Teste de fadiga
3. Teste à tensão de corrosão
4. Tensões residuais

A TABELA 2.5 mostra uma lista de possíveis alterações e motivos que prejudicam a superfície.

TABELA 2.5 - Alterações Superficiais e subsuperficiais que definem a integridade superficial (ANSI, 1978).

Alteração ou dano	Descrição
Absorção	Impurezas são absorvidas e retidas nas camadas da superfície do material podendo causar fragilidade ou outras mudanças.
Diminuição dos elementos de liga	Elementos de liga podem ser retirados da camada superficial, possibilitando perda das propriedades do metal.
Trincas	Pequenas discordâncias na superfície ou abaixo, alteram a continuidade do material.
Crateras	Superfície áspera com cavidades pode ser causada por processos de usinagem com descarga elétrica e usinagem eletroquímica.
Dureza	Mudança da dureza na superfície devida ao encruamento.
Regiões afetadas por tratamento térmico	Regiões afetadas por energia térmica, normalmente encontram-se em regiões de operações de soldagem por fusão.
Inclusões	Pequenas partículas, diferentes do material base pode se aderir a este provocando descontinuidades.
Ataque intergranular	Ocorre devido às várias formas de reações químicas que atacam a superfície, corroendo e oxidando várias partes do material.
Deformação plástica	Mudança da microestrutura que ocorre na deformação do material resultando no encruamento.
Recristalização	Formação de novos grãos no encruamento do metal.
Metal depositado	Material que foi removido da superfície no estado fundido e depois unido antes da solidificação.
Metal resolidificado	Uma parcela de superfície é fundida e depois solidificada formando um novo material.
Tensão residual	Ocorre depois de o material ser processado
Ataque químico	Pode concentrar certo número de componentes no material base

A TABELA 2.6 mostra as várias mudanças superficiais e subsuperficiais atribuídas as diferentes formas de energia aplicadas na manufatura que serão detalhadas no decorrer desse trabalho.

TABELA 2.6 - Formas de energia aplicadas no processo de manufatura e possíveis resultados que podem alterar a superfície e a subsuperfície (GROOVER, 2001).

Formas de energia	Possíveis alterações ou danos
Mecânica	<p>Tensões residuais na camada subsuperficial</p> <p>Trincas: Microscópicas e Macroscópicas</p> <p>Deformações Plásticas</p> <p>Falhas, dobras, ou sulcos</p> <p>Vazios ou inclusões introduzidos mecanicamente</p> <p>Variação na dureza (encruamento)</p>
Térmica	<p>Mudanças metalúrgicas (recristalização, mudança de fase na superfície mudança do tamanho de grão)</p> <p>Resolidificação do material</p> <p>Mudança na dureza</p>
Química	<p>Ataque intergranular</p> <p>Contaminação química</p> <p>Absorção de certos elementos tais como o H e o Cl na superfície do material</p> <p>Corrosão</p> <p>Tensão de corrosão</p> <p>Dissolução dos microconstituintes</p>
Elétrica	<p>Mudança na condutividade ou magnetismo</p> <p>Crateras resultantes de pequenos curtos circuitos resultadas de técnicas elétricas</p>

2.9.1 Possíveis alterações ou danos causados por energia mecânica – Alteração da dureza superficial e deformações plásticas.

Segundo TÖNSHOFF & BRINKSMEIER (1980), os processos de usinagem influenciam muito na dureza superficial. A microdureza superficial é extremamente importante para identificar a deformação plástica e encruamento em superfícies usinadas (FIELD, KAHLES & CAMMETT, 1972). Para a avaliação da integridade superficial esta propriedade torna-se essencial para avaliar a profundidade dos danos introduzidos por deformação plástica na camada superficial da peça.

Nos cortes de metais a deformação plástica ou encruamento, ocorre na peça antes do cisalhamento, devido à tensão radial de compressão. Em termos de discordâncias mecânicas, isto significa que o extensivo movimento e interação das discordâncias já ocorreram no seu interior produzindo estruturas celulares, e múltiplas planos de escorregamento nas superfícies da peça e do cavaco.

A deformação por compressão promove sistemas de escorregamento, devido ao início do estágio de deslizamento do plano de escorregamento (particularmente em materiais cúbicos de face centrada). O campo de tensão de compressão aplicado, rotaciona no momento em que o material se aproxima da ponta da ferramenta (FIGURA 2.26). Então, numerosos planos de escorregamento são ativados causando grande intersecção das discordâncias e o desenvolvimento de estruturas celulares de discordância (BLACK, 1979).

A formação de discordâncias na estrutura celular é relacionada ao processo de encruamento. O aumento na densidade das discordâncias devido ao processo de multiplicação das discordâncias diminui o “comprimento da malha” dos arranjos das células, qualquer que seja a sua geometria, e aumento nas tensões internas. As tensões internas impedem, por meio de interações elásticas, o desenvolvimento dos laços de discordâncias das fontes ativas (BLACK, 1979).

Em resumo, a deformação por compressão antes do cisalhamento, produz uma nova estrutura celular (que é o caso dos materiais conformados). Então a situação existe quando um modo de deformação (cisalhamento) segue um modo anterior (compressão) e as duas deformações operarem essencialmente em diferentes planos de escorregamento. Esta condição não é única para o corte dos metais (BLACK, 1979).

FIGURA 2.26 – Esquema do corte ortogonal nos metais mostrando que a deformação de compressão precede o processo de cisalhamento (BLACK, 1979).

Esse fenômeno pode ser entendido melhor através da FIGURA 2.27. A FIGURA 2.27 mostra a raiz de um cavaco de aço produzido através de uma parada rápida da ferramenta. Pode-se observar que a microdureza medida em vários pontos da foto mostra diferença. Essa diferença decorre do encruamento. Gerado pela interação entre a ferramenta e a peça. O resultado desse processo é o aumento da dureza da superfície. Como pode ser observado, a dureza nominal da peça é de cerca de $\sim 170 \text{ Kgf/mm}^2$ e aumenta para mais de 220 Kgf/mm^2 após a passagem da ferramenta.

FIGURA 2.27 - Resultados de microdureza mostrando os danos causados pelo encruamento durante a formação do cavaco. Usinagem de aço inoxidável austenítico ($V_c = 100$ m/min) (TRENT & WRIGHT, 2000).

2.9.2 Possíveis alterações ou danos causados por energia térmica – Mudanças metalúrgicas

A deformação na zona primária e secundária no caso da usinagem convencional pode ser estudada qualitativamente pelo exame metalúrgico na parte interna das seções longitudinais dos cavacos gerados. A intensa banda de cisalhamento observada entre quaisquer segmentos formados é na verdade formada entre o segmento sendo formado e outro anteriormente já obtido. Deste modo o cisalhamento intenso ocorre devido ao efeito combinado das tensões na zona primária com o progresso do deslocamento do cavaco sendo formado e o calor localizado em uma banda delgada (devido às baixas

propriedades térmicas), resultando no comportamento viscoso (grande escala de deformação) do material nesta região (KOMANDURI 1982).

A FIGURA 2.28 mostra o espectro de difração realizados por BAYOUMI & XIE (1995) da liga Ti-6Al-4V antes e depois do corte (corte realizado com ferramenta de metal duro com ângulo de saída de 8° e ângulo de folga de 7°). Comparando o espectro do cavaco com o espectro do material não cortado, pode-se observar que os picos correspondentes à estrutura β , (100), (110) e (200) desapareceram depois do corte. Isto indica que a transformação de fase não difusa que levou a perda da estrutura β ocorreu nos processos de formação das bandas de cisalhamento. Durante esta transformação de fase houve apenas mudanças no grão e não ocorreu nenhuma mudança na composição química.

FIGURA 2.28 - Espectro de difração de raio x do Ti-6Al-4V no cavaco e no material não cortado (BAYOUMI & XIE, 1995).

A FIGURA 2.29 (a) mostra a microestrutura α primária e a FIGURA 2.29(b) mostra a microestrutura α lenticular nos cavacos usinados.

FIGURA 2.29 - Ti-6Al-4V (a) Fase primária alfa com uma banda de cisalhamento (b) escoamento e separação do material ao longo da banda de cisalhamento (BAYOUMI & XIE 1995).

A temperatura de transição para fase β do Ti-6Al-4V é em torno de 1016 °C, por esta razão BAYOUMI & XIE (1995) concluem que a temperatura nos cavacos atingiram pelo menos 1016 °C. A refrigeração do cavaco que estava em alta temperatura junto com a alta pressão no processo de corte podem ter produzido a estrutura lenticular α (FIGURA 2.29 (b)) que oriunda da fase β , foi desenvolvida e nucleada.

BAYOUMI & XIE (1995) obtiveram em seus experimentos larguras da zona de cisalhamento dentro de uma faixa de 8 μm à 31 μm (FIGURA 2.29).

2.9.3 Possíveis alterações ou danos causados por energia mecânica – Alteração devido ao processo de manufatura.

TURKOVICH & FIELD (1981) diz que superfície imperfeita torna o material suscetível à fadiga. Os principais meios para se evitá-la seria impedindo os seguintes procedimentos:

- Tensão a fadiga é prejudicada com a presença de tensão residual, mas é melhorada com a presença de tensão de compressão;

- Em retificação de certos materiais como o titânio, micro trincas são facilmente produzidas, podendo esta nuclear para ocorrer falha por fadiga;
- Aresta postiça de corte pode formar pequenas fissuras quando esta é quebrada, conseqüentemente reduzindo a tensão à fadiga;

Os processos de manufatura determinam tanto o acabamento como a integridade superficial. Alguns processos são inerentemente capazes de produzir melhores superfícies que outros. Geralmente, para aperfeiçoar e obter as melhores superfícies, o aumento dos custos é inevitável. Isto ocorre porque, serão necessárias mais operações de corte, e conseqüentemente maior tempo para obter uma superfície perfeita. Processos em que realmente pode-se obter este tipo de acabamento são: polimento, lapidação e usinagem de precisão.

A superfície do titânio e suas ligas são facilmente danificadas durante as operações de usinagem. Os danos podem aparecer na forma de microtrincas, aresta postiça de corte, deformação plástica, zonas afetadas pelo calor e tensões residuais. Na prática, estes danos podem levar à queda da resistência a fadiga e da resistência à corrosão devido às tensões (KAHLES et al., 1985 e DONACHIE, 1988). A TABELA 2.7 mostra dados dos efeitos dos métodos de usinagem correlacionados com a resistência à fadiga do Ti-6Al-4V em comparação com um aço 4340.

TABELA 2.7 - Efeito dos métodos de usinagem relacionados com a resistência à fadiga (FIELD & KAHLES, 1971).

Ligas	Operação de Usinagem	Durabilidade (10 ⁷ Ciclos)
Aço 4340, 50 R _c	Retificação branda	102000
	Eletro polimento	90000
	Retificação abusiva	62000
Titânio Ti-6Al-4V, 32 R _c	Fresamento brando	70000
	Retificação branda	62000
	Fresamento químico	51000
	Fresamento abusivo	32000
	Retificação abusiva	13000

A TABELA 2.8 mostra o tipo de acabamento esperado para as várias operações em manufatura, além de indicar o impacto na integridade superficial.

TABELA 2.8 - Rugosidade da superfície e Integridade superficial produzida por vários processos de manufatura (GROOVER, 2001).

Processo	Processo	Tipo de superfície	(a) Distância da amostra e rugosidade média	(b) Integridade superficial
Usinagem	Torneamento	Bom	15-250(0.5-6)	Mecânica
	Serramento	Ruim	100-1000(3-25)	Mecânica
	Plainamento	Média	60-500(1.5-12)	Mecânica
	Mandrilamento	Média	60-250(1.5-6)	Mecânica
	Furação	Bom	15-250(0.5-6)	Mecânica

(a) Descrição da variação da rugosidade superficial, valores dados em micro polegadas e (micrômetro).

(b) Tipos de alterações das camadas devido às formas de energias descritas na TABELA 2.6.

2.9.4 Possíveis alterações ou danos causados por energia química - Absorção de certos elementos tais como o H e o Cl na superfície do material

Fluidos de corte usados na usinagem de titânio e suas ligas devem ser cuidadosamente selecionados, uma vez que íons de cloreto, sob certas circunstâncias, causam trincas devido à corrosão. Este fato foi observado nos laboratórios, ficando constatado que fluidos que continham cloretos e sulfetos estavam causando a fratura prematura nos ensaios de fadiga, portanto, fluidos que contenham estas substâncias devem ser evitados (DONACHIE, 1988; KAHLES et al., 1985).

