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

**USINABILIDADE DO CARBETO DE TUNGSTÊNIO NO
TORNEAMENTO COM FERRAMENTA DE DIAMANTE**

ANDRÉ DA MOTTA GONÇALVES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

DEDICATÓRIA

Toda minha família,

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela infinita proteção, por me dar condições plenas de superar todos os obstáculos na luta pelos meus ideais e por ter posto em minha vida pessoas importantes, que de alguma forma me ajudaram muito nessa caminhada.

Aos meus pais, que passando por cima de dificuldades, me deram condições de estudar, além de todo apoio possível durante minha vida.

Ao Professor Dr. Jaime Gilberto Duduch pela oportunidade, orientação, paciência, ensinamentos e incentivos indispensáveis a realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Renato Goulart Jasinevicius, pelos valiosos ensinamentos, e por ter disponibilizado grande parte de seu tempo para que esse trabalho fosse realizado.

A Professora Dr^a. Luciana Montanari, pela orientação e incentivo durante a jornada do mestrado.

Minha namorada Fernanda pelo apoio, incentivo e paciência durante todos meus anos de trabalho e estudo na área de engenharia.

Meu irmão Daniel pelas dicas e incentivo para a concretização deste trabalho.

A Professora e futura cunhada Fabiana pelo incentivo e pelos indispensáveis ensinamentos.

Meu futuro sogro e sogra Carlos e Neiva pelo apoio e incentivo.

Aos amigos de laboratório, Danver, Laércio Júnior e João Paulo pela ajuda e companheirismo durante toda a jornada do Mestrado.

Aos amigos de trabalho da empresa ZF-Sistemas de Direção que sempre torceram por mim.

A todos que, de forma direta ou indireta contribuíram para que este trabalho fosse concluído.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xiii
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
1- INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Considerações Iniciais.....	1
1.2 – Formulação do problema.....	1
1.3 – Objetivos.....	2
1.4 – Justificativa.....	2
1.5 – Estrutura da dissertação.....	3
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 – Processos de usinagem abrasiva de materiais frágeis.....	5
2.1.1 - Lapidação.....	5
2.1.2 – Polimento.....	8
2.1.3 – Retificação.....	9
2.1.4 – Indentação ou Endentação.....	12
2.1.5 – Riscamento.....	15
2.2 - Usinagem de Ultraprecisão.....	17
2.2.1 - Introdução.....	17

2.2.2 - Desenvolvimento trazido pela Usinagem de Ultraprecisão.....	18
2.2.3 - Torneamento de ultraprecisão de matérias frágeis.....	19
2.2.4 - Ferramenta de ponta única de diamante.....	22
2.2.5 – Torno de ultraprecisão ASG 2500.....	24
2.3 - Modos de Remoção de Cavaco de Materiais Frágeis.....	24
2.4 – Modelos de corte para o torneamento de materiais frágeis.....	32
2.4.1 - Modelo de Blake (1988).....	32
2.4.2 - Modelo de Blackley.....	38
2.4.3 - Modelo de Duduch.....	40
2.5 – Transição dúctil-frágil de materiais frágeis de cavaco na usinagem de materiais frágeis.....	43
2.6- O Carbetto de Tungstênio.....	47
2.6.1- Características e propriedades do Carbetto de Tungstênio.....	47
2.6.2- Produção do pó de Carbetto de Tungstênio.....	48
3- METODOLOGIA	53
3.1 – Introdução.....	53
3.2 - Caracterização do material.....	53
3.2.1 - Análise da amostra utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura....	53
3.2.2 - Medição da dureza da amostra.....	55
3.2.3 - Análise de microindentações.....	55

3.3 – Ensaio de usinagem.....	56
3.3.1 – Máquina e ferramenta utilizada nos ensaios.....	56
3.3.2 - Preparo da amostra.....	58
3.3.3 - Definição dos parâmetros de usinagem.....	59
3.2.4 - Usinagem da amostra de Carbetto de Tungstênio WC.....	61
4- RESULTADOS.....	63
4.1 – Considerações.....	63
4.2 – Resultados de caracterização do material.....	64
4.2.1 – Resultados do ensaio de dureza	64
4.2.2 – Resultados da análise das microindentações.....	64
4.3 - Resultados da usinagem de ultraprecisão em Carbetto de Tungstênio.....	67
4.3.1 - Análise da superfície da amostra.....	67
4.3.2 - Análise dos cavacos.....	92
4.3.3 - Análise da aresta da ferramenta.....	94
4.3.4 - Análise visual da superfície da amostra.....	98
5- CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	99
5.1 – Conclusões	99

5.1 - Sugestões para trabalhos futuros.....	101
---	-----

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Modelo Simplificado do processo de lapidação.....	6
FIGURA 2.2	Máquina de polimento.....	9
FIGURA 2.3	Modelo esquemático da formação de cavaco em retificação de matérias frágeis.....	10
FIGURA 2.4	Distribuição da pressão de contato elástico para vários tipos de indentadores (a) carga pontual, (b) Sharp (afiado), (c) punção plano e, (d) indentador esférico (ou cilíndrico); P caracteriza o carregamento aplicado na indentação e “a” a extensão do contato.....	13
FIGURA 2.5	Modelo para o problema de indentação elástico – plástica.....	14
FIGURA 2.6	Formação de sulco em ensaio de riscamento.....	16
FIGURA 2.7	Classificação geral dos processos de usinagem em função do tempo...	17
FIGURA 2.8	Ferramenta de diamante utilizada no processo de usinagem de ultraprecisão de materiais frágeis.....	20
FIGURA 2.9	Ferramenta de diamante utilizada no processo de usinagem de ultraprecisão de materiais frágeis.....	23
FIGURA 2.10	Modos de remoção frágil e dúctil em uma amostra de silício monocristalino (JASINEVICIUS, 1998).....	25
FIGURA 2.11	Tipos de trincas que podem surgir durante a usinagem da materiais frágeis (DUDUCH, 1993).....	26

FIGURA 2.12	a) ações mais facilmente fraturadas no Si (100): [010], [100], [0i0] e [i00]; b) No Si (111): [112], [121], [211], [i2i], [2ii], [ii2].....	28
FIGURA 2.13	Vista bidimensional do corte ortogonal, mostrando as trincas remanescentes de cortes anteriores (JASINEVICIUS, 1998).....	29
FIGURA 2.14	Mecanismo de remoção pobre – “ploughing” (JASINEVICIUS, 1998).....	30
FIGURA 2.15	Geometria de corte vista no plano normal à direção de corte. A seção transversal do cavaco na região do ombro não cortado possui espessura efetiva variável. R_p é o raio da ponta da ferramenta e a_p , a profundidade de corte.....	33
FIGURA 2.16	Vista da seção do cavaco em escala real, mostrando a variação de T_{ef} e, função de teta ao longo da ferramenta (BLAKE & SCATTERGOOD, 1990).....	34
FIGURA 2.17	Modelo para usinagem dúctil. Para t_{em} maior que t_c a zona de danos se forma ao longo da ponta da ferramenta. O corte dúctil sem fratura ocorre somente ao longo da porção abaixo da seção transversal do cavaco, onde t_{em} é menor que t_c . A profundidade da zona danificada é denotada por Y_c (BLAKE & SCATTERGOOD, 1990).....	35
FIGURA 2.18	Fotomicrografia e diagrama esquemático do ombro não cortado e da superfície usinada. A severidade dos danos por microtrincas é maior próximo ao topo do ombro; a superfície foi gerada no regime dúctil, apesar dos danos observados no ombro não cortado.....	36
FIGURA 2.19	Diagrama esquemático de geometria de corte utilizada para derivar equações.....	37

FIGURA 2.20	Danos induzidos por fratura sobre a superfície foram observados por meio de microscopia eletrônica de varredura (magnificação 2.000x)...	37
FIGURA 2.21	Vista lateral do modelo mostrado na figura 2.10. O movimento de avanço está ortogonal ao plano. Isto pode ser considerado como corte quase ortogonal com profundidade de corte $a_p = t_{ef}$, na posição correspondente teta ao longo da ponta a ferramenta. Danos por microfratura iniciam na zona de deformação elastoplástica quando $t_{ef} > t_c$	38
FIGURA 2.22	Geometria de corte utilizada para derivar modelo de corte. A projeção é feita ao longo da direção de corte com profundidade de corte efetiva, sendo a distância crescente a partir do centro da ferramenta....	39
FIGURA 2.23	Modelo proposto por Duduch (1993) a) imagem da ponta da ferramenta utilizada por Duduch (1993); b) geometria da ponta da ferramenta de diamante; c) geometria de corte com ferramenta inclinada em relem regime ação à superfície usinada; e d) exemplo de superfície usinada em regime dútil.....	41
FIGURA 2.24	Micrografia da amostra de silício usinada. Profundidade de corte de 7 micrômetro, avanço de 5micro/revolução e sem inclinação entre a aresta de corte da ferramenta e a da superfície da amostra.....	42
FIGURA 2.25	Modelo de propagação de trincas em materiais frágeis.....	43
FIGURA 2.26	Modelo de remoção do cavaco segundo Nakasuji <i>et al.</i> (1990).....	45
FIGURA 2.27	Estrutura Hexagonal Compacta para o Carbeto de tungstênio.....	47
FIGURA 2.28	Fluxograma do processo básico de fabricação de um componente de metal duro do tipo WC-Co (Fonte: Adaptado de GUTIÉRREZ, 2002).....	49

FIGURA 2.29	Propriedades mecânicas em função do teor de Carbono – Fases h e grafita livre. (Fonte: Adaptado de GUTIÉRREZ, 2002).....	50
FIGURA 2.30	Diagrama de fases do W-C.....	51
FIGURA 3.1	Gráfico gerado pelo Microscópio Eletrônico de Varredura do IQSC....	54
FIGURA 3.2	Perfilômetro WYKO – NT1100 do laboratório de engenharia de precisão da Escola de Engenharia de São Carlos utilizado para análise das microendentações.....	56
FIGURA 3.3	Torno de Ultraprecisão do Laboratório de Engenharia de Precisão da Escola de Engenharia de São Carlos.....	57
FIGURA 3.4	Ferramenta Monocortante com ponta de diamante.....	57
FIGURA 3.5	Representação do nivelamento da amostra no desempenho utilizando relógio apalpador.....	59
FIGURA 3.6	Representação das faixas de usinagem na amostra de WC.....	61
FIGURA 3.7	Foto retirada durante a usinagem da amostra de Carbetto de Tungstênio.....	62
FIGURA 3.8	Representação do procedimento experimental no torno de ultraprecisão.....	62
FIGURA 4.1	Diagonal e profundidade da Microindentação aplicando carga de 200g.....	65
FIGURA 4.2	Diagonal e profundidade da Microindentação aplicando carga de 500g.....	66

FIGURA 4.3	Resultado de usinagem da Faixa 1.....	68
FIGURA 4.4	Resultado de usinagem da Faixa 2.....	69
FIGURA 4.5	Resultado de usinagem da Faixa 3.....	70
FIGURA 4.6	Resultado de usinagem da Faixa 4.....	72
FIGURA 4.7	Resultado de usinagem da Faixa 5.....	73
FIGURA 4.8	Resultado de usinagem da Faixa 6.....	74
FIGURA 4.9	Resultado de usinagem da Faixa 7.....	75
FIGURA 4.10	Foto comparativa do torneamento de ultraprecisão entre as profundidades de corte de 1,00 e 2,00 μm	76
FIGURA 4.11	Imagem comparativa no perfilômetro óptico do torneamento de ultraprecisão entre as profundidades de corte de 1,00 e 2,00 μm	77
FIGURA 4.12	Resultado de usinagem da Faixa 8.....	78
FIGURA 4.13	Resultado de usinagem da Faixa 9.....	79
FIGURA 4.14	Resultado de usinagem da Faixa 10.....	80
FIGURA 4.15	Resultado de usinagem da Faixa 11.....	81
FIGURA 4.16	Resultado de usinagem da Faixa 12.....	82
FIGURA 4.17	Resultado de usinagem da Faixa 13.....	83

FIGURA 4.18	Resultado de usinagem da Faixa 14.....	84
FIGURA 4.19	Imagem gerada pelo M.E.V com os seguintes parâmetros: profundidade de corte = 2,00 μ m; avanço = 1,25 μ m / revolução Rotação = 1000RPM.....	85
FIGURA 4.20	Imagem gerada pelo M.E.V com os seguintes parâmetros: profundidade de corte = 2,00 μ m; avanço = 2,50 μ m / revolução Rotação = 1000RPM.....	86
FIGURA 4.21	Imagem gerada pelo M.E.V com os seguintes parâmetros: profundidade de corte = 5,00 μ m; avanço = 5,00 μ m / revolução Rotação = 1000RPM.....	86
FIGURA 4.22	Superfície polida da amostra de WC em perspectiva isométrica com rugosidade superficial de 20,22 nm.....	87
FIGURA 4.23	Comparativo entre Torneamento de Ultraprecisão X Polimento. (a)Superfície com aplicação do torneamento de ultraprecisão (Ra=13,60nm), (b)Superfície polida da amostra conforme recebido (Ra=20,22nm).....	88
FIGURA 4.24	Gráfico dos resultados de rugosidade (Ra) em função da profundidade de corte e avanço.....	91
FIGURA 4.25	Cavaco na ponta da ferramenta gerado pelo processo de usinagem com ferramenta CO60WG. Ampliação 76X.....	92
FIGURA 4.26	Cavaco gerado pelo processo de usinagem com ferramenta CO60WG. Ampliação 6800 X.....	93
FIGURA 4.27	Superfície usinada com ferramenta CO60LG / Ampliação 113 X.....	93