2.9.5 Influência do material no processo de usinagem de ultraprecisão

KÖNIG et al. (1991) diz que o material a ser usinado tem grande impacto na qualidade superficial e, portanto não deve ser negligenciado na usinagem de ultraprecisão. A TABELA 2.9 mostra os efeitos primários específicos das estruturas das superfícies de materiais policristalinos. Estes efeitos são apresentados da seguinte forma:

1. **Estrutura degrau:** A deformação plástica em materiais como cobre e alumínio, que possuem estrutura cúbica de face centrada (CFC), será mais pronunciado na direção cristalográfica com menor módulo de elasticidade. Portanto, quando a ferramenta encontra-se em um grão com módulo de elasticidade maior, a recuperação elástica será maior, fazendo com que após a saída da ferramenta, o cristal recupere-se e retorne a uma posição topográfica diferente do grão vizinho, o qual possui estatisticamente, módulo de elasticidade diferente. O efeito disso seria evidenciado através de níveis diferenciados de deformações elásticas e plásticas, ou seja, os campos de tensões formados na região de contato entre a ponta da ferramenta e o grão seriam estatisticamente diferentes de um para outro. Diferenciais de tensões aliados ao fenômeno de relaxamento dessas tensões entre cada grão cristalino podem resultar em pequenas variações topográficas formando pequenos degraus entre cristais (da ordem de nm) na superfície, que afetam a qualidade superficial da peça. Portanto, o fator dominante para um bom acabamento superficial é a variável elástica (não uniformidade) e principalmente plástica do comportamento individual dos cristais de um material policristalino, ilustrados na TABELA 2.9, 1ª linha.

2. **Contorno de grão:** Os contornos de grão podem ser considerados como um outro fator de influência no acabamento de uma superfície usinada, por conterem impurezas decorrentes da fundição, que normalmente são depositadas durante o processo de solidificação do material. Todavia, este fenômeno conduz a diferentes propriedades elásticas entre o material de base e os contornos de grão, resultando na formação de estruturas com arestas retilíneas afiadas na superfície do material como mostra a TABELA 2.9, 2ª linha.

3. **Impurezas:** As impurezas não apenas podem se instalar nos contornos de grão, mas também dentro dos grãos. Além disso, partículas de carbetos ligadas a alguns materiais (por exemplo, silício em ligas de Al), se estabelecem forma fina distribuída ao longo da matriz. Estas partículas podem causar problemas sérios durante o processo de usinagem. A TABELA 2.9, 3ª linha mostra inclusões duras em uma matriz mole. A forma mais adequada para se evitar inclusões duras é usar ferramentas com ângulos de saídas mais negativos que removem facilmente estas inclusões da matriz ao invés de cortá-las o que pode ocasionar o riscamento e degradação da superfície.

4. **Planos de escorregamento:** Nos materiais policristalinos, cada cristal está aleatoriamente orientado e, por conseguinte, suas propriedades mecânicas variam de acordo com a orientação. Este fenômeno de alternância das propriedades pode afetar diversos aspectos da usinagem tais como as forças de corte, o mecanismo da formação do cavaco a partir do contorno do grão e por fim, o acabamento superficial, como exemplo pode-se citar o caso do cobre eletrolítico, livre de oxigênio (OF-Cu) (TABELA 2.9, 4ª linha). No entanto, não é possível correlacionar orientação cristalográfica com rugosidade superficial.

TABELA 2.9 - Efeitos específicos do material de superfícies em usinagem de ultraprecisão (KÖNIG et al., 1991).

	Efeito	Modelo	Estrutura geométrica
M A T E R I A L	1 - Estrutura de degrau de materiais policristalinos		Estrutura de degrau
	2 - Contornos de grão de materiais policristalinos		Estruturas lineares cujas direções são independentes do processo do material
	3 - Impurezas, contrações inclusões duras		Estruturas pontuais e estruturas lineares curtas na direção de corte
	4 - Planos de escorregamento		Estrutura linear no qual a direção dos planos é independente do processo

Capítulo 3 – Materiais e Metodologia

3.1 Materiais e Equipamentos Usados

3.1.1 Titânio (CP) e Ti-6Al-4V

O Titânio comercialmente puro Ti (CP) e uma liga de titânio Ti-6Al-4V foram usados no presente trabalho. O Ti (CP) possui estrutura cristalina do tipo alfa e tem como sua principal aplicação, o uso em ambientes em que as temperaturas são baixas ou em meios altamente corrosivos, pois em meios aquosos sua resistência à corrosão geralmente é superior a dos aços inoxidáveis na maioria dos ambientes (WANG, 2000; DONACHIE, 1988). Não é tratável termicamente e possui uma excelente soldabilidade. Análises realizadas por meio do EDX constataram que as amostras usadas nos experimentos continham 99,99% de Ti (CP).

A liga Ti-6Al-4V possui estrutura do tipo alfa-beta adquirida pela empresa *Ti Brasil Ltda*[®], sua escolha se deve por esta ser uma liga extensivamente usada na indústria aeroespacial. Esta liga apresenta boa combinação de propriedades que asseguram boas operações de trabalho em temperaturas em torno de 315-400 °C (EZUGWU et al., 2003).

A TABELA 3.1 mostra a análise química feita pelo fornecedor da liga Ti-6Al-4V (*Ti Brasil Ltda*[®]). Uma análise também foi realizada no EDX e os resultados foram similares.

TABELA 3.1 - Análise química da liga Ti-6Al-4V (Ti Brasil Ltda[®]).

Elementos	N	C	H	Fe	O ₂	Al	V	Ti	Y	Cr
Composição (% em massa)	0,003	0,007	27/30 (PPM)	0,1	0,11	5,83	3,89	Base	0,001	0

A TABELA 3.2 mostra as propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V testadas pelo fornecedor *Ti Brasil Ltda*[®].

TABELA 3.2 - Características mecânicas da liga Ti-6Al-4V (Ti Brasil).

Limite Elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Alongamento	Redução na área
937,68	834,25	20,8 %	49,1 %

3.1.2 Máquina-ferramenta usada nos ensaios de faceamento

A máquina-ferramenta empregada para os ensaios de corte foi a Geradora de Superfícies Anesféricas ASG 2500 (“Aspheric Surface Generator 2500”), da RANK PNEUMO[®] (atualmente Precitek Components[®]), (FIGURA 3.1). Trata-se de uma máquina-ferramenta especialmente projetada tanto para o torneamento como para a retificação de ultraprecisão. Esta máquina possui uma base de ferro fundido, termicamente livre de tensões, a qual é isolada de vibrações externas através de isoladores pneumáticos passivos montados cinematicamente numa estrutura de aço soldada. Os mancais do eixo-árvore são aerostáticos, de modo a conferir precisão de giro, rigidez axial e radial compatíveis com o nível de precisão a que o equipamento se propõe (10nm de precisão de posicionamento).

Para obter resoluções e acabamentos superficiais desta ordem de grandeza, um Controle Numérico Computadorizado (CNC) ALLEN BRADLEY série 8200[®] é usado para controlar simultaneamente os deslocamentos dos eixos X e Z da máquina. Neste ponto, vale a pena ressaltar que não existe superposição dos eixos, com o objetivo de se evitar a propagação dos erros de posicionamento. As posições dos eixos são monitoradas por transdutores interferométricos a laser, da HEWLETT-PACKARD[®], com realimentação ao controlador. Os deslocamentos dos carros da máquina são suportados por guias hidrostáticas. A fixação das peças a serem usinadas é realizada por meio da placa de vácuo (cerca de -70kPa). Esta máquina-ferramenta está instalada em uma sala semi-limpa, com controle de temperatura (20,0°C ±0,1) e umidade.

FIGURA 3.1 - Torno de ultraprecisão gerador de superfícies anesféricas ASG-2500, da RANK PNEUMO® (atualmente Precitek Components®).

3.1.3 Ferramentas usadas nos ensaios de faceamento

O projeto de ferramentas monocortantes de diamante deve ser tal a atender os requisitos necessários à usinagem de ultraprecisão. Atenção especial deve ser dada ao projeto e fabricação de ferramentas de corte, caso a afiação da ferramenta não seja garantida dificilmente haverá a possibilidade de se realizarem cortes com espessuras da ordem submicrométrica. As 3 ferramentas usadas nesse trabalho são todas de diamante monocristalino, uma fabricada pela empresa DIFER® DIAMANTES INDUSTRIAIS LTDA., outra pela CONTOUR FINE TOOLING® (USA) e por último, uma ferramenta de ponta seca da empresa DIAMANGEO®. Junto aos mancais aerostáticos, controle ultrapreciso de posicionamento e elevada rigidez, formam o conjunto de requisitos necessários ao torneamento de precisão para preservar a integridade superficial do titânio e sua liga.

As características destas ferramentas são listadas na TABELA 3.3.

TABELA 3.3 - Características geométricas das ferramentas de diamante monocristalino empregadas.

	Ferramentas		
Propriedades	DIFER[®]	CONTOUR[®] (N060NG)	DIAMANGEO[®]
Ângulo de saída γ (°)	0	-5	0
Ângulo de folga α (°)	5	12	5
Raio de ponta (mm)	2	1,508	Chanfro de 50 μm com inclinação de 2°
Desenho esquemático
Fotos das superfícies de saída das ferramentas

3.2 Procedimento Experimental

Nos itens abaixo foram listados os procedimentos tomados no Laboratório de Engenharia de Precisão da EESC-USP para a condução dos experimentos dessa dissertação.

3.2.1 Preparação das Amostras

Primeiramente foram preparados corpos de prova para obter as durezas dos materiais no estado polido. O polimento e o ataque químico foi feito de acordo com AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM), (1973) para dos materiais de Ti (CP) e da sua liga Ti-6Al-4V usou-se lixas na seqüência de 220, 320, 400, 600, 1200, e para o polimento usou-se alumina (Al_2O_3) diluída em água destilada com tamanhos de grãos de 0,3 μm e 0,05 μm respectivamente.

O ataque para revelar os grãos do titânio (CP) e sua liga Ti-6Al-4V foi realizado com Kroll que é uma substância composta por: 3ml de HF, 6ml de HNO_3 diluídos em 1000 ml de H_2O destilada (AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM), 1973). As amostras ficaram imersas nesta solução durante um período de tempo de 3-10 segundos.

Todas as amostras utilizadas nos experimentos (Ti (CP) e Ti-6Al-4V) foram montadas sobre suportes de alumínio, previamente faceados, e estes fixados a placa de vácuo do torno ASG2500. As superfícies das amostras foram pré-torneadas para a correção de eventuais erros de planicidade e paralelismo (FIGURA 3.2).

FIGURA 3.2 - Suporte de alumínio para auxiliar a fixação da amostra na placa de vácuo.

3.2.2 Torneamento com ferramenta de ponta única de diamante

As amostras de Ti (CP) e Ti-6Al-4V foram fixadas à placa de vácuo do torno ASG 2500 e o procedimento usado foi o torneamento de face variando-se as condições nos parâmetros de profundidade de usinagem e avanço, mostradas na TABELA 3.4. As condições de corte foram mais variadas para a ferramenta Contour[®], pois esta ferramenta possui melhor afiação da aresta de corte em relação às outras ferramentas que foram usadas para efeito de comparação dos resultados. O fluido refrigerante usado foi o ALKALISOL 900, direcionado para a zona de corte através de uma névoa pressurizada (~100ml/hora) e a rotação do eixo-árvore ficou mantida em 1000 rpm.

TABELA 3.4 - Parâmetros de corte usados nos ensaios de torneamento de face.

Ferramentas	Parâmetros de Corte	Ti (CP)	Ti-6Al-4V
CONTOUR FINE TOOLING [®] (USA)	Profundidades de usinagem (ap) (μm)	1, 5, 10, 15, 20	1, 5, 10, 15, 20
	Avanços (f) (μm/rev.)	5, 10, 15, 20	5, 10, 15, 20
DIFER DIAMANTES INDUSTRIAIS [®] LTDA	Profundidades de usinagem (ap) (μm)	5, 10	5, 10, 15, 20, 25
	Avanços (f) (μm/rev.)	5, 10	5, 10, 15, 20, 25
DIAMANGEO [®]	Profundidades de usinagem (ap) (μm)	5	5
	Avanços (f) (μm/rev.)	5, 10, 15, 20	5, 10, 15, 20

3.2.3 Técnicas para as análises da integridade superficial

As análises das peças foram feitas com o objetivo de avaliar de forma qualitativa e quantitativa os acabamentos superficiais das peças em função dos parâmetros de corte, avaliar os tipos de danos encontrados após a usinagem (encruamento), procurar explicar as causas destes, determinar parâmetros críticos relacionados ao processo, como espessura máxima de corte, encontrar condições de usinagem apropriadas para o corte do Ti (CP) e do Ti-6Al-4V e avaliar o comportamento desses materiais, com respeito à rugosidade obtida relacionando com os mecanismos de formação do cavaco. As principais técnicas usados nesse trabalho foram:

3.2.3.1 Microscopia de força Atômica

A Microscopia de Força Atômica (MFA) tem como principais vantagens, quando comparadas ao MEV, a análise morfológica estrutural de materiais, maior resolução, imagem 3-D, a não necessidade de recobrimento condutivo, permite quantificação direta da rugosidade da amostra, permite medida de propriedades mecânicas de material analisado em escala nanométrica, entre outras. A viga em balanço (*cantiléver*) e a agulha são os elementos sensores do microscópio, com a agulha mapeando a amostra e a viga em balanço (*cantiléver*) medindo a força de interação entre a amostra e a agulha (SILVA, 2003). O microscópio empregado foi um modelo Nanoscope IIIa, da DIGITAL INSTRUMENTS®, pertencente ao Instituto de Física de São Carlos. Foi empregada uma viga em balanço de nitreto de silício com ângulo de 50-60° e raio de ponta de 15-20nm, constante de mola de aproximadamente 0,06N/m e modo de contato convencional, com força de contato de 10-100 nN. Neste trabalho o MFA foi usado para verificar a profundidade de endentação das amostras.

3.2.3.2 Microscopia Óptica

A Microscopia Óptica foi usada para a análise da microtopografia da superfície, revelando o estado das superfícies torneadas e polidas do Ti (CP) e do Ti-6Al-4V, aspectos qualitativos do material, assim como avaliar o desempenho da ferramenta de diamante.

3.2.3.3 Ensaios de Microdureza

Ensaios de endentação são usados extensivamente para caracterizar as propriedades plásticas dos sólidos. Historicamente, um dos primeiros objetivos dos testes de endentação foi para estimar o campo de tensão por meio de medidas de dureza, definido como o carregamento do endentador dividido pela área resultante da impressão (eq. (3.1)). O endentador pode ser “afiado”, como Knoop e Vickers, ou “cego”, como Brinell (esfera de aço). A dureza é obtida por meio da seguinte relação:

$$H = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

Onde H é a dureza F é a carga aplicada e A é a área.

A técnica de microendentação foi originalmente desenvolvida para estudos das propriedades mecânicas e espessura de coberturas finas nos substratos dos materiais. Devido a sua alta resolução em caracterizar perfis de profundidade em superfícies, este método atualmente se tornou extremamente útil na avaliação de superfícies usinadas em usinagem de precisão e ultraprecisão. O instrumento de microendentação pode ser usado em qualquer material que não requer nenhum isolamento especial tal como vácuo (BRINKSMEIER, 1989). Cuidados devem ser tomados a fim de se evitar distúrbios térmicos e vibratórios no aparelho.

Testes de micro durezas têm como objetivo proporcionar um método efetivo de caracterizar o fluxo de material em pequenas escalas (BEGLEY & HUTSHINSON,

1998). Experimentos com ensaios de dureza na dimensão de micro- e nano-endentação são extensivamente usados para determinar as características em micro dimensões. Já é sabido que testes de microdureza são significativamente melhores que os de macro dureza. Nix apud BEGLEY & HUTSHINSON (1998), prediz que a micro dureza em diversos materiais é correlacionada linearmente com a raiz quadrada do inverso da profundidade da endentação (YUAN & CHEN, 2001).

O micro endentador Vickers é uma técnica de dureza no qual baixo carregamento é aplicado. A profundidade de endentação é normalmente em escala sub-micrométrica o que faz com que este método seja classificando em quase não destrutivo (BRINKSMEIER, 1989).

A FIGURA 3.3 mostra um esquema do micro endentador de diamante Vickers que será usado neste trabalho. Durante o ciclo de carregamento, o endentador começa um escoamento plástico e introduz uma zona de deformação irreversível.

FIGURA 3.3 - Micro endentador Vickers de diamante usado neste trabalho, onde a é o raio de contato do endentador, d é a diagonal da medida completa da amostra e p é a profundidade da endentação.

Para esse ensaio usou-se um micro-durômetro BUEHLER® Micromet III Digital, empregado para realizar testes de microendentação Vickers no qual um endentador de diamante piramidal com 136° de ângulo de abertura foi pressionado durante um ciclo de 15 segundos de carregamento 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 com o intuito de determinar certas propriedades do material, tais como: sua dureza em diversos estados (usinado e polido) e o nível de encruamento dos materiais.

3.2.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.)

A Microscopia Eletrônica de Varredura é uma das formas que nos permite observar e caracterizar a integridade de materiais heterogêneos orgânicos e inorgânicos, e superfícies numa escala local. Neste tipo de instrumento a área a ser examinada ou o micro - volume a ser analisado é irradiado com um feixe de elétrons focado numa área específica, o qual pode ser estático ou em movimento rápido através da superfície do espécime. Os sinais produzidos quando o feixe de elétrons interfere na superfície do espécime são obtidos de volumes específicos de emissão dentro de um corpo de prova e podem ser usados para examinar algumas características desse corpo de prova (composição, topografia da superfície, cristalografia, etc.) (GOLDSTEIN et al., 1992).

O Microscópio Eletrônico de Varredura (M.E.V.) é um dos instrumentos mais versáteis para a avaliação e análise das características microestruturais de objetos sólidos. A principal razão para o M.E.V. ser grandemente usado é a alta resolução que se obtém mesmo quando se examinam objetos grandes; valores na ordem de 2 a 5 nm. Uma outra característica importante do M.E.V. é a aparência tri-dimensional da imagem do espécime estudado, um resultado direto da grande profundidade de campo de atuação do feixe de elétrons (GOLDSTEIN J.I. et al, 1992). No microscópio de varredura o feixe é empregado diretamente sobre a amostra. M.E.V. pode produzir aumentos da ordem de 20x até 50000x promovendo uma larga profundidade de campo que nenhum microscópio óptico pode obter (FIELD, KAHLES & CAMMETT, 1972).

Neste trabalho o M.E.V. auxiliou na caracterização das superfícies usinadas e no estudo de cavacos de Ti (CP) e Ti-6Al-4V provenientes do torneamento com ferramenta de ponta única de diamante para observar suas dimensões, morfologias e as bandas de cisalhamento adiabáticas. As amostras para a observação foram preparadas com os cavacos coletados no momento da usinagem. Não foi necessário fazer a metalização das amostras.

3.2.3.5 Rugosidade Superficial

Os parâmetros escolhidos para avaliar o acabamento superficial no trabalho presente foram:

- **A rugosidade de pico-a-vale (Rt):** pois a altura relativa da microtopografia é mais representativa para o acabamento superficial e este é usado em componentes sujeitos a alta tensão, pois qualquer pico-vale de grande dimensão pode propagar uma trinca por fadiga além de que alguns picos grandes podem também ser penetrados por filmes de óleos lubrificantes aumentando o desgaste, acumulando fragmentos e danificando superfícies de deslizamento. Em uma pesquisa realizada pelo CIRP com 284 indústrias em 18 países, mostrou que este parâmetro é usado por 40% das companhias (DE CHIFFRE et al., 2000)
- **A rugosidade aritmética (Ra):** pois este é um parâmetro de controle, ou seja, se o valor de Ra muda pode-se concluir que o controle do processo mudou (ex: avanço, velocidade de corte, desgaste da aresta de corte, lubrificante de corte, etc.), é também essencial quando se precisa de parâmetros estáveis, pois este não é influenciado por acontecimentos casuais, falsos picos ou arranhões sendo o processo mais usado na indústria manufatureira além de ser disponível em equipamentos simples e de baixo custo (TAYLOR HOBSON, 2000). Em uma pesquisa realizada pelo CIRP com 284 indústrias em 18 países, mostrou que este parâmetro é usado por 92% das companhias (DE CHIFFRE et al., 2000).

Os parâmetros 3D ((Sa) e (St)) também foram analisados, pois segundo as normas européias estes parâmetros denominados por “S” ao invés de “R” são para indicar que foram calculados ao longo de uma superfície. A maioria destes parâmetros 3D são derivados de seus parâmetros correspondentes em 2D (DE CHIFFRE et al., 2000).

Para avaliação do acabamento superficial ((Ra), (Rt), (Sa) e (St)) foi usado o **Modelo Talysurf CCI 3000** e para a análise comparativa de Ra e Rt, usou-se nos resultados o **Modelo Talysurf Intra** sendo que estes dois rugosímetros são da TAYLOR HOBSON PRECISION®:

- **Modelo Talysurf CCI 3000:** faz medidas por meio de um avançado tipo de medida interferométrica (FIGURA 3.4). Utiliza-se um algoritmo de correlação para obter coerência do pico e da posição de fase de uma interferência padrão produzida por uma largura de banda selecionada por meio de uma fonte de luz. Este método produz alta resolução e alta sensibilidade de retorno da luz, tornando esse equipamento muito versátil. Com 0,1 Å de resolução pode-se analisar espelhos, superfícies polidas ou rugosas, medir estruturas policristalinas com degraus na altura, desde que possuam refletividade de 0,3% a 100%. Portanto é possível analisar todo o tipo de material, desde vidros, metais, polímeros, fotos com revestimento e até tinta líquida pode ser medida sem nenhuma dificuldade. Este equipamento foi usado para medir parâmetros superficiais em 2D e 3D. Suas especificações estão na TABELA 3.5.

FIGURA 3.4 - Talysurf CCI 3000 da TAYLOR HOBSON PRECISION[®].

TABELA 3.5 - Especificações técnicas do Talysurf CCI 3000.

<i>Especificações do Sistema</i>	
Alcance vertical (Z) 100µm	Repetibilidade da altura do degrau 0,1 nm (25 mm degrau)
Resolução vertical (max) 0,1Å (10pm)	Linearidade (Z) 0,03% do valor da medida
Repetibilidade RMS (z) 0,03 Å (3pm)	Pixel noise (Z) 0,2 nm
Velocidade de varredura vertical 7 mm/s	Refletividade da superfície 0,3% – 100 %
Alcance de medida (X, Y) 0,36 mm ² – 7,2 mm ²	Tamanho do componente (max) X = Y = 300mm; Z = 200mm
Numero de pontos medidos 1.048.576 (1024 x 1024 pixel)	Peso do componente (max) 10 kg
Resolução lateral (X, Y) 0,36 µm (max)	Tempo de medida 10 – 20 segundos
<i>Condições de instalação</i>	
Temperatura / umidade 15 – 30 °C / 80% não condensada	Vibração Sistema pneumático anti-vibratório
Dimensões 750 mm largura x 500 mm profundidade	

- Modelo Talysurf Intra:** este é um equipamento de metrologia direcionado para medidas de acabamento superficial e permite a medida rápida de vários parâmetros de rugosidade e ondulação. Todas as medidas são enviadas a um microcomputador que possui um software no qual é possível analisar essas medidas por meio de ferramentas que possibilitam: o aumento do perfil traçado, alterar os “*cut- offs*”, examinar o contorno com relação aos parâmetros de linearidade, circularidade, entre outros. Suas medidas são realizadas com o auxílio de um braço com 60mm de comprimento que possui em sua extremidade uma agulha de diamante conisférica com 2 µm de raio no qual é aplicado 1 mN de força para realizar a medida (FIGURA 3.5).

FIGURA 3.5 - Talysurf Intra da TAYLOR HOBSON PRECISION[®].

Todos resultados de rugosidade (Ra e Rt) realizados no **Modelo Talysurf CCI 3000** foram apurados por meio da média de 8 medidas repetidas para cada condição de corte com “*cut-off*” de 0,08 mm. Para as medidas de Sa e St os resultados foram apurados por meio da média de 4 medidas repetidas para cada condição de corte com o uso de um filtro “*thresholded*” de 1 – 99,5 %.

Para os resultados de rugosidade (Ra e Rt) realizados no **Talysurf Intra** foram apurados por meio da média de 4 medidas repetidas para cada condição de corte com “*cut-off*” de 0,25mm.