FIGURA 4.28	Superfície usinada com ferramenta CO60LG / Magnificação 2000 X..	94
FIGURA 4.29	Exemplo de aresta de corte de uma ferramenta nova. Ampliação 500X.....	95
FIGURA 4.30	Aresta de corte de uma ferramenta CO60LG ($\gamma=0^\circ$) após processo de usinagem. Ampliação 50X.....	96
FIGURA 4.31	Aresta de corte de uma ferramenta CO60LG ($\gamma=0^\circ$) após processo de usinagem. Ampliação 500X.....	97
FIGURA 4.32	Aresta de corte de uma ferramenta CO60LG ($\gamma=0^\circ$) após processo de usinagem Ampliação 500X.....	97
FIGURA 4.33	Foto da superfície usinada da amostra de Carbetto de Tungstênio.....	98

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Materiais utilizados na usinagem de ultraprecisão.....	20
TABELA 2.2	Propriedades do Carbeto de Tungstênio.....	48
TABELA 3.1	Condições de corte e geometria da ferramenta utilizados nos ensaios..	60
TABELA 4.1	Resultados de dureza obtidos da amostra de carbeto de tungstênio.....	64
TABELA 4.2	Resumo dos resultados obtidos com ferramenta CO60LG (saída 0°)...	89
TABELA 4.3	Resumo dos resultados obtidos com ferramenta CO60WG (saída - 25°).....	90

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a_p	Profundidade de corte
b	Largura da aresta cortante
C	Carbono
C.F.C	cúbica de face centrada
CNC	Comando numérico computadorizado
Co	Cobalto
d_c	Máxima profundidade de corte frágil
E.A	Emissão acústica
ECI	Ensaio de corte interrompido
E	Módulo de elasticidade
f	Avanço por rotação
Ge	Germânio
H	Dureza
HC	Hexagonal compacto
HV	Dureza Vickers
k_c	Resistência à fratura
IQSC	Instituto de Química de São Carlos
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
P	Carregamento aplicado na indentação
Ra	Rugosidade média
Rq	Rugosidade média quadrática

R_t	Rugosidade total
r_e	Raio da ponta da ferramenta
r_p	Raio da ponta da ferramenta
SiC	Carbeto de Silício
Si	Silício
t_c	Espessura crítica do cavaco
t_{amorfo}	Espessura da camada amorfa
t_e	Espessura do cavaco
$t_{máx}$	Espessura máxima do cavaco
USP	Universidade de São Paulo
W	Tungstênio
WC	Carbeto de Tungstênio
W_d	Distancia do centro da ferramenta à região do ombro não cortado
Ω_w	Velocidade periférica dos wafers
Ω_p	Velocidade periférica do polidor
Ω_c	Velocidade periférica do carrossel
ε	Aresta cortante
γ	Ângulo de saída
α_1	Ângulo de folga
α_2	Ângulo de folga extra
y_c	Profundidade crítica de corte
Ψ	Constante adimensional

RESUMO

Gonçalves, A. M (2009). *Usinabilidade do carbeto de tungstênio no torneamento com ferramenta de diamante*. 104 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho apresenta o estudo da usinabilidade do carbeto de tungstênio utilizando ferramenta de ponta única de diamante em máquina-ferramenta de ultraprecisão, em função de suas características de dureza e potencial uso para a fabricação de micromoldes. O carbeto de tungstênio foi submetido a testes de usinagem para a determinação dos parâmetros e condições de corte para a obtenção do regime dúctil. Com base nos resultados experimentais, concluiu-se que, para os avanços da ordem de $1\mu\text{m}/\text{revolução}$, a profundidade de corte (ap) não influencia significativamente no resultado de rugosidade, e para avanços da ordem de $3\mu\text{m}$, observou-se a formação de trincas na superfície usinada. Além disso, para profundidades de corte maiores que $2\mu\text{m}$ as ferramentas começaram a apresentar lascamento. Para avanços da ordem de $3\mu\text{m}/\text{revolução}$ a profundidade de corte influencia com grande significância no resultado de rugosidade. O torneamento do carbeto de tungstênio usando ferramenta de diamante mostrou-se uma opção viável à produção de superfícies em termos de qualidade óptica, porém, devido à alta dureza deste material (aproximadamente 4000HV) o torneamento mostrou ser um processo com condições limitadas para a produção em série de componentes em função da baixa taxa de remoção de material permitida. É possível que a retificação possa apresentar taxas de remoção maiores, mesmo assim garantindo a qualidade superficial atingida pelo torneamento, ou ainda, a retificação possa ser usada como um processo no desbaste do carbeto de tungstênio seguido do torneamento de ultraprecisão como uma opção viável a produção em série de peças. Portanto, para a obtenção de uma superfície de carbeto de tungstênio sem danos e com acabamentos da ordem de 10nm, a profundidade e avanço não devem ser superiores a $2,00\mu\text{m}$ e $1,00\mu\text{m}/\text{revolução}$, respectivamente, usando uma ferramenta de diamante nova com ângulo de saída de 0° ou -25° e uma máquina-ferramenta de alta precisão.

Palavras chaves: usinagem de ultraprecisão, torneamento com ferramenta de diamante, carbeto de tungstênio, materias frágeis.

ABSTRACT

Gonçalves, A. M (2009). Single Point Diamond Turning of the Tungsten Carbide. 104 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The single point diamond turning of the Tungsten Carbide is presented. The motivation for this study is the material's high hardness and potential application for micromolds. A Tungsten Carbide sample was subjected to tests for the determination of cutting parameters to achieve the ductile regime of material removal. Based on experimental results it was concluded that for the feedrate of the order of $1\mu\text{m}/\text{revolution}$, the depth of cut did not affect significantly the surface roughness and for feedrates of the order of $3\mu\text{m}/\text{revolution}$, the depth of cut influenced the results of roughness greatly. Moreover chipping of the cutting edge occurs for depths of cut of $2\mu\text{m}$. The diamond machining of Tungsten Carbide tool using diamond proved to be a viable option for the production of surfaces in terms of optical quality, but due to the high hardness of this material (approximately 4000HV) showed to be limited for the production of components due to the low material removal rate. It is possible that precision grinding may provide higher material removal rates along with the acceptable surface quality. Therefore, to obtain a damage free surface in Tungsten Carbide with surface finish in the order of 10 nm, the cutting depth and feedrate should be smaller than $2.00\mu\text{m}$ and $1.00\mu\text{m} / \text{revolution}$, respectively, using a new diamond tool with rake angle of 0° or -25° and a precision high stiffness machine tool .

Key Word: ultra-precision machining, single point diamond turning, tungsten carbide, brittle materials.

CAPÍTULO 1

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Iniciais

O torneamento de ultraprecisão é o processo onde se utiliza uma ferramenta de diamante monocristalino em uma máquina-ferramenta com elevada rigidez e com controle ultrapreciso de posicionamento. Estas máquinas são especialmente projetadas para produzir acabamentos em superfícies sob condições ambientais controladas. O campo de aplicação da usinagem com diamante monocristalino pode ser dividido em três segmentos: a fabricação de elementos ópticos reflexivos (como espelhos de alto desempenho para sistemas Laser), elementos ópticos transmissivos e componentes mecânicos.

A tecnologia de torneamento com ferramenta de diamante permite, por exemplo, a fabricação de superfícies anesféricas complexas assim como tolerâncias de forma e acabamento da ordem de nanômetro, contando ainda com a vantagem de redução de custos em relação ao polimento convencional (BLOUGH et al., 1997).

1.2 – Formulação do Problema

O estudo da usinagem de materiais frágeis vem da necessidade de se produzirem produtos economicamente viáveis e com alta qualidade de superfície e forma. Nos últimos anos o desenvolvimento da tecnologia de novos materiais com estruturas cristalinas complexas e alta

dureza, requer técnicas de corte altamente eficientes, já que estes materiais são mais difíceis de usinar do que os tradicionais.

O torneamento de materiais frágeis com ferramenta de ponta única de diamante no regime dúctil tem recebido grande atenção dos pesquisadores de todo o mundo, pois este processo traz uma diminuição no tempo de produção, trazendo vantagens econômicas a manufatura desses produtos (PURQUERIO et al., 1994).

1.3 – Objetivos

Estudar a usinabilidade do carboneto de tungstênio ou carbetto de tungstênio (WC), sendo este considerado um material tipicamente frágil. Serão realizados ensaios de torneamento com ferramenta de ponta única de diamante em máquina de ultraprecisão com o objetivo de conhecer algumas de suas características no processo de usinagem, determinar experimentalmente as variáveis de entrada mais adequadas para a obtenção do melhor acabamento, rugosidade e integridade superficial do material.

1.4 – Justificativa

O grande interesse em aperfeiçoar esta tecnologia de fabricação para aplicação em materiais como cerâmica, vidros ópticos e monocristais semicondutores, surgiu da hipótese de que se este processo é capaz de produzir superfícies, a partir de metais dúcteis, com formas complexas, baixas tolerâncias de forma e posição e excelente acabamento, então poderia ser considerado um processo com fortes vantagens para aplicação em materiais frágeis (VENKATESH et al., 1995).

Materiais frágeis podem ser definidos como sólidos com ligações covalentes/iônicas susceptíveis a danos superficiais devido a concentrações localizadas de tensão quando em contato com objetos afiados e duros, tais como uma ferramenta de diamante, durante um processo de usinagem.

A produção de superfícies especulares em materiais frágeis usando máquina ferramenta de ultraprecisão é uma tecnologia que cresce a cada dia, entretanto, materiais frágeis como a cerâmica, os vidros e cristais são difíceis de serem usinados devido a sua baixa resistência à fratura. As máquinas ferramentas de alta precisão melhoram o controle dos parâmetros de usinagem e produzem o que tem sido chamado de “usinagem em regime dúctil”. Neste regime, é obtida uma superfície com excelente qualidade óptica livre de microfraturas (BLACKLEY & SCATTERGOOD, 1990).

Neste trabalho será mostrado que o torneamento com ferramenta de diamante monocristalino do carbeto de tungstênio é uma opção viável à produção de superfícies especulares como uma alternativa ao uso dos processos tradicionais como a lapidação, o polimento e a retificação.

1.5 – Estrutura da Dissertação

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica. O enfoque é dado aos aspectos gerais do projeto e também as técnicas existentes utilizadas no campo da usinagem de ultraprecisão.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada para os ensaios, onde os experimentos, máquinas, ferramentas e material utilizado estão descritos detalhadamente.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados. As avaliações do efeito das condições de corte sobre o estado da superfície e mecanismos envolvidos no experimento são encontradas neste capítulo.

Por fim, no capítulo 5, serão apresentadas as conclusões como também as sugestões para trabalhos futuro.

CAPÍTULO 2

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Processos de usinagem abrasiva de materiais frágeis.

2.1.1 – Lapidação

A lapidação é um processo de usinagem que tem como objetivo a obtenção dos seguintes resultados:

- a) Elevada exatidão de dimensões;
- b) Correção de pequenas imperfeições de forma;
- c) Refinamento da superfície final;
- d) Excelente acoplamento entre superfícies lapidadas.

Em operações de lapidação é gerado menos calor do que em outras operações de acabamento. Quando ambos os lados de uma peça plana são lapidadas numa mesma operação, é conseguida exatidão de planicidade e paralelismo e, na remoção da mesma quantidade de material de ambos os lados de uma de uma determinada peça de maneira simultânea, algumas tensões inerentes à peça são igualmente atenuadas. Tanto nas operações manuais quanto em máquinas semi-automáticas, os resultados finais dependem de vários fatores:

- a) Tipo do material do lapidador;
- b) Velocidade de lapidação;
- c) Material a ser lapidado;
- d) Maneira que o processo é realizado;

- e) Tamanho do grão abrasivo;
- f) Pressão de lapidação e outros (PAGOTTO, 1998).

A relação entre estes parâmetros e seus efeitos no processo global não são claramente conhecidos devido à complexidade do processo. A FIGURA 2.1 mostra um modelo simplificado de lapidação apresentando duas formas da ação do grão abrasivo no processo. No primeiro caso o grão gira sem deslizar enquanto que o segundo caso apenas desliza.

FIGURA 2.1 - Modelo Simplificado do processo de lapidação

No primeiro caso, não há produção de cavaco e a deformação elástico/ plástico ocorre repetidamente causando tensões e, finalmente a micro fratura da peça.

No segundo caso, micro cavacos são produzidos devido à operação de corte. A razão entre os grãos que giram e os que deslizam surtem efeito na eficiência do processo, sendo que a razão ótima para uma boa eficiência é difícil de prognosticar, pois são muitas as variáveis envolvidas. Além disso, como o tamanho e a forma dos grãos são aleatórios e mudam continuamente, é necessária uma aproximação experimental para se fazer melhor análise do processo de lapidação (PAGOTTO, 1998).

Os grãos de lapidação mais comumente usados para amostras de carbetos de tungstênio são “corborundum” (Al_2O_3), carbetos de silício (SiC) ou misturas especialmente preparadas tais como Al_2O_3 e ZrO_2 . Abrasivos de diamante e carbetos de boro desempenham papel

secundário devido ao seu alto custo. O tamanho do grão varia de 100 a 5 μ m (acabamento final).

A remoção de material durante a lapidação de carbetos de tungstênio acontece através de trincas e fratura do material cristalino. Isto é causado por causa dos grãos abrasivos que rolam entre a superfície da amostra e o lapidador. No processo de lapidação os tamanhos dos grãos abrasivos ditam a taxa de remoção de material. Os grãos pequenos, por exemplo, não contribuem para o processo de remoção (TONSHOFF, HK. et al, 1990).