Os “*cut-offs*” foram determinados de acordo com a norma NBR 6405/1988 no qual a indicação era que para um Ra esperado menor que 0,1 μm deveria ser usado um “*cut-off*” de 0,25 mm. Uma outra recomendação dessa norma era que para as distâncias entre os sulcos que estavam em torno de $0,01 \text{ mm} < \text{distância entre os sulcos} \leq 0,032 \text{ mm}$ o “*cut-off*” deveria ser de 0,08mm. Entretanto, medidas em ambos os aparelhos não mostraram nenhuma diferença significativa nos resultados, quando se alterava os “*cut-offs*” de 0,25mm para 0,08mm.

Capítulo 4 - Resultados e Discussão

4.1 Considerações gerais

Neste capítulo serão tratados os resultados obtidos com o torneamento de Titânio comercialmente puro (TiCP) e de uma liga de titânio (Ti-6Al-4V). Os resultados que serão apresentados a seguir buscam atender os seguintes objetivos: 1) produzir superfícies muito bem acabadas; 2) avaliar a influência relativa de cada um dos parâmetros de corte (Avanço, profundidade e velocidade de corte) sobre o acabamento superficial, 3) investigar as influências do material no acabamento, 4) avaliar o desempenho da ferramenta, 5) microdureza e 6) Análise dos mecanismos de formação do cavaco.

4.1.1 Amostras usinadas

A FIGURA 4.1 exibe duas amostras que foram usinadas em suas faces no torno ASG 2500, e a FIGURA 4.2 mostra o perfil dessa peça realizado no *Talysurf Intra*, onde várias condições de corte foram realizadas na face da amostra.

FIGURA 4.1 - Peças usinadas no torno ASG 2500. Liga de titânio Ti-6Al-4V (esquerda) e Ti (CP) (direita).

FIGURA 4.2 – Perfil obtido no Talysurf Intra da face de uma amostra de Ti (CP) usinada com várias condições de corte com o (do centro para o exterior da peça) $a_p=10\ \mu\text{m}$ e $f = 5, 10, 15$ e $20\ \mu\text{m/rev}$.

4.2 Integridade Superficial

4.2.1 Acabamento Superficial (R_a , R_t , S_a e S_t)

A rugosidade superficial de peças torneadas com ferramentas de diamante depende de fatores tais como: desgaste de ferramenta, a forma como o cavaco é formado e removido, irregularidades no material da peça, anisotropia, vibrações constantes de baixa amplitude, geometria da ferramenta e condições de usinagem (avanço, profundidade de usinagem e velocidade de corte) (JASINEVICIUS, 1994).

A rugosidade superficial teórica pode ser calculada pelas seguintes equações (4.1) e (4.2).

$$R_t = \frac{(f)^2}{8 * R_p} \quad (4.1)$$

$$R_a = \frac{0,0321 \times f^2}{R_p} \quad (4.2)$$

onde f é a taxa de avanço ($\mu\text{m}/\text{rev}$); R_p é o raio da ponta da ferramenta (mm).

Sob condições ideais de usinagem, o perfil do acabamento superficial seria formado pela transferência do perfil da ponta da ferramenta sobre a superfície da peça em intervalos de avanço por revolução (JASINEVICIUS, 1994).

4.2.1.1 Influência do avanço da ferramenta (f) no acabamento superficial

A FIGURA 4.3 apresenta os resultados de rugosidade superficial medido através de perfilometria mecânica *Talysurf INTRA*[®]. Pode-se observar uma tendência de aumento na rugosidade superficial com o aumento do avanço em ambos os materiais testados. Os valores experimentais ficaram acima do valor teórico calculado pela expressão (4.2). Para a condição de corte em que o avanço encontra-se com $15 \mu\text{m}/\text{rev}$ ocorreram os maiores valores da rugosidade para o Ti (CP) $R_a = 60\text{nm}$ e para o Ti-6Al-4V $R_a = 149\text{nm}$, logo após ocorre um decréscimo muito grande para a condição de corte com $20 \mu\text{m}/\text{rev}$.

FIGURA 4.3 - Influência do avanço no acabamento superficial (R_a) medidos no Talysurf Intra. Rotação 1000 rpm, $a_p = 10 \mu\text{m}$, ferramenta Contour[®].

Segundo CHE-HARON (2001) e RIBEIRO, MOREIRA & FERREIRA (2003), quando se aumenta a velocidade de corte para as ligas de titânio, os valores de rugosidade diminuem consideravelmente, ou seja, como o procedimento usado neste experimento foi o torneamento de face (FIGURA 4.1 e FIGURA 4.2) à medida que as regiões amostrais encontravam-se na parte mais externa da peça, a velocidade de corte aumentava (o diâmetro era maior), o que acabou incorrendo neste fato para os ensaios em que os avanços eram maiores, portanto, a rugosidade decresceu significativamente.

Além disso, os resultados obtidos foram muito satisfatórios, pois na literatura os valores encontrados para o Ti -6Al-4V estavam em uma faixa de $R_a = 363 \text{ nm} - 15 \text{ }\mu\text{m}$, e o melhor resultado obtido com um $R_a = 363 \text{ nm}$ foi obtido por YANG, LIU & GRANDT (2002), por meio do uso de uma ferramenta de metal duro da Kennametal K68 com condições de corte de $a_p = 0,127 \text{ mm}$, $f = 0,127 \text{ mm/rev}$ e $V_c = 57,912 \text{ m/min}$.

Na FIGURA 4.4 observa-se o gráfico de R_t em função do avanço obtido no *Talysurf Intra*.

FIGURA 4.4 - Influência do avanço no acabamento superficial (R_t) medidos no Talysurf Intra. Rotação 1000 rpm, $a_p = 10 \text{ }\mu\text{m}$, ferramenta Contour®.

É possível perceber neste gráfico uma tendência de aumento na rugosidade superficial R_t com o aumento do avanço nos dois materiais. Os valores experimentais também ficaram muito acima do valor teórico calculado pela expressão (4.1). Neste

caso, para a condição de corte em que o avanço encontra-se com 15 $\mu\text{m}/\text{rev}$ ocorreram os maiores valores da rugosidade para o Ti (CP) $R_t = 1,20 \mu\text{m}$ e para o Ti-6Al-4V $R_t = 0,970 \mu\text{m}$, logo após ocorre o mesmo decréscimo da rugosidade para a condição de corte com $f = 20 \mu\text{m}/\text{rev}$, devido ao fato que para esta condição a velocidade de corte era maior do que para as outras condições. Os altos valores de R_a e R_t do Ti (CP) e do Ti-6Al-4V podem ser justificados pela FIGURA 4.5. A FIGURA 4.5 (a) mostra que na amostra de Ti (CP) aparecem alguns picos e vales muito acentuados, que elevam o valor médio de R_t (superando os valores de R_t do Ti-6Al-4V) para este material. Por outro lado, o perfil deixado pela ferramenta na amostra de Ti-6Al-4V na FIGURA 4.5. (b) é mais definido. Isto ocorre possivelmente devido a maior dureza da liga de titânio que permite a melhor reprodução do perfil da ferramenta na peça.

Além disso, os valores obtidos foram bastante satisfatórios, pois segundo a literatura, os melhores resultados obtidos para R_t na liga Ti-6Al-4V publicados por BHAUMIK, DIVAKAR & SINGH (1995) estavam em uma faixa de $R_t = 3,71 - 7,83 \mu\text{m}$, por meio do uso de uma ferramenta de composto de wBN e CBN com $V_c = 75 \text{m}/\text{min}$ $f = 0,1 \text{mm}/\text{rev}$ e $a_p = 0,5 \text{mm}$. Deve-se ressaltar que na usinagem de metais não ferrosos (ligas de Al, Cu, etc.) sob as mesmas condições de corte a rugosidade superficial R_a e R_t encontram-se em torno de 10 nm e 40 nm, respectivamente (JASINEVICIUS, 1994).

Outro aspecto interessante a ser relatado se refere à reprodução do perfil da ferramenta e da velocidade de avanço em que a amostra foi usinada. De acordo com JASINEVICIUS et al. (2004) a superfície usinada é basicamente composta pela reprodução do perfil da ferramenta no plano normal à direção de corte. O processo de transferência de perfil poderá ser afetado pelo desgaste da aresta decorrente da sua interação com o material, ou em outras palavras, na afinidade interfacial. O diamante é um material conhecido por possuir pouca afinidade com uma ampla variedade de materiais. A aresta de corte de diamante é considerada como a que possui melhor fidelidade de transferência, sendo estimada da ordem de 10 nm. No caso da usinagem do titânio algumas diferenças foram observadas em função das propriedades dos dois materiais.

FIGURA 4.5 - Gráfico mostrando o perfil usinado medido nas amostras com condições de corte de $a_p = 10 \mu\text{m}$ e $f = 20 \mu\text{m/rev}$ do (a) Amostra de Ti (CP) mostrando alguns picos e fissuras e (b) Amostra de Ti-6Al-4V no qual é possível ver de forma clara o perfil traçado pela ferramenta.

A FIGURA 4.6 mostra a análise superficial obtida pelo Talysurf CCI 3000 do Ti (CP) sob diversas condições de corte realizadas onde foi investigado os parâmetros superficiais S_a e S_t .

Como pode ser observado na FIGURA 4.6 a superfície usinada do Ti (CP) mostra que este material é facilmente danificado demonstrado pelo surgimento de picos e vales acentuados.

FIGURA 4.6 - Análise dos parâmetros S_a e S_t do Ti (CP) usinado com a ferramenta CONTOUR®.

A FIGURA 4.7 mostra a análise superficial obtida pelo *Talysurf CCI 3000* do Ti-6Al-4V sob diversas condições de corte realizadas onde foi investigado os parâmetros superficiais Sa e St. Nesse caso fica mais evidente a reprodução do perfil do passo na ferramenta na superfície usinada.

Esse fato é confirmado através do espectro de frequência (FFT) exemplificado na FIGURA 4.8.

A FIGURA 4.8 mostra o espectro de frequência obtido das amostras de Ti (CP) e Ti-6Al-4V usinadas com $f = 20 \text{ } \mu\text{m/rev}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$. Na FIGURA 4.8 (a), observa-se que o espectro de frequência do Ti(CP) com o comprimento de onda de $20 \text{ } \mu\text{m/rev}$ apareceu com menor intensidade em relação aos outros comprimentos de onda, isto ocorre, devido às partículas e fissuras que surgiram quando este material foi usinado.

A FIGURA 4.8 (b) mostra o espectro de frequência do Ti-6Al-4V, onde é possível observar que o comprimento de onda de $20 \text{ } \mu\text{m/rev}$ apareceu com maior intensidade em relação aos outros comprimentos de onda, isto ocorreu devido à maior dureza do Ti-6Al-4V fazendo com que sua superfície adquirisse a reprodução do perfil da ferramenta durante a usinagem.

FIGURA 4.7 - Análise dos parâmetros S_a e S_t do Ti -6Al-4V usinado com a ferramenta CONTOUR®.

FIGURA 4.8 - Espectro de frequência de amostras usinadas com $f=20\text{ }\mu\text{m/rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$ (a) Ti(CP) onde mostra que o comprimento de onda de $20\text{ }\mu\text{m/rev}$ apareceu com menor intensidade em relação aos outros comprimentos de onda (b) Ti-6Al-4V onde mostra que o comprimento de onda de $20\text{ }\mu\text{m/rev}$ apareceu de forma proeminente em relação aos outros comprimentos de onda.

4.2.1.2 Influência da profundidade de usinagem (a_p) no acabamento superficial

A FIGURA 4.9 mostra a rugosidade superficial R_a em função da profundidade de usinagem. Se tomarmos as equações (4.1) e (4.2) podemos afirmar que a profundidade de usinagem não deveria influenciar diretamente na formação da rugosidade superficial. Todavia, é interessante observar que os valores de rugosidade diminuem com o aumento da profundidade e depois voltam a se elevar. Essa variação

não pode ser claramente explicada, porém acredita-se que esteja relacionada à capacidade encruamento desses materiais.

FIGURA 4.9 - Influência da profundidade de usinagem no acabamento superficial (Ra) medidos no Talysurf Intra. Rotação 1000 rpm, $f = 10 \mu\text{m/rev}$, ferramenta Contour[®].

A FIGURA 4.10 mostra o valor da rugosidade superficial R_t em função da profundidade de usinagem. A mesma tendência pode ser observada nesse gráfico. A literatura não apresenta justificativa para essa diferença na rugosidade superficial.