Grandes progressos nesta área foram conseguidos décadas passadas quando foram feitos modelos experimentais focalizando a interação entre um único grão abrasivo com a superfície frágil da peça. Esses experimentos envolvem indentações quase estáticas, retificação com multi-pontas. Descobriu-se que para materiais frágeis existe uma carga normal máxima na partícula abrasiva onde, abaixo dela, o material é removido da superfície da peça através de deformação plástica. Acima desta carga máxima, ocorrem trincas que podem ser caracterizadas através de estudos de indentação Vickers. Embora a lapidação seja um processo importante de acabamento abrasivo, comparado o polimento e retificação de materiais frágeis, muito pouco se conhece do ponto de vista fundamental.

Devido à importância dos processos abrasivos em relação ao desgaste, a maioria dos experimentos é feita em metais. Os resultados podem ser usados para se descrever a lapidação de materiais frágeis no regime dúctil, isto é, o regime onde o componente da força normal por abrasivo está abaixo da carga máxima para ocorrer à fratura. O limite entre este regime e o polimento é difuso, entretanto várias aplicações em lapidação levam à fratura da peça.

Um dos trabalhos mais importantes em lapidação de materiais frágeis foi feito por Izumitani e Suzuki. Estes pesquisadores usaram o vidro como material e descobriram que a dureza de lapidação é uma medida de resistência à fratura dos grãos abrasivos e relacionam este comportamento à dureza de indentação. Um grande progresso tem sido feito no campo da teoria de indentação e na aplicação desta teoria na retificação de materiais frágeis. (BUIJS, 1993).

A rugosidade na lapidação de materiais frágeis é da ordem de $14\mu\text{m}$ com baixa taxa de remoção de material, sendo necessário polimento posterior para se conseguir acabamento espelhado com rugosidade na ordem de nanômetros.

VANTAGEM: Economia em processos de grandes volumes quando são usados abrasivos de baixo custo.

DESVANTAGEM: O processo de lapidação oferece como desvantagem a produção de numerosas microindentações em toda a área de atuação do grão abrasivo já que este está livre e imerso em solução líquida, produzindo trincas detectáveis e deslizamentos ocasionais que crescem com a dureza. (PAGOTTO, 1998).

2.1.2 – Polimento

O polimento torna-se necessário em materiais frágeis se, após a lapidação, a rugosidade não estiver abaixo do valor desejado (geralmente abaixo de $10\mu\text{m}$). No processamento de materiais frágeis, o polimento dá a peça uma textura especular, necessária a várias aplicações.

Materiais semicondutores, dependendo da aplicação, requerem polimento em vários estágios. Inicialmente na superfície do substrato para se removerem defeitos superficiais, litografia e ataque químico.

As técnicas disponíveis ao polimento do carbetos de tungstênio são as seguintes:

- Polimento de alta precisão usando-se princípio hidrodinâmico;
- Polimento reológico;
- Polimento mecânico.

A FIGURA 2.2 mostra uma máquina de polimento triaxial onde os mancais são todos hidrodinâmicos.

FIGURA 2.2 - Máquina de polimento

Uma técnica popular de fixação da amostra é, pressionar a bolacha em direção a um disco poroso aderindo-se a cabeça de polimento através de forças adesivas fixado por um anel.

VANTAGEM: Boa remoção de material quando usa a técnica de polimento mecânico-química.

DESVANTAGEM: Alto custo e produtividade limitada.

2.1.3 – Retificação

A retificação ou usinagem abrasiva refere-se ao processo para remoção de material na forma de pequenos cavacos pela ação mecânica de partículas abrasivas de contorno irregular. Estas partículas estão vinculadas a uma pedra circular através de um material ligante

formando a ferramenta de corte na retificação, o rebolo. A FIGURA 2.3 mostra com clareza o princípio do processo de retificação.

FIGURA 2.3 - Modelo esquemático da formação de cavaco em retificação de matérias frágeis.

Em retificação de ultraprecisão de materiais frágeis como as cerâmicas, vidros e outros, é usado o rebolo de diamante. Na indústria usa-se o rebolo de diamante na usinagem de ligas difíceis de serem usinadas, onde outros abrasivos quebrariam rapidamente e gerariam um alto custo na reposição da ferramenta.

A remoção de material na retificação de matérias frágeis é feita através de deformação microscópica ou fratura no ponto onde o grão abrasivo age no instante da usinagem. O material é removido em diferentes caminhos dependendo do tamanho e densidade de defeitos no material, tais como falhas, trincas e o tamanho do campo de tensão. Quando um campo de tensão formado pela aresta de corte do grão é menor do que os defeitos, o material será removido através de deformação plástica. Por outro lado, quando o campo de tensão é maior do que estes defeitos a remoção de material será feita através de micro fratura frágil localizada.

A fratura frágil do material é acelerada pela seleção das condições de retificação que fornece a maior área de seção transversal média das arestas de corte efetivas. Esta condição é

conseguida com pequena profundidade de corte e alta velocidade da peça numa taxa constante de material (INASAKI, 1987).

Na manufatura dos componentes de carbetos de tungstênio, a baixa resistência à tensão, precisa ser considerada. Deste modo, é comum o uso de abrasivos de diferentes tamanhos de grão para que o tamanho destes grãos possa ser reduzido gradualmente de acordo com o progresso do processo de retificação. Através deste método o número de trincas será reduzido.

Como na retificação dúctil, o polimento acontece através de remoção plástica de material. Esta plasticidade é responsável pela geração de uma superfície uniforme e lisa.

Infelizmente, no polimento, esta melhora na rugosidade é acompanhada de uma diminuição na exatidão de contorno da peça. Além disso, o polimento é um processo mais caro do que a retificação, pois exige mão-de-obra especializada (BIFANO, et al., 1998). Os mecanismos de retificação e polimento são similares, ambos contêm partículas abrasivas orientadas aleatoriamente para a remoção de material. A diferença básica entre estes dois processos é que na retificação são usados abrasivos fixos enquanto que no polimento usam-se abrasivos livres.

Para retificar no regime dúctil de material frágil faz-se necessário um estudo da correlação entre os parâmetros da exatidão superficial final e o desempenho óptico, análise das condições superficiais, redução e isolamento de calor e vibrações, seleção do material de trabalho de fixação da peça. Para isso há a necessidade de se estabelecer uma tecnologia de retificação de ultraprecisão para que se possibilite o progresso de geração de superfícies ópticas esféricas com alta exatidão, como um sistema integrado de tecnologias (PAGOTTO, 1998).

VANTAGEM: A remoção de material é maior quando comparado com o torneamento de ponta única de diamante.

DESVANTAGEM: dependendo da aplicação, há a necessidade de se fazer polimento após a retificação para que se consiga excelente qualidade no acabamento superficial.

As primeiras pesquisas realizadas com materiais frágeis, procurando viabilizar o processo de corte, trabalhavam com o conceito de fratura frágil utilizando-se de resultados obtidos através de estudos complexos de indentação e riscamento. Estes resultados demonstraram que a remoção de material através de escoamento plástico poderia ser conseguida a profundidades de corte submicrométricas comparáveis com, por exemplo, ao diâmetro médio de partículas abrasivas usadas para o polimento dessas peças.

2.1.4 – Indentação ou Endentação

Um teste de indentação consiste na interação entre dois corpos. O primeiro é o material em estudo (amostra) e o segundo é o elemento mecânico com geometria pré-definida, chamado de indentador, que é submetido a uma força variável ou carga (LEDO, 1997).

Materiais frágeis são, por definição, caracterizados por apresentar deformação elástica até o ponto de fratura. Em alguns casos, as tensões e deformações próximas à resistência teórica da estrutura molecular podem ser sustentadas sem sinais detectáveis de deformação permanente. Os materiais que estão dentro desta categoria são aqueles com grandes concentrações de ligações covalentes, estes tipos de materiais possuem grande resistência aos processos de deformação por cisalhamento.

Porém, a maioria dos materiais frágeis, podem ser sujeitos a compressões hidrostáticas suficientemente grandes para inibir o início da fratura, se deformar de maneira irreversível. A indentação fornece meios de demonstrar este fenômeno.

Para o entendimento da fratura ocorrida por indentação em materiais frágeis, há a necessidade de conhecimento detalhado dos campos de tensão dentro de um sistema carregado. Para isso, é necessário a visão profunda da natureza da zona de contato. A forma do indentador é um fator de vital importância na determinação das condições de contorno para o campo. A FIGURA 2.4 apresenta as distribuições de pressão de contato elástico para vários

formatos de indentadores. Espera-se alto gradiente de tensões ao redor do contato elástico entre o indentador e a peça.

FIGURA 2.4 - Distribuição da pressão de contato elástico para vários tipos de indentadores

(a) carga pontual, (b) Sharp (afiado), (c) punção plano e, (d) indentador esférico (ou cilíndrico); P caracteriza o carregamento aplicado na indentação e “ a ” a extensão do contato.

É importante distinguir dois tipos extremos de campos de indentação:

- Campo “Blunt”, no qual a pressão de contato aumenta monotonicamente com a carga de forma que a deformação anterior à fratura seja completamente elástica.
- Campo “Sharp”, o qual a pressão de contato é maior do que necessário para produzir deformação irreversível em todos os estágios do carregamento.

A intensidade do campo de tensão no primeiro caso é controlada pelo módulo de elasticidade e no segundo caso pelo módulo de elasticidade e dureza.

Com a diminuição do raio do indentador, há aumento na deformação inelástica, no limite de raio zero, como é o caso dos indentadores Sharp Vickers ou piramidal Knoop, tal deformação torna-se inevitável.

O formato dos indentadores Sharp Vickers aproxima-se da forma da ferramenta na usinagem de materiais frágeis, por essa razão, o campo de indentação Sharp e o princípio de fratura por indentação serão discutidos neste trabalho como uma explicação aceitável ao princípio de remoção de material na usinagem de materiais frágeis.

No contato Sharp, uma carga finita não pode ser suportada pelo ponto de contato sem exceder o limite elástico. O campo de tensão abaixo do indentador é consideravelmente mais complexo comparado ao campo blunt, por isso, modelos elástico-plásticos simplistas tem de ser desenvolvidos para se analisarem os mecanismos de fratura.

O modelo mais adotado e simples neste caso é o da cavidade interna expandida, o qual diz que o volume esférico pressurizado (impressão do indentador) induz plasticidade num volume anular imediatamente após o contato (zona de deformação), como mostrado na FIGURA 2.5, à frente da região plástica permanece uma matriz elástica infinita. Portanto, dependendo da carga aplicada ao indentador, forma-se uma pequena região deformada plasticamente (PAGOTTO, 1998).

Na FIGURA 2.5, a região mais escura mostra o núcleo hidrostático, a região hachurada mostra a zona plástica, formando a matriz elástica.

FIGURA 2.5 - Modelo para o problema de indentação elástico – plástica.

A fratura padrão produzida na indentação Sharp tem algumas variações geométricas, mas dois tipos básicos de trincas são geralmente distinguíveis: trincas médias /radiais e trincas laterais.

LAWN e EVANS (1977) propuseram que há uma carga de indentação em indentadores Sharp para que ocorra a iniciação de fratura na qual a profundidade crítica de penetração pode ser calculada como:

$$t_c = \Psi \cdot \left(\frac{E}{H}\right) \cdot \left(\frac{K_c}{H}\right)^2 \quad (1)$$

onde Ψ é uma constante dependente da geometria do indentador, E é o módulo de elasticidade, H é a dureza e K_c a resistência à fratura.

Em baixas cargas de indentação ocorre pequena deformação plástica sem fratura ao redor da microindentação de vidros e cerâmicas. A deformação plástica também é observada em usinagem abrasiva, riscamento e torneamento com ferramenta de diamante em baixas cargas/profundidades de corte sugerindo que a remoção plástica de materiais frágeis ocorre dentro de um pequeno volume deformado sem a ocorrência de trincas sem restrição à existência de fluxos superficiais (PAGOTTO, 1998).

Apesar da microindentação apresentar dinâmica e geometria diferente da usinagem, testes em torneamento com ferramenta de diamante e riscamento mostram que a microindentação é um modelo aceitável à usinagem de materiais frágeis.

2.1.5 – Riscamento

Este processo requer dois modos de movimento ferramenta/peça:

- Movimento retilíneo longo, na ordem de décimos de milímetros;
- Movimento retilíneo ou angular curto, na ordem de 1 μm ou mais.

O riscamento é um processo de carga constante que envolve o arrastamento de uma ferramenta de diamante através da superfície da peça, formando alguns sulcos, como mostrado na FIGURA 2.6.

FIGURA 2.6 - Formação de sulco em ensaio de riscamento

Embora o riscamento seja considerado diferente de um torneamento com ferramenta de diamante na maneira pela qual a ponta da ferramenta se aproxima de uma profundidade particular no material da peça, ele representa um processo intermediário entre a indentação e a usinagem. Na usinagem, aplica-se no material uma profundidade de corte fixa e as forças de corte são funções dessa profundidade. Já no riscamento, aplica-se uma força ou carga constante fixa e a profundidade de corte é uma função desta força. Porém, assim que a ferramenta atinge uma profundidade particular, considerações práticas mostram que o riscamento e o torneamento com diamante são muito parecidos.

Desta maneira, o estudo do processo de riscamento (como no caso da indentação) dá os subsídios necessários ao entendimento do torneamento com ferramenta de diamante, pois mostra, de forma detalhada, os mecanismos de deformação, formação de trincas da carga normal (profundidade de penetração) e da velocidade na superfície da peça.

2.2 - Usinagem de Ultraprecisão

2.2.1 – Introdução

A usinagem de ultraprecisão não possui definição fixa, pois essa tecnologia tende a melhorar com o progresso e o passar do tempo. A expressão “ultraprecisão” pode ser considerada como o maior nível de exatidão alcançável, em determinada época, com determinado tipo de equipamento (DUDUCH, 1993).