FIGURA 4.10 - Influência da profundidade de usinagem no acabamento superficial (R_t) medidos no Talysurf Intra. Rotação 1000 rpm, $f = 10 \mu\text{m/rev}$, ferramenta Contour[®].

4.2.1.3 Influência da geometria da ferramenta (R_p e ângulo de folga) no acabamento superficial

O gráfico da FIGURA 4.11 apresenta a comparação dos valores da rugosidade superficial R_t em função do avanço para a liga Ti-6Al-4V usinada com a ferramenta com ângulos de folga diferentes e pontas diferentes. Os valores de R_t mostram uma tendência de aumento para ferramenta com ângulo de folga menor (5°) e ponta seca, chegando ao máximo de $R_t = 700 \text{ nm}$ para o avanço de $15 \mu\text{m/rev}$ e logo após ocorre uma queda para o avanço de $20 \mu\text{m/rev}$. Comparativamente aos resultados obtidos com ferramenta com ângulo de folga maior (12°) e ponta circular, a rugosidade superficial aumentou sem apresentar sobressaltos. Acredita-se que a superfície de folga da ferramenta faça um contato por atrito com a superfície, prejudicando o acabamento superficial. Esse efeito é conhecido na literatura como “burnishing” (este fenômeno será explicado nas páginas 101 e 102) (JASINEVICIUS, 1994).

Essa diferença observada nos valores de rugosidade também deve estar relacionada a outro fator, que se refere à diferença na geometria da ponta da ferramenta. No caso da ferramenta com ângulo 12° a ponta é circular gerando um perfil de

rugosidade semelhante ao que é apresentado pela FIGURA 4.12 (a). A ferramenta com ângulo de folga 5° apresenta uma ponta seca e com pequeno chanfro com ângulo secundário de ponta de 2° gerando um perfil semelhante ao que está esquematicamente representado na FIGURA 4.12 (c).

FIGURA 4.11 - Influência do avanço no acabamento superficial (Rt) medidos no Talysurf Intra. Rotação 1000 rpm, $a_p = 5 \mu\text{m}$, ferramenta DIAMANGEO® com ângulo de folga de 5° e ferramenta CONTOUR® com ângulo de folga de 12° .

As FIGURA 4.12 (b) e (d) mostram fotomicrografias feitas através de microscópio óptico dos dois tipos de ranhuras gerados pela usinagem com essas ferramentas em amostras de Ti-6Al-4V. Apesar das geometrias serem distintas a superfície apresenta resultados de rugosidade muito similares.

FIGURA 4.12 - a) Desenho esquemático do perfil da rugosidade gerado na usinagem realizada com ferramenta de ponta arredondada; b) Fotomicrografias feitas através de microscopia óptica das superfícies geradas com ferramenta com ponta circular e ; c) Desenho esquemático do perfil da rugosidade gerado na usinagem realizada com ponta seca; d) imagem da superfície (magnificação 500 x).

4.2.2 Microdureza obtida no estado polido

Para JASINEVICIUS (1994), a qualidade das superfícies é caracterizada pelo acabamento obtido na operação de usinagem e pelas propriedades físicas e mecânicas do metal na camada superficial e sub-superficial. Estas propriedades são modificadas durante a usinagem, principalmente, devido à ação dos seguintes fatores:

- pressão de contato da ferramenta contra a peça;

- atrito da superfície de incidência da ferramenta com a peça;
- atrito interno do material na região de deformação plástica;
- calor gerado no processo de corte;
- fenômenos específicos do processo de formação de cavaco;

Portanto, a espessura das camadas superficial e sub-superficial modificadas depende do processo, das condições de usinagem e do material, Quanto mais dúctil for o material, maiores serão as modificações dessas camadas, daí a necessidade de se conhecer as propriedades específicas do material a ser usinado.

Na FIGURA 4.13 é possível observar, em ambos materiais (Ti(CP) Ti-6Al-4V), que em todas as cargas aplicadas não ocorre nenhuma variação da microdureza, pois devido ao polimento, toda a camada encruada foi removida do material. A média das durezas medidas ficou de acordo com a revisão literária (MACHADO & WALLBANK, 1990; DONACHIE, 1998) e os valores obtidos foram 210 HV para o Ti (CP) e de 310 HV para o Ti-6Al-4V.

FIGURA 4.13 – Microdureza do Ti (CP) e do Ti-6Al-4V no estado polido.

4.2.3 Influência das condições de usinagem e da geometria da ferramenta sobre o encruamento da amostra após a usinagem

4.2.3.1 Influência do avanço e da profundidade de usinagem quando se usa a ferramenta com ângulo de folga de 12°

A FIGURA 4.14 mostra a Microdureza Vickers em função da carga aplicada, dos materiais usinados Ti (CP) e da liga Ti-6Al-4V. O gráfico mostra que amostra de Ti (CP) apresentou um encruamento muito maior do que amostra da liga, sob as mesmas condições de usinagem. Esse resultado seria esperado, pois o Ti (CP) apresenta maior capacidade de encruamento por ser material puro do que a liga de Ti. Observando os valores da FIGURA 4.14 pode-se notar um aumento elevado na microdureza das peças analisadas ficaram em torno de 70% para o Ti (CP) e de 43% para a liga Ti-6Al-4V em relação ao valor do material polido quando o indutor Vickers foi pressionado contra a amostra com um carregamento de 10 g. É possível observar também que quando se aumentam os valores das cargas aplicadas os valores das durezas decrescem indicando que o indutor talvez tenha ultrapassado a camada encruada atingido o substrato da peça.

A FIGURA 4.15 mostra a fotografia óptica do Ti (CP) e da liga Ti-6Al-4V mostrando as diagonais das endentações.

FIGURA 4.14 – Microdureza Vickers em função da carga aplicada do Ti (CP) e da liga Ti-6Al-4V, usinado com a ferramenta Contour[®].

FIGURA 4.15 – (a) Fotografia óptica do Ti (CP) mostrando as diagonais das endentações. Superfície usinada com $a_p = 5 \mu\text{m}$ e $f = 10 \mu\text{m/rev}$, ampliado 500x. (b) Fotografia óptica da liga Ti-6Al-4V mostrando as diagonais das endentações. Superfície usinada com $a_p = 5 \mu\text{m}$ e $f = 10 \mu\text{m/rev}$, ampliado 500x.

O gráfico da FIGURA 4.16 mostra a microdureza obtida do Ti (CP) e do Ti-6Al-4V em função das cargas aplicadas, para diferentes valores de profundidade de usinagem, mantendo-se o avanço constante. Observa-se que sempre quando se

aumentou as cargas a microdureza diminuiu, além disso, a profundidade de usinagem não interferiu nas durezas do material quando usou a ferramenta com ângulo de folga de 12° , ou seja, os valores de dureza são muito próximos com a variação da profundidade de usinagem. Isso mostra que esse material sofre pouca variação na microdureza com a variação das condições de usinagem quando se usa a ferramenta com ângulo de folga maior. Quando se aumentou os valores das cargas aplicadas, os valores das durezas também decresceram indicando que o endentador talvez tenha ultrapassado a camada encruada atingido o substrato da peça. Com a carga aplicada de 200g os valores de microdureza retornaram ao valor nominal do material polido, ou seja, 210 HV para o Ti (CP) e 310 HV para o Ti-6Al-4V.

FIGURA 4.16 - Microdureza Vickers do Ti (CP) e da liga Ti-6Al-4V para diferentes condições de usinagem realizadas com a ferramenta Contour[®].

4.2.3.2 Encruamento em função da geometria da ferramenta

A FIGURA 4.17 mostra o gráfico da microdureza Vickers em função da carga aplicada do Ti (CP), usinado com ferramentas com ângulo de folga diferentes. Pode-se

observar que para todas as cargas o valor da microdureza superficial foi maior para amostra usinada com ferramenta com ângulo de folga menor.

FIGURA 4.17 - Microdureza Vickers em função da carga aplicada do Ti (CP), usinado com a ferramenta com ângulos de folga diferentes.

Da mesma forma a FIGURA 4.18 mostra o gráfico da microdureza Vickers em função da carga aplicada do Ti-6Al-4V, usinado com ferramentas com ângulo de folga diferentes. Pode-se observar também que para todas as cargas o valor da microdureza superficial foi maior para amostra usinada com ferramenta com ângulo de folga menor.

FIGURA 4.18 - Microdureza Vickers em função da carga aplicada da liga Ti-6Al-4V, usinado com a ferramenta com ângulos de folga diferentes.

Nos dois casos o aumento da microdureza que ocorreu quando se usinou com a ferramenta com ângulo de folga de 5° foi muito maior do que quando se usinou com a ferramenta 12°. Para a profundidade de usinagem $a_p = 10 \mu\text{m}$ os valores obtidos ficaram maiores em relação ao valor nominal do material polido para um carregamento Vickers de 10 g em torno de, 85% para o Ti (CP) e de 77% para o Ti-6Al-4V.

É possível observar também que ocorreu a mesma queda nos valores de microdureza quando se aumentava os valores das cargas aplicados, indicando também que o endentador tenha ultrapassado a camada encruada atingido o substrato das amostras.

4.2.3.3 Influência do avanço e da profundidade de usinagem quando se usa a ferramenta com ângulo de folga de 5°

Com intuito de se confirmar o efeito do encruamento causado pelo ângulo de folga decidiu-se realizar novos ensaios com a ferramenta com ângulo de folga de 5°, porém variando-se a profundidade e o avanço. A FIGURA 4.19 mostra os resultados obtidos para ambos os casos, ou seja, Ti (CP) e Ti-6Al-4V. Para os diferentes avanços usados (5-25 $\mu\text{m}/\text{rev}$) nada ocorreu, indicando que o avanço não possuiu nenhum papel significativo na microdureza. Para a profundidade de usinagem com $a_p=5\mu\text{m}$ a microdureza para todas as cargas testadas foram menores do que para profundidade de usinagem de 10 μm , tanto para o Ti (CP) quanto para o Ti-6Al-4V, ou seja, o ângulo de folga tem um papel importante no encruamento causado na superfície após a usinagem.

FIGURA 4.19 - Microdureza Vickers em função da carga aplicada do Ti (CP) e da liga Ti-6Al-4V, usinado com a ferramenta com ângulo de folga de 5° com ponta arredondada.

O motivo pelo qual a microdureza foi maior quando se usou a ferramenta com ângulo de folga menor pode ser explicado através da FIGURA 4.20.

A FIGURA 4.20 mostra um desenho esquemático de duas ferramentas com ângulo de folgas diferentes. Quando o ângulo de folga é pequeno há um maior contato entre a superfície de folga e a superfície recém formada da peça. Em função disso, quando a profundidade de usinagem é aumentada a área da superfície de folga da ferramenta em contato com a peça também irá aumentar, ou seja, o atrito aumentará, e consequentemente, ocorrerá o aumento das tensões de compressão tornando o material mais encruado (este fenômeno é conhecido na literatura como “burnishing”).

FIGURA 4.20 - Desenho esquemático mostrando a usinagem com (a) Ferramenta CONTOUR® (b) Ferramenta DIFER® (burnishing).

4.2.3.4 Profundidade de encruamento no Ti (CP) e na liga Ti-6Al-4V

Como a afiação das ferramentas de diamante gera arestas de corte muito delgadas esperava-se que o encruamento (variação da microdureza) na amostra não fosse tão alto em condições finas de usinagem. Todavia, os valores obtidos são da mesma ordem de grandeza dos que foram obtidos por JASINEVICIUS et al. (2003) na usinagem de ligas de alumínio com condições de corte semelhantes. Para as menores cargas aplicadas pelo endentador, o alto valor de microdureza pode ser indicativo de que o endentador esteja atingindo a camada plasticamente afetada pela usinagem. Além disso, observa-se um decréscimo nas durezas enquanto aumentam-se os valores dos carregamentos aplicados. Quando as cargas aplicadas são mais elevadas do que 10g e 25g, o endentador possivelmente começa a deformar, conjuntamente, a camada deformada mais o substrato, que possui uma dureza menor ocorrendo então um decréscimo na microdureza.

A FIGURA 4.21 mostra um desenho esquemático mostrando como se estimou a variação da microdureza em função da carga aplicada. Para isso, estimou-se a profundidade de penetração do endentador usando os resultados da diagonal e da geometria do endentador. Pode-se observar o endentador penetrando na camada encruada de acordo com os carregamentos efetuados. Como as diagonais foram devidamente medidas no microdurômetro, portanto foi possível obter os valores das profundidades de penetração X_1 , X_2 , X_3 , X_4 e X_5 , representadas na FIGURA 4.21 para cada carga aplicada por meio da seguinte relação:

$$p = \frac{\frac{1}{2} \times d}{\operatorname{tg} 68^\circ} \quad (4.3)$$

Onde d é a diagonal de endentação e p é a profundidade da endentação.

FIGURA 4.21 - Desenho esquemático de testes de microdureza realizados em uma camada superficial encruada.

A TABELA 4.1 mostra os resultados da profundidade de penetração do endentador estimada em função do tamanho das diagonais e da geometria do endentador.

TABELA 4.1 - Profundidade das endentações calculadas teoricamente para as superfícies usinadas. Os parâmetros de corte adotados foram de $f=10\mu\text{m/rev}$ e $a_p=5\mu\text{m}$.

Cargas (g)	Diagonais médias Ti (CP) (μm)	Profundidade das endentações Ti (CP) (μm)	Diagonais médias do Ti-6Al-4V(μm)	Profundidade das endentações Ti-6Al-4V (μm)
10	7,1	$X_1 = 1,4$	6,5	$X_1 = 1,3$
25	11,5	$X_2 = 2,3$	10,5	$X_2 = 2,1$
50	18,8	$X_3 = 3,8$	15,4	$X_3 = 3,1$
100	27,4	$X_4 = 5,5$	22,9	$X_4 = 4,6$
200	40,3	$X_5 = 8,1$	34,0	$X_5 = 6,8$

Para comprovar experimentalmente a profundidade das endentações, usou-se o MFA onde foi possível notar na FIGURA 4.22 que a profundidade obtida para uma carga de 25g aplicada no Ti (CP) foi de $1,853\mu\text{m}$, ou seja, próximo ao valor calculado teoricamente, esta pequena diferença na profundidade endentada pode ser explicada por uma possível recuperação elástica do material. Além disso, pode-se afirmar que essa recuperação elástica é mais significativa para essa amostra usinada.

FIGURA 4.22 – Visualização 2D do Ti (CP) obtida por meio do microscópio de força atômica no qual é possível observar uma endentação com carga aplicada de 25 g com condições de usinagem de $f=5 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$. $R_{\text{max}} = 1,853 \mu\text{m}$.

Estes valores de profundidade de endentação justificam a queda na microdureza quando se aplicava cargas maiores ou iguais a 50 g, corroborando com o que é experimentalmente mostrado na FIGURA 4.23 e FIGURA 4.24. A FIGURA 4.23 (a) mostra uma imagem feita através de microscopia óptica mostrando o polimento realizado parcialmente na amostra. Esse procedimento consistia em polir a amostra (para remover o encruamento deixado pela usinagem, $a_p=20 \mu\text{m}$ e $f=20 \mu\text{m}/\text{rev}$) e medir a micro dureza com carga de 10g até observar a mudança no valor da microdureza para os valores nominais do material. Após atingir o patamar em questão utilizou-se um perfilômetro mecânico para estimar o valor do degrau deixado pelo polimento em relação à superfície usinada. Essa diferença de altura indica aproximadamente o valor da espessura da camada plasticamente afetada pela usinagem. Essa é uma estimativa que pode ser usada como indicativo da profundidade de

encruamento. O valor estimado, como pode ser observado na FIGURA 4.23 (b), foi de apenas 2 μm para ambos os materiais (FIGURA 4.24 (a) e FIGURA 4.24 (b)). Esse valor corrobora com o que foi qualitativamente estimado com os valores de microdureza em função da carga e pela FIGURA 4.21. De acordo com os trabalhos de EVANS et al. (1987) e HORIO et al. (1992), a profundidade da camada danificada para materiais não-ferrosos (AL, Cu, Ti, etc.) usinados com ferramentas afiadas de ponta única de diamante está dentro de uma faixa de 1 a 17 μm .

Isto mostra que o processo de usinagem com ferramenta de diamante provoca um baixo nível de encruamento em profundidade na superfície. Isto se justifica devido ao alto grau de afiamento da ferramenta e condição de corte muito fina.

FIGURA 4.23 - Determinação da profundidade de encruamento após a usinagem,
a) imagem feita da amostra usinada e polida mostrando o degrau obtido após o
polimento; b) perfil traçado pelo Form Talysurf Intra® em uma peça de Ti (CP)
usinada com $a_p = 20 \mu\text{m}$ e $f = 20 \mu\text{m/ver}$; a) fotomicrografia da região polida e; b)
perfil da superfície medida no perfilômetro mecânico

FIGURA 4.24 – a) Imagem adquirida por meio de um microscópio óptico mostrando a região do degrau obtido entre a região polida e usinada, Ti-6Al-4V com $a_p = 20 \mu\text{m}$ e $f = 20 \mu\text{m/rev}$, ampliação de 200x; b) determinação da profundidade de encruamento após a usinagem, perfil traçado pelo Form Talysurf Intra® em uma peça de Ti-6Al-4V usinada com $a_p = 20 \mu\text{m}$ e $f = 20 \mu\text{m/rev}$.

4.2.4 Danos causados nas superfícies dos materiais

4.2.4.1 Superfície do Ti (CP)

As FIGURA 4.25 (a) e FIGURA 4.25 (b) apresentam fotomicrografias da superfície de Ti (CP) feitas através de Microscópio óptico e MEV, respectivamente. Pode-se observar a superfície do Ti (CP) obtida na usinagem com a ferramenta de diamante apresenta pequenos pontos escuros (FIGURA 4.25 (a)). Através da análise com MEV observou-se que esses defeitos eram pequenas porções de material se desprendendo da superfície usinada (FIGURA 4.25 (b)).

FIGURA 4.25 - (a) Fotografia da superfície usinada obtida por meio de um microscópio óptico, no qual Ti (CP) foi usinado com $f=10\mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$ ampliado 200x. (b) Imagem obtida no MEV do Ti (CP) mostrando a ampliação de uma partícula circulada na figura (a) com uma ampliação de 5000x.

Este descolamento aparente de material observado na superfície do Ti (CP), após a passagem da ferramenta, poderia estar associado a um fenômeno conhecido como “delaminação”. Sabe-se que na usinagem de ultraprecisão a ferramenta irá passar através de um único grão varias vezes (JASINEVICIUS et al. 2001).

A FIGURA 4.26 apresenta um desenho esquemático mostrando o que se acredita ter ocorrido após a usinagem das amostras de Ti (CP). A FIGURA 4.26 (a)

mostra que após a passagem da ferramenta, tensões compressivas são impostas na camada mais superficial do material como foi anteriormente comprovado no item anterior. Esse encruamento imposto pelo processo de remoção de material geraria um estado de tensão diferente na interface (contornos de grão) entre os grãos das camadas mais superficiais e da camada logo abaixo, causado pela passagem da ferramenta sobre o mesmo grão durante várias vezes. Esse diferencial de tensões, compressivas na superfície e trativas no substrato, provocariam alguns descolamentos de grãos, ou seja, ocorre a **delaminação** (FIGURA 4.26 (b)). Todavia, não foi encontrada na literatura nenhuma referência a este mecanismo.

FIGURA 4.26 - Desenho esquemático do processo de delaminação.

A FIGURA 4.27 mostra um exemplo de uma porção da superfície que houve um descolamento do grão provocado pela delaminação. Pode-se observar na FIGURA 4.27 (a) o perfil traçado pelo perfilômetro desta região onde há uma grande depressão e logo

em seguida uma elevação. Deve-se lembrar que os resultados de metalografia não apresentaram qualquer indício de porosidade.

FIGURA 4.27 - Ti (CP) usinado com $f=5\mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$. (a) Espectro das superfícies usinadas obtidas por meio do *Talysurf CCI 3000*. O traço preto representa o perfilômetro passando pela superfície. (b) Perfil obtido no *Talysurf CCI 3000* de uma amostra de Ti (CP) que esta de acordo com esta figura (a) mostrando uma fissura na superfície e logo após uma elevação delaminada.

Deve-se lembrar que este não é um problema da usinagem, e sim como foi visto na TABELA 2.9, que existem diversos problemas que o material pode causar e consequentemente gerar defeitos no acabamento superficial.

A FIGURA 4.28 mostra uma área da superfície usinada do Ti (CP) no qual é possível observar várias partículas delaminadas e a interferência que estas provocam no

acabamento superficial alterando o perfil que seria gerado pela ferramenta (FIGURA 4.28 (c)).

FIGURA 4.28 - (a) imagem tridimensional da superfícies usinadas do Ti (CP) usinado com $f=15\mu\text{m}/\text{rev}$ $a_p=10\mu\text{m}$ obtidas por meio do *Talysurf CCI 3000*, no qual é possível observar pequenos picos; (b) Micrografia das superfícies usinadas obtidas por meio do MEV, ampliado 1000x. (c) Perfil obtido no *Talysurf CCI 3000* de uma amostra de Ti (CP) que esta de acordo com esta figura (a) mostrando alguns picos e fissuras que foram causados pelo processo de delaminação.

É importante ressaltar que superfícies imperfeitas tornam o material suscetível à fadiga. Na usinagem de certos materiais como o titânio, micro trincas são facilmente produzidas, podendo estas nuclearem para ocorrer falha por fadiga (TURKOVICH & FIELD, 1981).

4.2.4.2 Superfície do Ti-6Al-4V

Na FIGURA 4.29 é possível analisar a superfície do Ti-6Al-4V obtida na usinagem de ultraprecisão com a ferramenta CONTOUR[®] de modo qualitativo, onde é demonstrado o grau de repetibilidade e precisão deste tipo de usinagem com ferramenta de ponta única de diamante monocristalino no torno ASG 2500.

FIGURA 4.29 – Ti-6Al-4V usinado com $f=10\mu\text{m}/\text{rev}$ $a_p=10\mu\text{m}$ ampliado (a) Fotografia das superfícies usinadas obtidas por meio de um microscópio óptico ampliação de 200x. (b) Micrografia da superfície usinada do Ti-6Al-4V obtida por meio do MEV, ampliado 1000x.

A FIGURA 4.30 confirma o grau de repetibilidade quando se usina o Ti-6Al-4V na usinagem de ultraprecisão com a ferramenta CONTOUR[®].

FIGURA 4.30 - Ti-6Al-4V usinada com $f=15\mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$. (a) Espectro das superfícies usinadas obtidas por meio do *Talysurf CCI 3000* do Ti-6Al-4V usinado com $f= 15\mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p =10\mu\text{m}$. (b) Perfil obtido no *Talysurf CCI 3000* de uma peça de Ti-6Al-4V que está de acordo com esta figura (a) mostrando o grau de repetibilidade e precisão da usinagem com ferramenta de ponta única de diamante.

A FIGURA 4.31 mostra que mesmo na usinagem Ti-6Al-4V apareceram algumas partículas em sua superfície (com intensidade muito menor em relação ao Ti (CP)) que foram possivelmente causadas pelo processo de delaminação.

FIGURA 4.31 - (a) Espectro das superfícies usinadas obtidas por meio do *Talysurf CCI 3000* do Ti-6Al-4V usinado com $f=20 \mu\text{m}/\text{rev}$ $a_p=10\mu\text{m}$ (b) Micrografia das superfícies usinadas do Ti-6Al-4V com $f=15\mu\text{m}/\text{rev}$ $a_p=10\mu\text{m}$ obtidas por meio do MEV mostrando algumas partículas delaminadas com uma ampliação de 1000x. (c) Perfil obtido no *Talysurf CCI 3000* de uma amostra de Ti-6Al-4V que está de acordo com esta figura (a) mostrando também que na liga também ocorreu alguns picos e fissuras que foram causados pelo processo de delaminação.

4.3 Análise do Cavaco

A interação mecânica ferramenta/peça pode resultar em diferentes tipos de deformação em materiais metálicos assim como modos associados de remoção de material. Segundo SHAW (1984), no torneamento com diamante, o contato entre a ferramenta e a peça geralmente resulta na formação de cavaco por meio da separação do material da peça. Esse processo de separação do material envolve um cisalhamento plástico intenso e uma ruptura dúctil do material pela ponta da ferramenta. Portanto o escoamento plástico é o modo predominante de remoção de material no torneamento com diamante. Com profundidades de usinagem muito pequenas, a formação do cavaco tem uma estreita relação com o grau de afiação da aresta de corte, quando esta aresta não está muito afiada pode ocorrer apenas deformação plástica do material. Por outro lado, a quantidade de tensões introduzidas no material é minimizada quando se usa ferramentas afiadas.