O desenvolvimento dessa tecnologia de fabricação vem obtendo avanços consideráveis no decorrer do século. Um estudo cronológico sobre esses avanços, realizado por Taniguchi (1983), é reproduzido no diagrama da FIGURA 2.7 sob classificação geral dos processos de usinagem convencionais, de precisão e ultraprecisão.

FIGURA 2.7 – Desenvolvimento da precisão alcançável em máquinas de fabricação e instrumentos de medição (Taniguchi, 1983)

Esta tecnologia emprega ferramenta de diamante monocristalino de elevada precisão em máquinas-ferramenta especialmente projetadas para esta função e sob condições

controladas de temperatura, umidade e isolamento do meio ambiente com o objetivo de obter superfícies de altíssima precisão (TANIGUSHI, 1993).

Na usinagem de ultraprecisão, a escolha do material é de extrema importância, pois o tipo de material influi no processo de remoção de cavaco. Materiais frágeis podem ser usinados a uma possível transição frágil-dúctil a uma profundidade de corte submicrométrica

2.2.2 - Desenvolvimento trazido pela Usinagem de Ultraprecisão

A usinagem de ultraprecisão pode trabalhar com peças cujas dimensões são da ordem de até um micrômetro e resolução da ordem de 1nm, logo nanotecnologia. Essas ordens de magnitude não são conseguidas por modificações ou adaptações de processos de novas técnicas convencionais. Contrariamente, elas integram o desenvolvimento de novas técnicas de processamento de materiais, que envolvem:

a) Materiais para estruturas de máquinas com características estáticas e dinâmicas adequadas, já que estes afetam o desempenho da máquina.

b) Usinabilidade de novos materiais tecnológicos, como cerâmicas, plásticos, germânio, e zerodur (Ashkerov & Minaev, 1988).

c) Dispositivos de posicionamento – sensores, transdutores e atuadores compatíveis com a repetibilidade de posicionamento e exatidão do deslocamento exigido para cada eixo

d) Sistemas interferométricos de controle e metrologia para tornar possível a realização da metrologia dimensional com exatidão esperada (Fornaro & Dow, 1988).

e) Materiais para fabricar ferramentas e interação ferramenta/peça.

2.2.3 - Torneamento de ultraprecisão de matérias frágeis.

O torneamento de materiais não ferrosos com ferramentas de diamante, como níquel, cobre eletrolítico, platina e ligas de alumínio, estimulou a realização de diversos trabalhos que buscaram entender o processo de usinagem em termos do mecanismo de remoção de material. Esses materiais apresentam excelentes resultados na fabricação de espelhos ópticos, em que tolerâncias de forma de alguns centésimos de micrômetros e rugosidades R_a menores que 10 nm eram normalmente alcançadas.

A definição de torneamento de ultraprecisão ou torneamento com ponta única de diamante passa antes pela definição de “ultraprecisão”. 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 uma segunda opção à retificação de ultraprecisão após a Segunda 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-ferramentas de ultraprecisão em todo o mundo (KRAUSKOPF, 1984; CORBETT et Al, 2000). Os bons resultados encontrados com os materiais metálicos levaram à aplicação em materiais frágeis tanto na indústria óptica como na eletrônica, tendo como resultados produtos com resolução de forma e acabamento submicrométrica e nanométrica, respectivamente (BLACKLEY & SCATTERGOOD, 1994; BLACKLEY & SCATTERGOOD, 1990).

O torneamento de ultraprecisão exige alguns requisitos básicos, como mancais aerostáticos, elevada rigidez, controle ultraprecisão de posicionamento, a ferramenta utilizada 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 utilizados na usinagem de ultraprecisão estão listados na TABELA 2.1.

TABELA 2.1: Materiais utilizados na usinagem de ultraprecisão.

METAIS	POLÍMEROS	CRISTAIS
Alumínio	Acrílico	Silício
Cobre	Nylon	Germânio
Latão	Policarbonato	Arseneto de Gálio
Bronze	Poliestireno	Antimoneto de Índio
Níquel Eletrolítico	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

O torneamento de ultraprecisão é realizado com ferramentas monocortantes de diamante monocristalino, que tem como principal característica elevada dureza e resistência ao desgaste, baixo coeficiente de atrito e alta condutividade térmica. A geometria típica para este tipo de ferramenta pode ser visto na FIGURA 2.8.

FIGURA 2.8 - Ferramenta de diamante utilizada no processo de usinagem de ultraprecisão de materiais frágeis.

Aspectos relevantes concernentes ao desgaste da ferramenta, efeito das propriedades do material, forças de usinagem, nível de acabamento, integridade superficial, técnicas de caracterização, dentre outras formas foram pesquisados (JASINEVICIUS, 1994).

Todavia, a preferência por usar materiais cerâmicos ou vidros ópticos, para aplicação como espelhos no espectro visível e lentes para aplicações em óptica de transmissão estimulou a procura por novos processos de fabricação para usinar esses materiais.

Se, por um lado, a fragilidade torna a usinagem extremamente difícil, por outro, a demanda por componentes produzidos a partir desses materiais tem crescido de maneira muito rápida, justificada por propriedades ópticas, mecânicas, eletrônicas e físicas oferecidas além da estabilidade dimensional.

A procura por processos de fabricação que se ajustem adequadamente à usinagem de produtos a partir de materiais tipicamente frágeis tem feito com que o entendimento preciso dos mecanismos envolvidos na interação ferramenta/material torne-se objeto de muitas pesquisas.

A princípio estes materiais não eram considerados apropriados para a usinagem por meio de processos como torneamento, por serem facilmente destruídos na tentativa de usiná-los. Contudo, descobriu-se que vidros, entre outros materiais frágeis, nem sempre manifestavam, predominantemente, a fratura frágil quando usinados em condições de usinagem menores que 1 micrometro de profundidade.

Resultados similares, verificados em ensaios de microindentação com cargas da ordem de gramas e profundidades de penetração em torno de 1 μm , proporcionavam embasamento experimental para os resultados obtidos. Posteriormente, quando os indentadores eram movidos com cargas constantes, observava-se que, em vez de ocorrer fratura frágil, o material era “amontado” de ambos os lados no local onde o indentador atuava. Tal fenômeno também foi observado no riscamento (CHAO & GEE, 1989), no torneamento com ferramenta de diamante (PUTTICK et al., BLAKE, 1988) e na retificação (BIFANO et al., 1988).

Com base nestas constatações, tornou-se evidente a possibilidade de usinar materiais frágeis dentro de um regime considerado dúctil. Para que isso ocorresse, profundidades de corte combinadas com condições de processo (geometria e forma da ferramenta, velocidade de corte, avanço e refrigeração) deveriam ser convenientemente escolhidas, a fim de remover o material, predominantemente, por meio de deformação plástica em vez de fratura frágil.

Apesar dos grandes avanços conseguidos por meio de pesquisas em usinagem de materiais frágeis, alguns pesquisadores acreditam que é possível afirmar que o processo de usinagem em regime dúctil é capaz de produzir acabamento com qualidade óptica em materiais frágeis, podendo apresentar vantagens superiores como processo de usinagem (CHAO, 1992).

Tendo em vista a necessidade de usinar materiais frágeis no regime dúctil, o entendimento profundo do mecanismo de remoção de material por meio de escoamento plástico torna-se fundamental. Há ainda poucas publicações que discutem os mecanismos relacionados à deformação do material envolvido na usinagem para obtenção de superfícies livres de danos.

O torneamento de materiais frágeis em regime dúctil com ferramenta de ponta única de diamante pode ser descrito por mecanismos de remoção de material propostos para metais. Porém, ressalta-se que normalmente dois mecanismos de remoção devem estar envolvidos na usinagem de materiais frágeis, o regime dúctil e o frágil.

2.2.4 - Ferramenta de ponta única de diamante

O processo de torneamento de materiais frágeis utiliza ferramentas monocortantes de diamante. Ao contrário do processo de usinagem tradicional, o custo de operação é alto e tais ferramentas são extremamente caras, porém, o diamante monocristalino é um cristal extremamente adequado à produção de grandes séries de componentes com qualidade superficial e de forma excelentes, pois apresenta elevada dureza e resistência ao desgaste, módulo de elasticidade alto, baixo coeficiente de dilatação térmica e baixo coeficiente de atrito.

A estrutura do diamante consiste de átomos de carbono em forma C.F.C (cúbica de face centrada) e sua união ocorre através de ligações covalentes, ou seja, grande energia inter atômica. Esse tipo de estrutura é a responsável pela alta dureza, elevado ponto de fusão e

grande resistência química dos materiais (SCHROETER, 1997). A FIGURA 2.9 apresenta em detalhes a geometria de uma ferramenta monocortante com ponta de diamante.

FIGURA 2.9 - Ferramenta de diamante utilizada no processo de usinagem de ultraprecisão de materiais frágeis.

Ferramentas de diamante podem ser encontradas em diferentes formas:

- Ferramentas com superfície de corte com forma circular;
- Ferramentas com superfície de corte com forma truncada;
- Ferramentas com superfície de corte afiada.

As ferramentas de diamante circulares são as mais empregadas e usadas na fabricação de superfícies anesféricas. Os raios de ponta para ferramentas circulares geralmente variam de 0,1mm a 100mm dependendo do tipo de aplicação.

Raios grandes, segundo BLACKKEY e SCATTERGOOD (1991), implicam na possibilidades de avanços maiores e a espessura crítica de usinagem se desloca em direção à espessura máxima de usinagem, tendo como consequência a melhora na qualidade superficial.

Diferentes mecanismos podem contribuir para o desgaste do diamante, tais como;

- formação de aresta postiça;

- micro – esfarelamento;
- fratura;
- fadiga.

2.2.5 - Torno de Ultraprecisão ASG 2500

Não convencionais, as máquinas-ferramentas de ultraprecisão devem ser usadas para controlar parâmetros de usinagem e produzir o chamado “regime dúctil”. Neste regime, é obtida no material uma superfície com qualidade óptica livre de micro fraturas.

O desenvolvimento de máquinas-ferramentas de ultraprecisão com alta rigidez baseados em mancais aerostáticos permite o controle preciso do volume deformado, que é pré-requisito para a usinagem em regime dúctil.

O torno ASG 2500 é uma dessas máquinas especiais à produção de superfícies ópticas em materiais frágeis. Este torno é um avançado sistema multi-eixos com um CNC acoplado para torneamento com ferramentas de diamante monocristalino. Está habilitado a produzir componentes como lentes infravermelhas complexas em germânio, silício, sulfatos de zinco e outros cristais bem como espelhos reflexivos em cobre, ouro, prata e ligas de alumínio, lentes e prismas em uma gama de polímeros, moldes de precisão, placas de níquel eletrolítica, latão e outros metais não ferrosos.

2.3 - Modos de Remoção de Cavaco de Materiais Frágeis

O torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis em regime dúctil pode ser descrito através de mecanismos de remoção de material sugeridos para metais, ressaltando-se que

normalmente dois mecanismos de remoção estão envolvidos na usinagem de materiais frágeis, o regime dúctil e o regime frágil (JASINEVICIUS, 1998).

Os modos de remoção de materiais frágeis podem ser classificados então em modo de remoção dúctil e modo de remoção frágil, exemplificados na FIGURA 2.10, retirada de JASINEVICIUS (1998).

FIGURA 2.10 - Modos de remoção frágil e dúctil em uma amostra de silício monocristalino (JASINEVICIUS, 1998).

A região onde houve remoção frágil se mostra danificada, com presença de trincas. As condições de corte foram tais que as trincas geradas na região do ombro não-cortado (perfil da ferramenta deixado sobre a peça) são reproduzidas na superfície final da peça, devido ao aumento da espessura crítica de cavaco. Se esta espessura crítica não é ultrapassada, a remoção de material se dá na forma dúctil, ou seja, exibe uma superfície final livre de danos. Deve-se ter em mente que, apesar do nome “remoção dúctil”, pode haver também a presença de trincas durante a remoção. Porém, essas não ultrapassando a espessura crítica de corte formam uma região sem danos superficiais, com trincas apenas na região do ombro não-cortado, que são retiradas com passes subsequentes da ferramenta. Este estado de remoção caracterizado por uma superfície livre de trincas e pela presença de trincas na região do ombro-não-cortado é denominado de remoção dúctil/frágil. Entretanto, esta divisão nos

modos de remoção pode ser encarada como teórica, pois o comportamento mecânico de materiais frágeis quando submetidos à usinagem é controlado por mecanismos simultâneos de escoamento plástico e de propagação de defeitos, como microtrincas e discordâncias (JASINEVICIUS, 1998).

Os tipos de trincas formadas durante a usinagem de materiais frágeis podem ser vistos na FIGURA 2.11, adaptada de DUDUCH (1993).

FIGURA 2.11 - Tipos de trincas que podem surgir durante a usinagem de materiais frágeis (DUDUCH, 1993).

Os avanços nos estudos do torneamento de ultraprecisão levaram ao descobrimento de um regime dúctil de operação no qual a remoção de material é puramente elástica. A inexistência de resposta frágil no torneamento de materiais frágeis é desejável para evitar a geração de danos superficiais na peça. Para se trabalhar no regime dúctil, os parâmetros de usinagem têm que ser cuidadosamente escolhidos. Conseqüentemente, uma maior atenção tem que ser dada à natureza do processo relativo à geometria de corte e condições de usinagem (MORRIS et al., 1995).

Segundo NAKASUJI et al. (1990), o processo de remoção de cavaco pode ser classificado em dois tipos: o processo devido à deformação plástica em um plano de escorregamento característico e o outro devido à fratura por clivagem em um plano de clivagem característico. Ainda segundo NAKASUJI (1990), no torneamento de materiais não

homogêneos, o plano de escorregamento ou o plano de clivagem coincidem com os planos de tensão de cisalhamento máxima ou tensão elástica. Os pesquisadores também afirmam que no caso de torneamento de materiais cristalinos, o critério de remoção de cavaco é mais complexo. Há deformação plástica no material que está sendo cortado à frente da aresta de corte da ferramenta quando a tensão de cisalhamento na direção de escorregamento exceder certo valor crítico, inerente ao material, antes que aconteça a clivagem. Por outro lado, a clivagem acontece quando a tensão plástica normal ao plano de clivagem excede certo valor crítico antes de ocorrer o escorregamento. Os pesquisadores afirmam ainda que o tipo de processo de remoção de cavaco depende da condição de corte usada e que pode haver uma condição crítica de campo de tensão ou de orientação cristalina do material que determina se o cavaco é removido por deformação plástica ou por processo de clivagem.

BLACKLEY & SCATTERGOOD (1990) observaram que a presença ou não de fratura na superfície usinada de Ge (germânio) era dependente da direção de corte. Tais defeitos surgiram em determinadas orientações cristalográficas preferenciais. Segundo os autores, esta dependência seria atribuída à máxima amplitude de tensão de tração sobre o plano de clivagem (111). Estas tensões mudam com a direção de corte por causa da mudança da orientação do cristal com relação ao eixo principal de tensão. KUNZ (1996) observou na usinagem de Si (100) que são vetores de força normais ao plano (111) ocorrem quando a ferramenta está atravessando a superfície ao longo da direção (110). A rugosidade gerada quando usinado nesta direção confirma, segundo os autores, que o modo remoção primário é a fratura frágil. Entretanto, a superfície relativamente com bom acabamento e os planos de escorregamento e redes de discordâncias remanescentes quando usinando na direção (100), sugere a ocorrência de deformação plástica. Entretanto, tanto para orientação (100) quanto (110), os autores observaram danos superficiais estendendo-se a camadas com profundidade de aproximadamente três micrômetros. HUNG & FU (2000) também investigaram o efeito da orientação cristalográfica no torneamento em regime dúctil do silício (100). Eles observaram que o corte no regime dúctil era atingido quando a velocidade de corte estava na direção (100) e a espessura máxima do cavaco era menor que $0,5\mu\text{m}$. Condições de usinagem que produziam cavacos mais espessos geraram microtrincas e linhas de escorregamento. Danos introduzidos por microfratura (*"pittings"*) e microtrincas foram observados quando usinou-se na direção (100), independentes das condições de corte. Os autores ainda afirmam que estas

microtrincas podem se estender a uma profundidade maior que $1\mu\text{m}$ da superfície usinada. Segundo CHAO et al (2002), devido a anisotropia do silício monocristalino, a superfície gerada pela operação de torneamento é muito dependente da orientação cristalográfica. Na FIGURA 2.12 podem ser observadas as direções mais facilmente fraturadas para Si (100) e Si (111).

FIGURA 2.12 - a) ações mais facilmente fraturadas no Si (100): [010], [100], [010] e [100];

b) No Si (111): [112], [121], [211], [i2i], [2ii], [ii2] (CHAO et al, 2002).

SHIBATA (1996) também salienta a importância da orientação cristalográfica do Si para torneamento de ultraprecisão. Usinaram amostras deste cristal em todas as direções cristalográficas nos planos (001) e (111) em profundidades de corte de 100 micro e $1\mu\text{m}$. Os resultados demonstraram que os danos por fratura (*“pitting”*) ocorreram ao longo de orientações cristalográficas específicas, concordando com resultados de outros pesquisadores. Na análise da integridade superficial, observou-se que a camada subsuperficial da superfície usinada apresentava muitas discordâncias, cuja extensão variava de 2 a $3\mu\text{m}$ para dentro do substrato, quando a profundidade de corte variava de $100\mu\text{m}$ para $500\mu\text{m}$, respectivamente.

Baseado nos resultados de SHIBATA et al (1996), JASINEVICIUS (1998) investigou a influência de passes anteriores da usinagem na superfície gerada observando, menos com um ombro não cortado totalmente dúctil, a presença de trincas na superfície acabada. Ou seja, mesmo em condições de remoção teoricamente dúcteis de torneamento, poderiam surgir trincas remanescentes de passes anteriores. A FIGURA 2.13 mostra este fenômeno, onde se

pode notar que mesmo utilizando-se condições de corte que remova material de forma dúctil, a camada superficial apresentou danos de passes anteriores, ou seja, trincas médias relacionadas à orientação cristalina e dependente da direção de corte.

FIGURA 2.13 - Vista bidimensional do corte ortogonal, mostrando as trincas remanescentes de cortes anteriores (JASINEVICIUS, 1998).

Observando a superfície usinada perpendicular a direção de corte através de microscopia eletrônica de transmissão (MET), SHIBATA (1996) notou que a camada superficial era convertida de cristalina para uma estrutura amorfa. E sob esta estrutura se estendiam varias discordâncias geradas pela ativação de sistemas de escorregamento.

JASINEVICIUS (1998), numa compilação de resultados relativos à extensão de danos encontrados na superfície e subsuperfície de amostras de Si, afirma que os resultados geralmente sempre apresentavam uma camada amorfa e uma subcamada que apresenta defeitos decorrentes da geração de discordâncias. A primeira é responsável pela resposta dúctil encontrada durante a deformação/remoção de material. Assim, conclui o autor, este fato pode ser considerado a evidência de que existiriam dois mecanismos de deformação plástica envolvidos, um em profundidades submicrométricas relacionado à transformação de fase induzida por pressão/tensão e o outro em profundidades micrométricas, relacionado à ativação de sistemas de escorregamento.

Outro fenômeno que pode se ocorrer na usinagem de ultraprecisão é o “ploughing” (sulcamento), FIGURA 2.14 (de JASNEVICIUS, 1998), que ocorre em profundidades e avanços muito pequenos, onde o material é plasticamente empurrado para os lados, com a remoção resumindo-se a pequenas rebarbas, que são escoadas lateralmente ou simplesmente compactadas. Segundo MCKEOWN e JASINEVICIUS (1998), a usinagem de ultraprecisão com ferramentas de diamante ou rebolos diamantados, produz cavacos muito finos. Quando a espessura do cavaco alcança valores menores do que $1\mu\text{m}$, a tensão de cisalhamento no material a ser cortado e na ferramenta aumenta drasticamente e torna-se extremamente elevada, o que pode acelerar o processo de desgaste na ferramenta. A razão para a ocorrência deste fenômeno é que com espessuras nominais de corte menores que $1\mu\text{m}$, a distribuição de discordâncias móveis nos cristais (no caso de metal) aproxima-se de zero e as forças de corte terão que vencer as grandes forças das ligações atômicas dentro do cristal. Da mesma forma, um ângulo de saída muito negativo, que implica em elevadas tensões compressivas à frente da ferramenta, poderá até suprimir o mecanismo de formação do cavaco. Para uma dada condição de corte, existe um ângulo de saída negativo crítico para a ferramenta abaixo do qual o mecanismo predominante será o sulcamento (“ploughing”). O sulcamento pode assim, ser resultante tanto de um ângulo de saída muito negativo ou de um ângulo de saída negativo “efetivo”, o qual existe quando o raio da aresta de corte é da ordem da profundidade de corte no corte ortogonal.

FIGURA 2.14 - Mecanismo de remoção pobre – “ploughing” (JASINEVICIUS, 1998).

Assim, o interesse e a crescente gama de aplicações de materiais frágeis vem motivando várias pesquisas ao redor do mundo em relação à usinagem de materiais frágeis. Em seu trabalho, CORBETT (2000) mostra o crescimento e a importância que a Nanotecnologia vem tendo no campo da indústria nos últimos anos, causando um grande impacto no desenvolvimento de novos materiais, produtos e processos. Conseqüentemente, há também um grande avanço nas técnicas de manufatura, dentre elas, a usinagem de ultraprecisão, no que diz respeito tanto para máquinas-ferramenta quanto a novos materiais, dentre eles os frágeis. MASUZAWA (2000) também destaca o processo de “miniaturização” que vem ocorrendo em diversos produtos industriais. Segundo o autor, a base para que estes processos ocorram são os processos de microusinagem e novos materiais, onde os torneamentos com ferramenta de diamante em materiais frágeis estão incluídos.

Dentre os materiais frágeis mais utilizados está o silício (Si). Em recente trabalho publicado por SREEJITH et al (2001), os autores afirmam que a indústria de semicondutores é uma das que mais cresce no mundo e que o silício é usado em mais de 90% dos produtos dos semicondutores fabricados. Ainda segundo os autores, numa pesquisa realizada em 1993, 3 bilhões de dólares de aplicação em silício puro renderam cerca de 700 bilhões em equipamentos eletrônicos. Entre os vários tipos de usinagem para seu processamento, os autores listam o torneamento de diamante, onde citam vários trabalhos em que foi possível a obtenção de superfícies com acabamento espelhado. FANG & VENKATESH (1998) também concordam que o Si predomina como semicondutor na área de manufatura, apesar de outros materiais, como Arseneto de Gálio e Antimoneto de Índio consumirem menos energia e serem três vezes mais rápidos em aplicações do que o Si, terem despertado o interesse dos pesquisadores da área de usinagem.

Os modelos de corte para usinagem de materiais frágeis mais utilizados são os modelos de corte interrompido, que serão apresentados no próximo item.

2.4 - Modelos de corte para o Torneamento de Materiais Frágeis

O estudo dos modelos de corte de materiais frágeis é de grande importância para o entendimento da relação entre os fenômenos que regem a remoção deste tipo de material. Apesar da formação do cavaco no torneamento com diamante diferir dinamicamente e geometricamente da deformação produzida pela indentação e riscamento, as similaridades existentes entre os processos e o grande corpo de dados em indentação concernente à quantidade limitada de deformação plástica que precede ao início de fratura frágil, demonstram a viabilidade da remoção dúctil de materiais frágeis no torneamento de ultraprecisão, quando profundidades de corte combinadas com condições de usinagem (geometria e forma da ferramenta, avanço da ferramenta, avanço e velocidade de corte) forem convenientemente aplicadas, levando ao desenvolvimento de modelos de corte para tais materiais. Assim, a hipótese básica para a usinagem dúctil de materiais frágeis é que pode ser alcançada deformação plástica em um pequeno volume de controle na interface ferramenta-peça antes que ocorra fratura.

2.4.1 - Modelo de Blake (1988)

Em 1988, P.N BLAKE sugeriu um modelo de corte para o processo de torneamento em regime dúctil de materiais frágeis com ferramenta de ponta única de diamante. Esse modelo foi proposto a partir da posição de transição dos danos por microfratura observados sobre o perfil da ferramenta impresso na superfície da peça usinada em ensaios de corte interrompido (ECI). A idéia-chave é apresentada na FIGURA 2.15.

Sobre esse segmento de arco, denominado de ombro não cortado, a severidade dos danos decresce da parte mais alta até o ponto onde ocorre a transição frágil para dúctil (FIGURA 2.15).

FIGURA 2.15 - Geometria de corte vista no plano normal à direção de corte. A seção transversal do cavaco na região do ombro não cortado possui espessura efetiva variável.

Para determinam parâmetros de usinagem, existe uma profundidade crítica de corte (t_c) ou espessura de cavaco ($t_{ef} = t_c$) abaixo da qual os danos por fratura não ocorrem. Esta seria uma adaptação para a usinagem de precisão baseada na relação entre propriedades proposta a partir da equação 1 (já apresentada anteriormente)

Esta equação representa a profundidade crítica de penetração t_c para o início de trinca durante a indentação (LAEN & EVANS, 1977), onde Ψ é uma constante adimensional, H é a dureza, k_c é a tenacidade à fratura, E é o módulo de elasticidade. O fator $(K_c/H)^2$ é colocado por causa de necessidades dimensionais. A razão E/H é similar para qualquer material cerâmico, no entanto, a tenacidade à fratura e a dureza emergem como propriedades chaves do material.

FIGURA 2.16 - Vista da seção do cavaco em escala real, mostrando a variação de t_{ef} e, função de teta ao longo da ferramenta (BLAKE & SCATTERGOOD, 1990).

Quando t_{ef} é menor que t_c , ocorre resposta dúctil ao longo de todo o raio da ponta da ferramenta, enquanto, quando t_{ef} é maior que t_c , ocorre fratura, que resulta na zona de danos por microfratura mostrada esquematicamente a FIGURA 2.17. O embasamento para tal modelo é derivado do fato de haver uma linha de transição de danos bem definida, que pode ser observada na distância W_d do centro da ferramenta, na região do ombro, em ensaios de corte interrompidos (FIGURA 2.17).

Analizando a região do ombro, BLAKE (1998) observou a presença de danos induzidos através de microfraturas (“pittings”) pela aresta lateral de corte, onde t_{ef} se aproxima de $t_{máx}$, e não na linha de centro da ferramenta, onde, t_{ef} se aproxima de zero.

Segundo o autor, as observações das transições de defeitos de microfraturas na região do ombro sugerem um modelo para usinagem no regime dúctil, como pode ser visto na FIGURA 2.17. Para dados parâmetros de usinagem, existe uma profundidade de corte crítica ou espessura de cavaco, $t_{ef}=t_c$, abaixo da qual não ocorre fratura.

FIGURA 2.17 - Modelo para usinagem dúctil. Para t_{ef} maior que t_c a zona de danos se forma ao longo da ponta da ferramenta. O corte dúctil sem fratura ocorre somente ao longo da porção abaixo da seção transversal do cavaco, onde t_{ef} é menor que t_c . A profundidade da zona danificada é denotada por y_c (BLACKKEY & SCATTERGOOD, 1990).