A FIGURA 4.32 mostra um cavaco típico do Ti (CP) usinado com a ferramenta CONTOUR[®] com $f = 10 \text{ } \mu\text{m/rev}$ e $a_p = 15 \text{ } \mu\text{m}$, o cavaco apresentou estrutura segmentada em forma de cunha, como era esperado segundo a literatura. Para as demais condições de corte, os resultados obtidos para o Ti (CP) foram praticamente idênticos, tanto para as ferramentas DIFER[®] quanto para a CONTOUR[®], ou seja, cavacos contínuos com formato de fita, com segmentos formados por provável cisalhamento adiabático foram predominantes nestas condições.

GENTE & HOFFMEISTER (2001), BLACK (1979) e KOMANDURI (1982), concluem que a deformação na usinagem de Ti-6Al-4V é quase independente das condições de corte, e não ocorrem mudanças significativas na forma de espaçamento periódico da estrutura lamelar quando também se varia em diversas magnitudes a velocidade de corte. Por esta razão, pode-se excluir que a taxa de deformação influi no início do cisalhamento localizado. Logo após o início do cisalhamento localizado, a taxa de deformação nas bandas de cisalhamento pode ser determinada pela liberação da energia elástica armazenada no meio. Se isto for verdade, pode haver um mecanismo de desenvolvimento do cisalhamento localizado que é independente da velocidade de corte.

FIGURA 4.32 - Análise do cavaco no M.E.V. do Ti (CP) usinado com a ferramenta CONTOUR® com $f = 10 \mu\text{m/rev}$ e $a_p = 15 \mu\text{m}$; (a) Lateral do cavaco ampliado 5000x; (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 3000x (d) Cavaco com forma de fita, ampliação de 50x.

A FIGURA 4.33 mostra um cavaco típico da liga Ti-6Al-4V usinado com a ferramenta CONTOUR® com $f = 10 \mu\text{m/rev}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$, o cavaco apresentou mesmo sob condições muito finas de usinagem cavacos do tipo serrilhado com estrutura segmentada em formato de cunha, idêntico ao cavaco do Ti (CP) como era esperado segundo a literatura. Para as demais condições de corte, os resultados obtidos para a liga Ti-6Al-4V foram praticamente idênticos, tanto para as ferramentas DIFER® quanto para

a CONTOUR[®], ou seja, cavacos contínuos com formato de fita, com segmentos formados por provável cisalhamento adiabático foram predominantes nestas condições. A FIGURA 4.33 (a) mostra a vista lateral do cavaco do Ti-6Al-4V o qual é possível observar que os segmentos estão em uma faixa de espessura de aproximadamente 2-3 μm , organizados de forma periódica corroborando com os resultados vistos na revisão bibliográfica.

Ao observar a FIGURA 4.33 (b) é possível observar os segmentos de forma justapostos com tamanhos equivalentes. Na FIGURA 4.33 (c) é possível observar a intensa deformação plástica imposta pela ferramenta de diamante na superfície em que o cavaco faz contato com a ferramenta. Outro fato interessante é que a superfície livre do cavaco não apresenta variação na sua estrutura em função da mudança de grão, ou seja, não ocorreu formação de estrutura degrau como já foi mostrado por meio da microscopia óptica das superfícies usinadas. Na FIGURA 4.33 (d) pode-se notar também que o exemplo de formação de cavaco predominante é de cisalhamento com o formato de fita.

FIGURA 4.33 - Análise do cavaco no M.E.V. da liga Ti-6Al-4V usinado a ferramenta CONTOUR® com $f = 10 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$; (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 (d) Cavaco com forma de fita, ampliação de 50x.

O segmento com o formato de cunha pode ser explicado devido ao uso de ferramenta de ponta arredondada. Por este motivo ocorreu a semelhança entre o cavaco quando se cortava com a ferramenta DIFER® quanto para a ferramenta CONTOUR® conforme o desenho esquemático da FIGURA 4.34.

FIGURA 4.34 - Desenho esquemático da usinagem realizada com a ferramenta de ponta arredondada.

No caso da usinagem com a ferramenta DIAMANGEO[®] observa-se na FIGURA 4.35 (a) que os cavacos obtidos foram segmentados, mas com o formato diferente dos cavacos que foram usinados com ponta arredondada, ou seja, o formato do segmento se apresentou de forma retangular. Na FIGURA 4.35 (b) percebe-se que sua formação foi contínua com formato helicoidal. Na FIGURA 4.35 (c) é possível observar a intensa deformação plástica imposta pela ferramenta de diamante na superfície em que o cavaco faz contato com a ferramenta.

FIGURA 4.35 - Análise do cavaco no M.E.V. da liga Ti-6Al-4V usinado com $f = 10 \mu\text{m/rev}$ e $a_p = 5 \mu\text{m}$; (a) Lateral do cavaco ampliado 2000x; (b) Visão geral do cavaco com formato helicoidal, ampliação de 200x (c) Parte inferior do cavaco, onde a superfície de saída da ferramenta faz contato com o cavaco, ampliação de 3000x.

O segmento com o formato retangular pode ser explicado devido ao uso de ferramenta de ponta seca, conforme o desenho esquemático da FIGURA 4.36.

FIGURA 4.36 - Desenho esquemático da usinagem realizada com a ferramenta de ponta seca.

Capítulo 5 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

5.1 Conclusões

O titânio e suas ligas estão sendo cada vez mais empregados, não apenas na indústria aeronáutica, mas como também na indústria marinha, biomédica, eletrônica, química e petroquímica.

Na seleção final de materiais para ferramenta de corte é importante lembrar que este fator sempre será baseado no compromisso entre os diversos aspectos de desempenho e custo.

Atualmente as ferramentas de diamante são muito mais caras que as ferramentas de metal duro, no entanto, deve-se levar em consideração na seleção das ferramentas o tipo de aplicação a ser usado, e no caso de acabamentos superficiais que requerem finos acabamentos e tolerâncias apertadas, o uso do diamante se torna fundamental, pois seu alto grau de afiação melhora os valores de rugosidade melhorando a vida por fadiga da peça.

O uso de ferramentas de diamante neste trabalho resultou em baixos valores de R_a e R_t para ambos os materiais Ti (CP) e Ti-6Al-4V, no qual o menor valor encontrado de R_a para o Ti(CP) foi de 30 nm e para o Ti-6Al-4V foi de 46 nm com condições de corte de $f = 10\mu\text{m/rev}$ e $a_p = 10\mu\text{m}$ e o menor valor encontrado de R_t para o Ti(CP) foi de 590 nm e para o Ti-6Al-4V foi de 416 nm com condições de corte também de $f = 10\mu\text{m/rev}$ e $a_p = 10\mu\text{m}$. Além disso, constatou-se que a velocidade de corte teve um papel fundamental nas propriedades de rugosidade, pois quando se aumentava a V_c os

valores dos parâmetros de rugosidade diminuíam. Este tipo de análise é fundamental, pois a rugosidade está intrinsecamente ligada à resistência por fadiga o que torna um fator determinante no dimensionamento de projetos.

O titânio e suas ligas são materiais difíceis de serem usinados comparando-os com um aço de mesma dureza. Cuidados devem ser tomados para que na usinagem do titânio a integridade superficial seja mantida. Já era conhecido que esta degradação ocorria devido a danos superficiais, tais como microtrincas que podem nuclear de forma a ocorrer falha por fadiga, e tensões residuais.

Observou-se a formação de pequenos defeitos nas superfícies de Ti (CP). Análises feitas através de MEV mostraram que havia uma espécie de descolamento de material da superfície acabada. Estes microdefeitos gerados foram associados a um mecanismo conhecido como “delaminação”.

Estas partículas *delaminadas* influenciaram de forma significativa nos resultados da usinagem do Ti (CP) alterando o perfil de rugosidade de forma a aparecer grandes picos e vales e consequentemente aumentando os valores de R_t de forma substancial. Na usinagem do Ti-6Al-4V, também ficou constatado o surgimento destas partículas delaminadas, mas com uma intensidade muito menor. Portanto, tendo em vista a aplicação de implantes biomédicos o uso do torneamento de precisão com ferramenta de diamante mostrou que a melhor reprodução do perfil da ponta da ferramenta na peça ocorreu na liga Ti-6Al-4V.

Outra característica observada foi o grande aumento que ocorreu nos valores de microdureza para ambos os materiais com todas as ferramentas usadas. Para as ferramentas DIFER[®] e DIAMANGEO[®] (ângulo de folga de 5°) existiu influência da profundidade de usinagem no grau e extensão de encruamento devido ao aumento do atrito entre a superfície de folga da ferramenta e o material da peça (*burnishing*).

Nas condições de corte mais finas com o uso da ferramenta CONTOUR[®] (ângulo de folga de 12°), o menor aumento da microdureza em relação ao estado polido do material foi da ordem de 34% para o Ti (CP) e de 37% para a liga Ti-6Al-4V ambos usinados com $f = 10\mu\text{m/rev}$ e $a_p = 1\mu\text{m}$ quando o endentador Vickers foi pressionado contra a amostra com um carregamento de 10 g, e os maiores valores de microdureza encontrados foram da ordem de, 85% para o Ti (CP) e de 77% para o Ti-6Al-4V com condições de corte de $a_p = 10\mu\text{m}$ e $f = 5\mu\text{m/rev}$ usinados com a ferramenta DIFER[®].

Quando o acabamento superficial torna-se um fator crítico para peça sugere-se que seja realizado um pós-polimento na amostra para minimizar estes problemas de aumento da dureza. Como visto no trabalho, a espessura da camada superficial danificada não ultrapassou 2 μm . Isto mostra que o processo de usinagem com ferramenta de diamante provoca pouca profundidade de encruamento na superfície. Isto se justifica devido ao alto grau de afiamento da ferramenta e condições de corte muito fina.

A análise do cavaco do Ti (CP) e sua liga Ti-6Al-4V, mostrou que os cavacos se deformam de forma heterogênea com bandas de cisalhamento dividindo o cavaco em segmentos. A característica da formação de cavacos segmentados do Ti (CP) e da liga Ti-6Al-4V no qual apareceu em todas as velocidades de corte sob condições muito finas de usinagem, é provavelmente resultado do mecanismo chamado de “cisalhamento termoplástico catastrófico localizado” que ocorre na zona primária de corte. Este fenômeno envolve propriedades mecânicas, físicas, e termofísica do material, tais como calor específico, taxa de encruamento, densidade, difusividade e condutividade térmica. O cisalhamento localizado ocorre devido à razão de amolecimento térmico (causado pela alta temperatura localizada) ser maior que a taxa de encruamento. Este fenômeno aparece em finas camadas ao longo do cavaco entre os segmentos e também na zona de escoamento entre o cavaco e a ferramenta. É importante lembrar que estes resultados foram concebidos com condições de corte do sistema máquina–ferramenta de alta rigidez não permitindo que nenhuma vibração ocorresse, portanto a formação do cavaco em formato serrilhado se deu devido às propriedades do material e não pelo funcionamento do sistema máquina ferramenta.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros, que podem vir a complementar e melhor explorar o tema:

Aplicar o uso da criogenia, com o objetivo de diminuir a afinidade química existente entre o titânio e os vários materiais ferramentas.

Empregar outras técnicas de monitoramento, como a Emissão Acústica para efeito de comparação.

Usar a retificação de ultraprecisão e comparar os resultados com o torneamento.

Avaliar os mecanismos de fadiga do Ti (CP) e da liga Ti-6Al-4V, pois estes materiais são usados em aplicações que requerem alta sollicitação dinâmica.

Avaliar o desgaste da ferramenta de diamante monocristalino.

Fazer análises de raio-X, para verificar possíveis mudanças de fase nos materiais.

Fixar a V_c e comparar os resultados.

Realizar análise por elementos finitos para prever as forças de corte, temperatura e investigar o processo do mecanismo de formação do cavaco para efeito de comparação.

Bibliografia

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, Inc., *Surface Texture*, ANSI B46.1-1978, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1978.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM) Committee (1972). "Microstructure of titanium and titanium alloys". Metals handbook, 8th ed., Metals Park. v. 7, p. 321.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM) Committee (1973). "Metallographic technique of titanium and titanium alloys". Metals handbook, 8th ed., Metals Park. v. 8, p. 140.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM) Committee (1980). "Properties of titanium and titanium alloys". Metals handbook, 9th ed., Metals Park. v. 3, p.372.