O regime dúctil não pode ser visto especialmente como regime do qual o material será removido apenas no modo dúctil. A remoção de material, observada sobre o ombro e corte acima de t_c , ocorrerá por meio da combinação de plasticidade e microfratura extensiva.

Caso estes danos por fratura não se reproduzam ultrapassando a linha de corte da superfície, como deve ser para a usinagem em regime dúctil, eles então serão removidos por passos subseqüentes da ferramenta.

A usinagem em regime dúctil será, assim, a interação entre o perfil da ferramenta e o avanço, os quais determinaram a seção transversal do cavaco e o parâmetro de profundidade crítica t_c que ditará o início da fratura.

Para o modelo de Blake, os danos induzidos por fratura seriam os *pittings* visíveis por meio de microscopia óptica ou de varredura sobre a superfície usinada (FIGURA. 2.18). O mesmo formalismo e estrutura do modelo poderiam ser utilizados para outros métodos de inspeção de danos revelados por ataque químico ou *etching*.

FIGURA 2.18 - Fotomicrografia e diagrama esquemático do ombro não cortado e da superfície usinada. A severidade dos danos por microtrincas é maior próximo ao topo do ombro; a superfície foi gerada no regime dúctil, apesar dos danos observados no ombro não cortado.

O autor deste modelo de corte faz uma consideração em relação ao modelo para o processo de usinagem. A FIGURA 2.19 ilustra um corte ortogonal da região de usinagem, à profundidade t_{ef} maior que t_c ao longo da ponta da ferramenta. Uma zona de deformação elastoplástica e de fratura ocorre em um volume de controle ao redor da ponta da ferramenta. A análise elastoplástica do campo de deformação ou tensões exigiria aplicação de técnicas específicas como do método de elementos finitos. Dentro da estrutura deste modelo, a localização da zona de danos por microfratura no campo de tensão-deformação na FIGURA 2.20 não pode ser identificada. Efeitos como a interação por ondas de choques dinâmicos estariam implicitamente incluídos na determinação de t_c .

FIGURA 2.19 - Diagrama esquemático de geometria de corte utilizada para derivar equações.

FIGURA 2.20 - Danos induzidos por fratura sobre a superfície foram observados por meio de microscopia eletrônica de varredura (magnificação 2.000x).

FIGURA 2.21 - Vista lateral do modelo mostrado na figura 2.17. O movimento de avanço está ortogonal ao plano. Isto pode ser considerado como corte quase ortogonal com profundidade de corte $a_p = t_{ef}$, na posição correspondente θ ao longo da ponta da ferramenta. Danos por microfratura iniciam na zona de deformação elastoplástica quando $t_{ef} > t_c$.

2.4.2 - Modelo de Blackley.

A FIGURA 2.22 é a base para o novo modelo fenomenológico do processo de usinagem. Soma-se a geometria anterior o parâmetro de profundidade de danos subsuperficiais, y_c , como parâmetro para a formulação deste modelo. A inclusão desse parâmetro seria importante, pois y_c move-se ao longo do ombro em combinação com t_c quando avanços diferentes são utilizados. Quando avanços pequenos são usados, t_c está localizado na região superior do ombro e os danos subsuperficiais não afetam a superfície final. Isso ocorre porque os danos subsuperficiais são removidos com os passos sucessivos da ferramenta.

FIGURA 2.22 - Geometria de corte utilizada para derivar modelo de corte. A projeção é feita ao longo da direção de corte com profundidade de corte efetiva, sendo a distância crescente a partir do centro da ferramenta.

No entanto, quando o avanço aumenta, t_c move-se na direção descendente do ombro e a profundidade de danos subsuperficiais, y_c , associada a essa variação do avanço começa a se reproduzir na superfície acabada, isto é, a superfície final apresenta danos por fratura (FIGURA 2.22)

Segundo BLACKLEY e SCATERGOOD (1991), o modelo de Blake não considera y_c nas formulações propostas para explicar seu modelo, assim como não explica a mudança aparente de seu valor com a variação do avanço no valor calculado de t_c . É importante notar que o parâmetro t_c representa uma espessura crítica de corte para o início da fratura. Ambos, t_c e y_c , dependem de uma relação complexa do estado de tensão na ponta da ferramenta. O aumento de t_c poderia conduzir o aumento nas forças de corte e assim representar acréscimo em y_c .

O uso de ensaios de corte interrompido (ECI) e a medidas na região do ombro em que ocorre transição de frágil para dúctil são procedimentos determinísticos que provam ser úteis no estabelecimento de critério de usinabilidade por ser difícil inspecionar superfícies usinadas com grandes dimensões para o propósito de estabelecer uma taxa de avanço precisa. Além disso, se outro critério para a transição de danos fosse utilizado para a região do ombro, como,

por exemplo, ataque químico (*etching*) para revelar microtrincas subsuperficiais, então uma taxa de avanço limitante para esse tipo de dano pode também ser estabelecida usando o modelo desenvolvido nessa investigação.

2.4.3 - Modelo de Duduch

A necessidade de aperfeiçoar o processo de usinagem de materiais frágeis levou à testes baseados em larguras de corte menores que o valor crítico (FIGURA 2.23), uma vez que a manutenção do corte em regime dúctil para grandes áreas não era facilmente mantida. As primeiras tentativas de realizar o corte totalmente dúctil haviam sido desencorajadas, com base no fato de a fratura frágil ocorrer invariavelmente.

Considerando a pequena inclinação lateral da ferramenta em relação à superfície usinada, a geometria seria representada na FIGURA 2.23. A FIGURA 2.23d apresenta exemplo de superfície usinada em regime dúctil. A formação do cavaco pode ser dividida em duas regiões distintas: região I estendendo-se de S até à profundidade do canto C e região II estendendo-se do canto C até a profundidade da ponta da ferramenta T. Por causa dos diferentes ângulos da ferramenta na direção do avanço, a largura do cavaco na região I se aproxima do valor do avanço por revolução, contido na região II, será muito mais fina. Com o emprego de avanços maiores (5μ /revolução) na região II é provável que trincas laterais comecem a aparecer. Como mostrado por LAWN & SWAIN (1975), pode-se esperar que a trinca se estenda alguns micrometros abaixo, isto é, até a máxima profundidade de corte frágil d_c .

FIGURA 2.23 - Modelo proposto por Duduch (1993) a) imagem da ponta da ferramenta utilizada por Duduch (1993); b) geometria da ponta da ferramenta de diamante; c) geometria de corte com ferramenta inclinada em regime ação à superfície usinada; e d) exemplo de superfície usinada em regime dúctil.

Caso a pequena inclinação da ferramenta na região II de C a T cause largura subcrítica do cavaco, pode-se esperar que a usinagem seja no modo dúctil e a remoção de material na região II pode ser realizada juntamente com o modo frágil gerado na região I.

A formação do cavaco pode ser dividida em duas regiões distintas. Na região I (da superfície não usinada até cerca de $3\mu\text{m}$ acima da superfície usinada) o cavaco possui espessura aproximada de $4\mu\text{m}$, a qual provavelmente promoverá fratura frágil. Na

região (menor que $0,3\mu\text{m}$) e, portanto, pode ser considerada no estado plano de tensão (corte ortogonal clássico).

O material nessa região pode ser cisalhado e deforma-se à frente da superfície de saída da ferramenta sem a presença de trinca. A usinagem da região II pode ser considerada em estado de tensão plano bidimensional (corte ortogonal clássico).

Explicação plausível para a geração de superfície usinada sem danos é que as trincas na região I propagam-se lateral e superficialmente (na direção ascendente em vez de penetrar abaixo da linha da superfície), assim a inclinação da ferramenta não teria qualquer influência sobre o resultado obtido. No entanto, para investigar a influência da inclinação, uma amostra polida foi usinada (faceamento) com os mesmos parâmetros de corte (avanço de $5\mu\text{m}$ /revolução e profundidade de $7\mu\text{m}$), mas tanto a ferramenta como a amostra foram montadas de forma que a aresta de corte da ferramenta ficasse paralela à superfície da amostra (sem inclinação). A superfície usinada foi examinada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para mostrar os danos gerados na superfície, como ilustrado na FIGURA 2.24.

FIGURA 2.24 - Micrografia da amostra de silício usinada. Profundidade de corte de $7\mu\text{m}$, avanço de $5\mu\text{m}$ /revolução e sem inclinação entre a aresta de corte da ferramenta e a da superfície da amostra.

Esse resultado conduz a hipótese básica de que as trincas na região I propagariam tanto descendente quanto lateralmente (FIGURA 2.25), mas, se a região I estivesse aproximadamente $3\mu\text{m}$ acima da superfície usinada, as trincas não se propagariam abaixo da linha da superfície, e seriam removidas em passos subsequentes.

FIGURA 2.25 - Modelo de propagação de trincas em materiais frágeis.

2.5 - Transição Dúctil-Frágil e Formação de Cavaco na Usinagem de Materiais Frágeis.

Nos processos de usinagem, a remoção de cavaco pode afetar a qualidade superficial. No torneamento de materiais frágeis com ferramenta de diamante, o processo de remoção do cavaco pode ser classificado em dois tipos: o processo decorrente da deformação plástica sobre o plano de escorregamento característico e o processo decorrente da fratura por clivagem sobre o plano de clivagem característico (NAKASUJI et al., 1990).

A FIGURA 2.26 mostra modelos esquemáticos dos mecanismos envolvidos na remoção de cavaco em material frágil. Durante o torneamento de materiais homogêneos, o plano de escorregamento ou o de clivagem pode coincidir com o plano de máxima tensão de cisalhamento ou de tração. No caso do torneamento de materiais cristalinos, o critério de remoção de cavaco torna-se mais complexo. Nesse caso, a deformação plástica ocorrerá na direção de maior facilidade de escorregamento se exceder determinado valor crítico inerente

ao material antes da clivagem ocorrer (FIGURA 2.26). Por outro lado, a clivagem ocorrerá quando a tensão de tração resolvida normal ao plano de clivagem exceder determinado valor crítico antes de o escorregamento ocorrer.

O tipo de processo de remoção de cavaco pode ser determinado por um critério predominante sob certas condições de corte. Quando o processo de deformação plástica predomina sobre a clivagem, superfícies com qualidade ópticas podem ser obtidas. Ao contrário disso, o processo de clivagem será responsável pela geração de superfícies “foscas”, as quais estão cobertas de trincas residuais, todavia, deve haver uma condição crítica entre o campo de tensão e a remoção de cavaco predominante, seja ele por deformação plástica ou clivagem.

Os valores críticos para ocorrer clivagem ou deformação plástica são afetados por densidade de defeitos e/ou discordâncias inclusas no material do substrato. Como a densidade de defeitos que age como núcleo de clivagem não é predominante em materiais frágeis, o valor crítico da fratura depende do tamanho do campo de tensão no qual a clivagem ocorre caso os defeitos existam. Por outro lado, a densidade de discordâncias é suficientemente alta para provocar deformação plástica até mesmo num campo de tensão pequeno. A figura apresenta um modelo de remoção de cavaco com base no que se denomina efeito tamanho (do inglês *size effect*), considerando a distribuição dos efeitos. Quando a espessura do cavaco não deformado for pequena o tamanho do campo de tensão crítico será pequeno o bastante para evitar o início da clivagem nos defeitos. Consequentemente, a transição do processo de remoção de material de frágil para dúctil pode ocorrer dependendo da espessura do cavaco não deformado. Todavia, estado de tensão e a distribuição de defeitos teriam de ser controlados de forma a obter a remoção do cavaco por meio da deformação plástica, evitando-se, assim, a clivagem.

FIGURA 2.26 - Modelo de remoção do cavaco segundo NAKASUJI *et al.* (1990)

O estudo qualitativo que compara o tipo de cavaco formado e a superfície gerada pode oferecer pistas importantes para a determinação do processo desenvolvido na formação do cavaco no torneamento de materiais frágeis com a ferramenta de diamante. Os defeitos encontrados na superfície das peças podem ser utilizados como fonte de recurso para explicar a fenomenologia envolvida na geração das superfícies. A literatura mostra que esses defeitos são conseqüências da usinagem (avanço e profundidade de corte) e geometria e condições da ferramenta (ângulo de saída e de folga, raio da ponta da ferramenta e desgaste da aresta de corte). Todos estes fatores contribuem fortemente para o sucesso ou fracasso do processo.

Uma hipótese básica mostra que a deformação plástica pode acontecer dentro de um volume de controle na interface ferramenta peça em materiais frágeis, antes da ocorrência de fraturas. É importante identificar que há um verdadeiro efeito em tamanho de escala para a iniciação de fratura.

A energia para se iniciar a deformação plástica está relacionada com o volume de material deformado enquanto que a energia necessária à fratura relaciona-se com a área superficial de trincas. A deformação plástica torna-se energeticamente favorável com a diminuição da escala de deformação, havendo um volume inicial abaixo do qual o material se deformará sem a ocorrência de fratura.

LAWN e EVANS (1977) estudaram uma carga crítica com indentador de diamante para que se inicie a fratura (equação 2):

$$P_c = \Omega \cdot \frac{K_c^4}{H^3} \quad (2)$$

Onde, H: dureza

K_c : resistência à fratura

Ω : é uma função E/H

E: módulo de elasticidade

Na profundidade crítica de penetração t_c (equação 1), o fator $(K_c/H)^2$ aparece devido aos requisitos dimensionais. A razão E/H é similar para vários materiais cerâmicos. Por isso, a resistência a fratura e a dureza são propriedades chaves nas equações (1) e (2). O termo K_c/H refere-se ao índice de fragilidade. O parâmetro de profundidade crítica de corte t_c será o divisor entre a fratura e a ductilidade em torneamento de ultraprecisão. A constante Ψ dependerá de um comportamento complexo dos parâmetros de usinagem e da geometria da ferramenta (BLACKLEY & SCATTERGOOD, 1990).