BAYOUMI, A. E. & XIE, J. Q. (1995). "Some Metalurgical aspects of chip formation in cutting Ti-6wt%Al-4wt%V alloy". Materials science & engineering, v. A190, p. 173-180.

BEGLEY, M. R. & HUTCHINSON, J. W. (1998). "The mechanics of size-dependent indentation". Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v. 46, n. 10, p. 2049-2068.

BHAUMIK, S. K.; DIVAKAR, C. & SINGH, A. K. (1995). " Machining Ti-6Al-4V alloy with a wBN-CBN composite tool". Materials & Design, v. 16, n. 4, p. 221 – 226.

BLACK, J. T. (1979). "Flow stress model in metal cutting". Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, v. 101, p. 403-415.

- BRINKSMEIER, E.; SCHNEIDER, E.; THEINER, W. A.; TÖNSHOFF, H. K. (1984). "Nondestructive testing for evaluating surface integrity". *Annals of the CIRP*, v. 33, n. 2, p. 489 – 509.
- BRYAN, J.B. (1968). "International status of thermal error research". *Annals of the Cirp*, v. 42, n. 2, p. 203-216.
- BRYAN, J.B. (1979). "Design and construction of an ultra precision 84in. diamond turning machine". *Precision Engineering*, v. 1, n. 1, p. 13-17.
- CHE-HARON, C. H. (2001). "Tool life and surface integrity in turning titanium alloy". *Journal of Materials Processing Technology*, v. 1, p. 231-237.
- CORBETT, J., McKEOWN, P.A., PEGGS, G.N. & WHATMORE, R. (2000). "Nanotechnology: international developments and emerging products". *Annals of the CIRP*, v. 49, n. 2, p. 523-545.
- De CHIFFRE, L.; LONARDO, P.; TRUMPOLD, H.; LUCCA, D. A.; GOCH, G.; BROWN, C. A.; RAJA, J. HANSEN, H. N. (2000). "Quantitative characterization of surface texture". *Annals of the CIRP*, v. 49, n. 2, p. 635 – 652.
- DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C. & COPPINI, N.L. (2001). "Tecnologia da Usinagem dos Materiais", 3 ed., Artliber, São Paulo-SP, Brasil, p. 244.
- DONACHIE, M. J. (1988). "Titanium – A Technical Guide", ASM International, p. 469.
- DUDUCH, J.G. (1993). "Some critical aspects of machine design and performance for the machining of brittle materials", p. 168, PhD Thesis, Cranfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science.
- ENOMOTO, Y. & TABOR, D. (1981). "The frictional anisotropy of diamond", *Proceedings of Royal Society of London A*, v. 373, p. 405-417.
- EZUGWU, E. O.; BONNEY, J. & YAMANE, Y. (2003). "An Overview of the Machinability of Aeroengine alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, v. 134, p. 233-253.
- FERRARESI, D. (1970). "Fundamentos da usinagem dos metais", 1^a ed., v. 1 Editora Edgard Blüncher Ltda São Paulo-SP, Brasil p. 752.

- FIELD M., KAHLES J. F. & CAMMETT J. T., (1972) "A Review of Measuring Methods for Surface Integrity" *Annals of the Cirp*, v. 21, n. 2, p. 219-237.
- FIELD, M. & KAHLES, J. F. (1971) "Review of Surface Integrity of Machined Components", *Annals of the Cirp*, v. 20, n. 2, p. 153-163.
- GENTE, A & HOFFMEISTER, H. W. (2001). "Chip Formation in Machining Ti6Al4V at Extremely High Cutting Speeds". *Annals of the CIRP*, v. 50, n. 1, p. 49-52.
- GOLDSTEIN, J.I. et al. (1992). "Scanning microscopy and x-ray microanalysis", second edition, Plenum Press, New York City.
- GROOVER M. P., (2001), "Fundamentals of Modern Manufacturing - Materials", 2 ed. IE-WILEY, Prentice-Hall, p. 1020.
- HONG, S. Y.; MARKUS, I. & JEONG, W. (2001). "New Cooling Approach and Tool Life Improvement in Cryogenic Machining of Titanium Alloy Ti-6Al-4V", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 41, p. 2245-2260.
- HOU, Z. B. & KOMANDURI, R. (1995). "On a thermomechanical model of shear instability in machining". *Annals of the CIRP*, v. 44, n. 1, p. 69-73.
- HOU, Z. B. & KOMANDURI, R. (1997). "Modeling of thermomechanical shear instability in machining". *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 39, n.11, p. 1273-1314.
- JASINEVICIUS, R. G. (1994). "Caracterização da usinabilidade de ultraprecisão em ligas de alumínio fabricadas no Brasil", p. 141, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- JASINEVICIUS, R. G.; CAMPOS, G. P.; MONTANARI, L.; TSUKAMOTO, R.; GARCIA, J. P.; DUDUCH, J.G. & PORTO, A. J. V (2003). "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* v.25 (3), p. 222-228.
- JASINEVICIUS, R.G.; DUDUCH, J. G.; PORTO A. J. V. (2004). "Ferramentas monocortantes de diamante monocristalino" *Usinagem de Ultra Precisão* 1 ed., RiMa, São Carlos - SP, Brasil, p. 25-46.
- JASINEVICIUS, R.G. (2005). "Resultados não publicados".

- KAHLES, J. F. (1987). "Machinability data requirements for advanced machining systems". *Annals of the CIRP*, v. 36, n. 1, p. 523 – 529.
- KAHLES, J. F.; FIELD, M.; EYTON, D. & FROES, F. H. (1985). "Machining of titanium alloys". *Journal of Metals*, v. 37, n. 4, p. 27-35.
- KIKUCHI, M.; TAKADA, Y.; KIYOSUE, S.; YODA, M.; WOLDU, M.; CAI, Z.; OKUNO, O. & OKABE, T. (2003). "Grindability of cast Ti-Cu Alloys", *Dental Materials*, v. 19, p. 375-381.
- KOMANDURI, R. & BROWN, R. H. (1981). "On the mechanics of chip segmentation in machining". *Journal of Engineering for Industry*, v. 103, p. 33-51.
- KOMANDURI, R. & TURKOVICH, B. F. (1981). "New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys". *Wear*, v. 69, n. 2, p. 179-188.
- KOMANDURI, R. (1982). "Some clarifications on the mechanics of chip formation when machining titanium alloys". *Wear*, v. 76, n. 1, p. 15-34.
- KOMANDURI, R. (1996). "On material removal mechanisms in finishing of advanced ceramics and glasses". *Annals of the Cirp*, v. 45, n. 1, p. 509-513.
- KÖNIG, W. (1979). "Applied research on the machinability of titanium and its alloys" In proceeding 47th meeting, AGARD-CP-256, NATO advisory groups for aerospace research and development, London, p. 1.1-1.10.
- KÖNIG, W.; WECK, M.; SPENRATH, N. & LUDERICH, J. (1991). "Diamond machining technology". (tutorial), 6th I. P. E. S. Sem., Braunschweig, p. 96.
- KRAUSKOPF, B. (1984). "Diamond turning: reflecting demands for precision. *Manufacturing Engineering*", v. 92, n. 5, p. 90-100.
- LEE, D. (1985). "The effect of cutting speed on chip formation under orthogonal machining", *Journal of Engineering for Industry*, v. 107, p. 55-63.
- MACHADO, A. R. & WALLBANK, J. (1990). "Machining of titanium and its alloys - a review", *Proceeding of the institution of mechanical engineering*, v. 204, p. 53-60.
- McKEOWN, P.A. (1987). "The role of precision engineering in manufacturing of the future". *Annals of the Cirp*, v. 36, n. 2, p. 495-501.

- MOLINARI, A.; MUSQUAR, C. & SUTTER G. (2002). "Adiabatic shear banding in high speed machining of Ti-6Al-4V: experiments and modeling". *International Journal of Plasticity*, v. 18, n. 4, p. 443-459.
- NABHANI, F. (2001). "Machining of aerospace titanium alloys". *Robots and computer integrated manufacturing*, v. 17, p. 99 – 106.
- NARUTAKI, N. & MURAKOSHI, A. (1983). "Study on Machining of Titanium", *Annals of the Cirp*, v. 32, n. 1, p. 65-69.
- NGOI, B.K.A. & SREEJITH, P.S. (2001). "New materials and their machining". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 18, n. 8, p. 537-544.
- OBIKAWA, T. & USUI E. (1996). "Computational machining of Titanium Alloy – Finite Element Modeling and few results", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 118, p. 208-215.
- PAUL, E., EVANS, C.J., MANGAMELLI, A., MCGLAUFILIN, M.L. & POLVANI, R.S. (1996). "Chemical aspects of tool wear in single point diamond turning". *Precision Engineering*, v. 18, p. 4-19.
- POLMEAR, L. J. (1989). "Light Alloy. Edward Arnold Publisher, London.
- RAHMAN, M.; WONG, Y. S. & ZAREENA, A. R. (2003). "Machinability of titanium alloys". *JSME International Journal*, v. 46, n. 1, p. 107-115.
- REN, J.; HUA, D.; HUANG, Q. & TANG, R. (1991). "Study on the mechanism of wheel wear during grinding of titanium alloy" *ACTA Aeronáutica Et Astronautica Sinica*, v. 12, n. 6, p. 266-272.
- RIBEIRO, M. V.; MOREIRA, M. R. V. & FERREIRA, J. R. (2003). "Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining", *Journal of Materials Technology*, v. 143-144, p. 458-463.
- ROSEN, A.; NADIV, S. & BOHRER, M. (1975). "The effect of high temperature on mechanical and electrical properties of Ti-6Al-4V sheet", *Materials evaluation*, June, p. 135-140.
- SHAW, M. C. (1984). "Metal cutting principles". Oxford Univ. Press, p. 594.
- SHEIKH-AHMAD, J. & BAILEY, J. A. (1997). "Flow instability in the machining of Cp titanium", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 119, p. 307-313

- SHIVPURI, R.; HUA, J.; MITTAL, P. & SRIVASTAVA, A. K. (2002). "Microstructure-Mechanics interactions in modeling chip segmentation during titanium machining", *Annals of the Cirp*, v. 51, n. 1, p. 71-74.
- SILVA, H. A .T. (1999). "Análise do comportamento da emissão acústica durante o torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis", p. 115, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SILVA, H. A. T. (2003). "Monitoramento do torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis", p. 203. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- SMITH, W. F. (1981). "Structure of engineering alloys". McGraw-Hill publisher, New York.
- TAYLOR HOBSON PRECISION (2000). "The parameter tree of surface roughness". Taylor Hobson Centre of Excellence.
- TRENT, E. M. & WRIGHT, P. K. (2000). "Metal Cutting", 4^a ed., v. 1 Editora Butterworth-Heinemann, p. 446.
- TÖNSHOFF, H. K. & BRINKSMEIER, E. (1980). "Determination of the Mechanical and Thermal Influences on Machined Surfaces by Microhardness and Residual Stress Analysis", *Annals of the Cirp*, v. 29, n. 2, p. 519-529.
- TURLEY, D. M. & DOYLE, E. D. (1982). "Calculation of shear strains in formation in titanium", *Materials Science and Engineering*, v. 55, p. 45-48.
- TURKOVICH, B. F. & FIELD, M. (1981). "Survey on Material Behavior in Machining", *Annals of the Cirp*, v. 30, n. 2, p. 533-540.
- WANG, S. H. (2000). "Investigation into the grinding of Titanium alloys". PhD Tesis, Cranfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science, p. 252.
- XIE, J. Q.; BAYOUMI, A. E. & ZBIB, H. M. (1995). "Analytical and experimental study of shear localization in chip formation in orthogonal machining". *Journal of materials engineering and performance*, v. 4, n. 1, p. 32-39.
- YANG, X.; LIU C. R. & GRANDT A. F. (2002). "An experimental study on fatigue life variance, residual stress variance, and their correlation of face-turned and ground

Ti-6Al-4V samples”. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 124 p. 809 – 819.

YUAN, H. & CHEN, J. (2001). “Identification of the intrinsic material length in gradient plasticity theory from micro-indentation tests”. *International Journal of Solids and Structures*, v. 38, p. 8171-8187.

ZHAO, Z. & HONG, S. Y. (1992). “Cooling strategies for cryogenic machining from a materials viewpoint”. *Journal of materials engineering and performance*, v. 1, n. 5, p. 669-678.