2.6 - O Carbeto de Tungstênio

O Carbeto de Tungstênio WC é uma liga metálica de estrutura cristalina hexagonal compacta (FIGURA 2.27) formada pelos elementos carbono e tungstênio. Este material tem alta dureza e alta resistência ao desgaste, mesmo em condições de trabalho em alta temperatura, por isso suas principais aplicações atualmente são em ferramentas de corte, brocas, perfuratrizes, matrizes, abrasivos, esferas para moagem de alta energia, entre outras.

FIGURA 2.27 - Estrutura Hexagonal Compacta para o Carbeto de tungstênio.

2.6.1 - Características e propriedades do Carbeto de Tungstênio

As principais propriedades do carbeto de tungstênio são a elevada dureza e resistência ao desgaste, aliada à alta tenacidade e estabilidade dimensional e térmica, bem como boa resistência a corrosão (GUTIÉRREZ, 2002).

Esses materiais vêm sendo largamente usados na indústria devido à excelente combinação de propriedades de resistência a abrasão, ao impacto, a compressão, alto módulo de elasticidade, resistência ao choque térmico e a corrosão (YAO; STIGLICH; SUDARSHAN, WANG; ZHU, 2003).

As propriedades mecânicas e físicas do WC são dependentes da rota de processamento para sua fabricação, da microestrutura e composição final (GOMES, 1995). Segue abaixo na TABELA 2.2 as principais propriedades do carbetto de tungstênio.

TABELA 2.2 - Propriedades do Carbetto de Tungstênio

PROPRIEDADE	VALOR	CONDIÇÕES
Densidade	15800 kg/m ³	Ceramic
Dureza Knoop (KH)	1880 kg/mm	100g, Ceramic
Dureza Vickers (HV)	2400 kg/mm	50g, Ceramic
Dureza Vickers (HV)	1730 kg/mm	100g, Ceramic
Módulo de Ruptura	0.5793 GPa	Ceramic, at room temperature
Coefficiente de Poisson	0.24	Ceramic
Resistência à Tensão	0.3448 GPa	Ceramic
Condutividade Térmica	84.02 W/m/K	Ceramic, at temp=20 C.
Módulo de Young	713.82 GPa	Ceramic, at room temperature

2.6.2 - Produção do pó de Carbetto de Tungstênio

Metais duros de WC são obtidos através do processo da metalurgia do pó, geralmente em sinterização fase líquida. Estas ligas combinam alta tenacidade e elevada dureza dando origem a ampla gama de aplicações incluindo as ferramentas e peças de desgaste. O uso de pós submicrométricos (0,5-0,8 µm) e ultrafinos (0,2-0,5 µm) melhoram as propriedades mecânicas dos metais duros e permitem aplicações específicas como microfurações ou inserção de cortes em metais moldados complexos. Estes são extremamente sensíveis para as condições de transformação: o maior crescimento de grãos de WC começa no início do ciclo, enquanto sinterização anormal de grãos podem se formar. Uma microestrutura fina pode ser

mantida por meio da adição de elementos dopantes como exemplo o Cromo, pois quando adicionado ao WC este limita o crescimento do grão durante o processo lento de sinterização, mas também retardam a densificação.

De maneira geral, a produção de metal duro consiste na mistura dos pós (carbetos e o metal ligante) e na moagem em moinhos de baixa ou de alta energia. A moagem é normalmente feita em meio líquido orgânico e um lubrificante, onde o mais empregado é a parafina. Após a moagem o líquido é retirado por secagem. Em seguida a mistura segue os passos normais da metalurgia do pó, é compactado, pré-sinterizado, onde ocorre a eliminação da parafina, e a sinterização final em atmosfera de hidrogênio ou a vácuo (GOMES, 1995). Na FIGURA 2.28 é apresentado um fluxograma mostrando o processo básico de fabricação de um componente de metal duro do tipo WC-Co.

FIGURA 2.28 - Fluxograma do processo básico de fabricação de um componente de metal duro do tipo WC-Co (Fonte: Adaptado de GUTIÉRREZ, 2002).

Um bom controle do teor de carbono é de fundamental importância, pois uma pequena variação na quantidade ideal de carbono pode influenciar na ocorrência de grafita livre ou compostos ternários, ambos indesejáveis, pois comprometem as propriedades do produto final (YAO, STIGLICH, SUDARSHAN; GUTIÉRREZ, 2002). Assim, a quantidade de carbono deve ser mantida dentro de estreitos limites para obter o compósito com propriedades ótimas (YAO, STIGLICH, SUDARSHAN).

O excesso de C resulta na aparição de grafita livre que ativa o crescimento de grão do WC, e conseqüentemente, ocorre uma diminuição da dureza e da resistência a ruptura transversal, quando o excesso de C é grande, a grafita precipita em agregados, formando pontos fracos no material, causando um decréscimo acentuado, tanto na dureza quanto na resistência a ruptura transversal (GUTIÉRREZ, 2002).

A FIGURA 2.29 mostra a dependência da dureza e da resistência à ruptura por flexão em função do teor de C, para um metal duro com composição de WC-10% (GUTIÉRREZ, 2002).

Figura 2.29 - Propriedades mecânicas em função do teor de Carbono – Fases h e grafita livre. (Fonte: Adaptado de GUTIÉRREZ, 2002).

Para evitar estas variações nas propriedades do WC, é necessário bom controle do pó do tungstênio, bem como na distribuição do tamanho de partícula e a alta qualidade do negro de fumo empregado (baixo teor de resíduos de combustão e enxofre). Devido os dois pós possuírem densidades significativamente diferentes (densidades para o W e o C respectivamente de $19,26 \text{ g/cm}^3$ e $3,51 \text{ g/cm}^3$) deve ser assegurado uma boa distribuição do carbono neste material.

Pós de tungstênio e carbono são colocados juntos em um misturador rotativo ou em um moinho de bolas. Depois de misturados são colocados em um forno à vácuo e fundido a aproximadamente 1550°C para carbonizar o tungstênio e o carbono em monocarbeto (WC).

O propósito do processo de carbonização é produzir uma estequiometria de WC com certo teor de carbono podendo ter um pequeno excesso de carbono livre (de 0,01 a 0,03%). Na FIGURA 2.30 é mostrado o Diagrama de fases W-C em temperaturas elevadas. Nota-se que a faixa onde o WC tem a estequiometria desejada é bastante estreita (indicada pela seta), e segue desta forma até temperaturas mais baixas (KAEFER, 2004).

FIGURA 2.30 - Diagrama de fases do W-C

A carbonização é realizada na presença de hidrogênio em temperaturas na faixa de 1400 à 1600°C, mas as temperaturas são geralmente mantidas baixas para evitar o crescimento de grão no cristal de carbeto de tungstênio recém formado (GUTIÉRREZ, 2002). O hidrogênio reage com o negro de fumo para formar hidrocarbonetos gasosos (principalmente o metano, CH₄) o qual então reage com o W para formar o WC:

Existem outras técnicas para a produção de WC, uma delas é chamada Menstruum, que forma WC dentro de um metal auxiliar fundido com níquel ou cobalto. O minério de W e C são adicionados ao metal fundido e reagem em temperaturas próximas a 2000°C.

Existe também, uma técnica que emprega metais auxiliares, esta consiste na redução de uma mistura de minério de W e óxido de Fe com Al metálico e, simultaneamente, é feita a carbonização pela adição de cálcio e carbono. Outra técnica parte de precursores organometálicos para obtenção de WC nanoparticulado (GUTIÉRREZ, 2002).

CAPÍTULO 3

3 - METODOLOGIA

3.1 – Introdução

O material utilizado neste trabalho é o Carbetto de Tungstênio (WC). Os materiais frágeis quando submetidos às tensões de corte geralmente apresentam fraturas antes de uma considerável deformação plástica, porém podem ser usinados em regime dúctil em certas condições restritas. O regime frágil seria decorrente da redução da resistência causada pela geração de defeitos e microtrincas em decorrência da interação ferramenta/material durante a usinagem.

3.2 - Caracterização do material

3.2.1 - Análise da amostra utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V) é uma das formas que 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 são irradiados 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, como por exemplo, a composição química, a topografia da superfície, a cristalografia e outras características. (GOLDSTEIN, et al., 1992).

A M.E.V é uma técnica versátil para a análise das características microestruturais de objetos sólidos. A alta resolução quando se examinam objetos sólidos é a principal razão da sua grande aplicação, no entanto, torna-se necessário sua utilização neste projeto como parte do processo de caracterização do material. Com o objetivo de caracterizar a amostra (WC), utilizou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura do Instituto de Química de São Carlos (IQSC) da Universidade de São Paulo (USP).

O equipamento utilizado para análise de microscopia eletrônica de varredura consiste basicamente de duas partes principais: o gabinete que fornece acesso a todos os tipos de comandos e ajustes necessários ao funcionamento, e o microscópio onde encontra-se o canhão de elétrons (onde o feixe eletrônico é gerado), a câmara de amostras, os detectores e todo o sistema de vácuo (RODRIGUES,1997).

A FIGURA 3.1 mostra o gráfico gerado pelo Microscópio Eletrônico de Varredura. Por meio deste ensaio foi possível determinar com exatidão a quantidade em massa dos elementos predominantes que compõem o material a ser usinado, sendo eles o tungstênio (W) em 87,72% e o carbono (C) em 8,39%.

FIGURA 3.1 - Gráfico gerado pelo Microscópio Eletrônico de Varredura do IQSC.

3.2.2 - Medição da dureza da amostra

Neste procedimento será determinada a dureza da amostra a ser usinada utilizando um durômetro da LEICA do Laboratório de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos. Por meio deste equipamento, realizam-se microindentações por penetração com uma ponta de diamante no formato de pirâmide variando as cargas entre 5g e 500g. O resultado da medição realizada é obtido automaticamente. Os resultados das medições serão apresentados no capítulo 4.

3.2.3 - Análise de microindentações

Neste procedimento as microindentações geradas pelo ensaio de dureza são analisadas por meio do perfilômetro óptico Wyko[®] NT1100 (fabricado pela VEECO[®])¹ do Laboratório de Precisão da Escola de Engenharia de São Carlos – USP. O objetivo desta análise é determinar previamente algumas características do Carbetto de Tungstênio quando submetido à tensão/compressão.

O Wyko NT1100 (FIGURA 3.2) é uma versátil ferramenta que pode realizar uma ampla quantidade de medições de superfícies de amostras. Este equipamento consiste de uma base com recurso de inclinação para apoio das peças em análise, um sistema de translação para os eixos X e Y, medição objetiva e uma cabeça de medição montada no eixo Z. No interior da cabeça de medição está um Conjunto Óptico Integrado, a lente do campo de visualização e o filtro óptico. Uma importante característica deste equipamento é a alta resolução (0,1nm).

O equipamento fornece com precisão a rugosidade do material recebido (polido e bruto) e a profundidade das indentações, sendo possível analisar previamente as profundidades críticas de corte para o processo de torneamento.

FIGURA 3.2 - Perfilômetro WYKO – NT1100 do laboratório de engenharia de precisão da Escola de Engenharia de São Carlos utilizado para análise das microindentações

3.3 – Ensaios de usinagem

3.3.1 – Máquina e ferramenta utilizada nos ensaios

A amostra de WC será usinada em um torno de ultraprecisão ASG 2500 fabricado pela Rank Pneumo, atual Precitech (FIGURA 3.3). A resolução deste torno está na faixa de 10nm, estando habilitado a usinar formas complexas com exatidões dimensionais submicrométricas. O erro de posicionamento dos carros, sustentados por mancais hidrostáticos, e o eixo-árvore, aerostático, possibilitam que o torno produza acabamentos de alta qualidade na ordem de 75 Angstroms Ra em muitos materiais. Para obter resoluções e acabamentos superficiais desta ordem, o equipamento é constituído de um CNC série 8200 Allen Bradley, um sistema de realimentação interferométrico laser da HP e uma avançada tecnologia de servos produz um dos mais exatos sistemas de usinagem de ultraprecisão disponível (LÊDO, 1997).

FIGURA 3.3 - Torno de Ultraprecisão do Laboratório de Engenharia de Precisão da Escola de Engenharia de São Carlos.

Foram utilizadas ferramentas monocortantes CO60LG (ângulo de saída 0°) e CO60WG (ângulo de saída -25°) com ponta de diamante.

A FIGURA 3.4 apresenta uma das ferramentas com ponta de diamante que foram utilizadas neste trabalho.

FIGURA 3.4 – Ferramenta Monocortante com ponta de diamante

A rotação da peça foi mantida constante em 1000rpm e os avanços e profundidades de corte serão variados entre $0,5$ e $5\mu\text{m}$. Os parâmetros de corte são apresentados detalhadamente neste capítulo no item 3.3.3 “Definição dos parâmetro de usinagem”, na TABELA 3.1.

A temperatura do local (Laboratório de Precisão da Escola de Engenharia de São Carlos) foi mantida em aproximadamente 20°C. O fluido refrigerante utilizado foi o ALKALISOL 9000, direcionado para a região do corte através de um sistema de névoa.

O procedimento experimental foi composto pelas etapas que seguem abaixo:

- Preparo da amostra;
- Definição de Parâmetros de usinagem;
- Usinagem da amostra de WC.

3.3.2 - Preparo da amostra

A realização do nivelamento da face (FIGURA 3.5) tem como objetivo diminuir o erro de perpendicularismo da amostra com relação ao centro de giro do eixo árvore, quando a amostra é fixada na placa de vácuo do torno. Este processo melhora a uniformidade da profundidade de corte durante a realização do processo de usinagem.

A FIGURA 3.5 mostra a fixação da amostra no suporte de alumínio. Fixa-se a amostra de Carbetto de Tungstênio (1) ao suporte de alumínio (2) com cera, sendo este posteriormente apoiado (com a amostra de WC colada) a um desempeno (3) que é a referência para esta medição. Com um apalpador (4) conectado a um sistema analógico (5) verifica-se o paralelismo da superfície da amostra em relação à superfície de referência ao deslizar o suporte de alumínio sobre o desempeno.

Para este experimento o erro de paralelismo não deverá exceder a 1 μm (ou 1000nm) e para garantir esta condição o ajuste é feito por meio de três parafusos de fixação (6).

FIGURA 3.5 – Representação do nivelamento da amostra no desempenho utilizando relógio apalpador

3.3.3 - Definição dos parâmetros de usinagem

Assim, como diversos fatores que merecem grande atenção nos experimentos de usinagem, a escolha dos parâmetros é um fator considerado de extrema importância, pois ele influencia diretamente no resultado final do trabalho.

Baseado em análises da microindentação da amostra e em trabalhos de usinagem já realizados com materiais frágeis (JASINEVICIUS, 1998 e PAGOTTO, 1998), foram definidas algumas faixas com profundidades (a_p) e avanços (f) variados entre 0,5 e 5,0 μ m para a realização do experimento conforme a TABELA 3.1.

A ferramenta CO60LG foi usada para usinar as faixas de 1 a 7 e a ferramenta CO60WG para usinar as faixas de 8 a 14. Os dois tipos de ferramentas possuem raio de ponta de 1.520mm e ângulo de folga de 12°.

Na TABELA 3.1 são apresentados os parâmetros para o procedimento experimental.

TABELA 3.1 - Condições de corte e geometria das ferramentas utilizadas nos ensaios.

FAIXA	<i>Ângulo de folga</i>	<i>Raio de ponta(mm)</i>	<i>Rotação/m in</i>	<i>Ângulo de saída</i>	<i>Profundidade de corte (μm)</i>	<i>Avanço ($\mu m/rev.$)</i>
1	12°	1,52	1000	0°	0,50	1,00
2	12°	1,52	1000	0°	1,00	1,00
3	12°	1,52	1000	0°	2,00	1,00
4	12°	1,52	1000	0°	0,50	3,00
5	12°	1,52	1000	0°	1,00	3,00
6	12°	1,52	1000	0°	2,00	3,00
7	12°	1,52	1000	0°	5,00	1,00
8	12°	1,52	1000	-25°	0,50	1,00
9	12°	1,52	1000	-25°	1,00	1,00
10	12°	1,52	1000	-25°	2,00	1,00
11	12°	1,52	1000	-25°	0,50	3,00
12	12°	1,52	1000	-25°	1,00	3,00
13	12°	1,52	1000	-25°	2,00	2,50
14	12°	1,52	1000	-25°	5,00	4,50

Será utilizada uma amostra de carbetto de tungstênio (WC) policristalino nas dimensões 14mm de diâmetro por 8mm de espessura. Será feito o torneamento de face com ferramenta de diamante a partir do estado polido utilizando uma máquina ferramenta de ultraprecisão.

A FIGURA 3.6 representa as faixas de usinagem na amostra de Carbetto de Tungstênio. A ordem de usinagem segue uma sequência crescente, ou seja, primeiro Faixa 1, segundo Faixa 2 e assim sucessivamente até a Faixa 7. Após a usinagem das sete primeiras faixas a amostra será analisada por perfilometria óptica e microscopia de varredura e posteriormente a amostra voltará para a máquina (torno) para a usinagem das faixas 8 a 14 na mesma face. A escolha desta sequência de usinagem é em função do desgaste da ferramenta, pois se acredita que ao iniciar o experimento com os avanços e profundidades menores, é possível manter a integridade da ferramenta durante todo o experimento.

FIGURA 3.6 - Representação das faixas de usinagem na amostra de WC

3.2.4 - Usinagem da amostra de Carbeto de Tungstênio WC

Após o nivelamento fixa-se o suporte de alumínio na placa do torno de precisão através do sistema de vácuo. Com ferramentas, parâmetros de corte e programa CNC definidos para o experimento, inicia-se o processo de usinagem a partir do estado polido. Todas as faixas usinadas foram medidas através de perfilômetria óptica e microscopia eletrônica de varredura. Todos os resultados foram analisados e discutidos posteriormente para definição das características de usinagem do carbeto de tungstênio utilizando ferramenta de ponta única de diamante. A FIGURA 3.7 é uma foto retirada durante a realização dos ensaios de torneamento da amostra de carbeto de tungstênio.

FIGURA 3.7 - Foto retirada durante a usinagem da amostra de Carbetto de Tungstênio

Para melhor entendimento do experimento a FIGURA 3.8 representa detalhadamente o esquema de torneamento da amostra durante o experimento no torno de ultraprecisão.

FIGURA 3.8 – Representação do procedimento experimental no torno de ultraprecisão

CAPÍTULO 4

4 – RESULTADOS

4.1 – Considerações Iniciais

A usinagem de materiais frágeis através de arestas múltiplas indefinidas (rebolos ou partículas abrasivas livres) ou aresta única definida (ferramenta com ponta única de diamante) podem provocar alterações estruturais no cristal em função das tensões geradas durante o processo de usinagem, isto pode implicar a geração de discordâncias e microtrincas na superfície. Tensões de tração podem ser consideradas responsáveis pela geração de microtrincas. Estes defeitos propagam-se sobre os planos de clivagem ultrapassando a zona de contato (ferramenta/material) (JASINEVICIUS, 1998).

Para componentes com aplicação no campo da óptica, eletrônica e micro-mecânica, onde se exige alta qualidade no acabamento, a presença de danos superficiais, por mais reduzidos que sejam, afetam e até comprometem o desempenho destes componentes (JASINEVICIUS 1998).

Durante o processo de usinagem, o Carbetto de Tungstênio é submetido a grandes quantidades de deformações mecânicas. O processo de usinagem tem por objetivo fornecer acabamentos com qualidade óptica, portanto, a remoção de material deve ocorrer dentro do regime dúctil, ou seja, a superfície da peça deve estar livre de trincas após o processo de usinagem.

4.2 – Resultados da caracterização do material

4.2.1 – Resultados do ensaio de dureza

Para determinação da dureza do carbeto de tungstênio, as amostras foram submetidas a ensaios de dureza. Nesta etapa do procedimento utilizou-se um durômetro do Laboratório da Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, sendo este equipamento preparado para medição em Vickers (ponta de diamante em forma de pirâmide). A TABELA 4.1 apresenta as cargas aplicadas neste ensaio, bem como os respectivos resultados de dureza.

TABELA 4.1 - Resultados da dureza obtidos da amostra de carbeto de tungstênio.

MEDIÇÃO DA DUREZA DA AMOSTRA DE CARBETO DE TUNGSTÊNIO.						
CARGA (g)	DIAGONAL	DUREZA (HV)		CARGA (g)	DIAGONAL	DUREZA (HV)
5	1,4	4281		25	3,6	3576
	1,5	4084			3,4	4049
	1,4	5061			3,5	3760
	1,4	5061		100	7,6	3334
10	2,1	4229			7,6	3245
	2,1	4128			7,5	3256
	2	4829		200	11	3090
	2,1	4881			11,2	2938
15	2,6	3882			10,8	3141
	2,7	3796		500	18,3	2762
	2,7	3691			18,6	2672
	2,7	3691			18,7	2661

4.2.2 – Resultados da análise das microindentações

Foram analisadas as microindentações produzidas na amostra pelo ensaio de dureza. O objetivo desta análise é estudar previamente as profundidades críticas de penetração para o carbeto de tungstênio e aplicar os resultados nos ensaios de usinagem.

A FIGURA 4.1 representa medições das indentações com carga de 200g, realizadas no perfilômetro óptico Wyko – NT1100. Nesta figura, podem-se analisar as dimensões da pirâmide do indentador conformada na superfície da amostra. A FIGURA 4.1(c) apresenta um gráfico da indentação onde é possível visualizar a medida da metade da diagonal da pirâmide (5,55 μm) e a profundidade da microindentação (1,01 μm).

FIGURA 4.1 - Diagonal e profundidade da Microindentação aplicando carga de 200g.

A FIGURA 4.2 apresenta a indentação realizada com carga de 500g onde é possível visualizar a medida da metade da diagonal da pirâmide ($9,21\mu\text{m}$) e a medição da profundidade da indentação ($1,51\mu\text{m}$), ambas representadas no gráfico (c).

FIGURA 4.2 - Medição da profundidade da Microindentação aplicando carga de 500g

Comparando os resultados apresentados na FIGURA 4.1 e 4.2 é possível observar a diferença de comportamento do material (WC) quando submetido às diferentes tensões. A FIGURA 4.1 apresenta a microindentação na amostra com carga menor (200g), nesta a impressão do indentedor é perfeita e uniforme, ou seja, o material não apresentou danos. Na FIGURA 4.2 é apresentado o resultado da microindentação com carga maior (500g) onde se observa o início de trincas nas extremidades da diagonal da pirâmide, sugerindo que a tensão aplicada ultrapassou o limite de escoamento do material.

Esta análise mostra que a remoção plástica de materiais frágeis pode ocorrer dentro de um pequeno volume deformado sem a ocorrência de trincas sem restrição à existência de fluxos superficiais, conforme apresentado no capítulo 2.1.4.

4.3 - Resultados da usinagem de ultraprecisão em Carbetto de Tungstênio.

4.3.1 - Análise da superfície da amostra.

Diversas medições de rugosidades foram realizadas para este estudo devendo-se ressaltar que dentre estas foram escolhidas apenas algumas devido à alta repetibilidade dos resultados obtidos. O acabamento das superfícies usinadas foi registrado pelo perfilômetro óptico Wyko – NT 1100 (VEECO) e pelo microscópio eletrônico de varredura do Instituto de Química.

É importante lembrar que os quatro primeiros resultados de usinagem (faixas de 1 a 7) foram obtidos utilizando ferramenta com ângulo de saída de 0° (CO60LG) e os outros (faixas de 8 a 14) foram obtidos utilizando ferramentas com ângulo de saída de -25° (CO60WG), ambas com 1,52mm de raio de ponta e 12° de ângulo de folga.

Na FIGURA 4.3 é mostrado o resultado de usinagem da primeira condição de corte estabelecida (Faixa 1), na qual se podem avaliar diversas características produzidas no processo de usinagem. Para esta etapa do experimento usou-se profundidade de corte de 0,50 μm . As ranhuras com equidistâncias de 1 μm foram geradas pela ação da ponta da ferramenta durante o processo de usinagem, esta característica pode ser mais bem observada na FIGURA 4.3(e) onde a vista bidimensional apresenta metade do passo da ferramenta (0,53 μm) e a amplitude dos sulcos formados pela ferramenta (0,032 μm). Na FIGURA 4.3(b) a tabela indica $R_a=18,01\text{nm}$. Nota-se nas figuras 4.3(a) e 4.3(d) a ausência de microtrincas ou fraturas na superfície usinada, caracterizando a usinagem em regime “dútil”.

(4.3b)

(4.3 c)

(4.3 d)

(4.3 e)

FIGURA 4.3 - Resultado de usinagem da Faixa 1

A FIGURA 4.4 mostra o resultado da usinagem com a segunda condição de corte (Faixa 2). Para esta etapa do experimento aumentou-se a profundidade de corte para 1,00 μm . Desta maneira é possível analisar o comportamento do WC quando submetido a tensões maiores durante a usinagem.

FIGURA 4.4 - Resultado de usinagem da Faixa 2

Observa-se na FIGURA 4.4(a) e 4.4(d) o aparecimento de algumas microtrincas (indicadas por setas) geradas durante o processo de usinagem. Apesar do aparecimento de microtrincas na região usinada, a maior parte da superfície apresenta usinagem em regime dúctil.

Na FIGURA 4.5 é mostrado o resultado da usinagem com a terceira condição (Faixa 3). Para esta etapa do experimento aumentou-se a profundidade de corte para $2,00\mu\text{m}$.

FIGURA 4.5 - Resultado de usinagem da Faixa 3

Neste ensaio é possível observar o comportamento do WC quando submetido a tensões originadas pelo esforço da usinagem com profundidade de corte de 2,00 μ m.

Com o aumento da profundidade de corte para 2,00 μ m, observa-se na FIGURA 4.5 o aparecimento de maior quantidade de microtrincas na região usinada. Notam-se nitidamente nesta região, que a profundidade de 2,00 μ m resultou grandes quantidades de *pittings* (crateras) na superfície usinada. Este resultado na inspeção visual caracteriza o regime frágil pela ocorrência de danos superficiais. Por outro lado, observa-se que, apesar do surgimento de alguns danos superficiais, o resultado de rugosidade é compatível com o torneamento de ultraprecisão ($R_a=13,73\text{nm}$).

Nota-se que os resultados de usinagens estão coerentes com os ensaios de microindentação, pois o aparecimento das microtrincas ocorre quando a profundidade de penetração é maior que 1 μ m para ambos os processos (indentação e torneamento).

As FIGURAS 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam os resultados para o avanço (f) de 3,00 μ m/revolução utilizando a mesma ferramenta (CO60LG, ângulo de saída 0°). As profundidades de corte são repetidas conforme os experimentos anteriores.

A FIGURA 4.6 apresenta o resultado de usinagem com a quarta condição de corte (Faixa 4) com profundidade de 0,50 μ m e avanço 3 μ m/revolução.

(4.6 b)

(4.6 a)

(4.6 c)

(4.6 d)

(4.6 e)

FIGURA 4.6 - Resultado de usinagem da Faixa 4

A rugosidade aumentou consideravelmente quando comparada com o resultado obtido na primeira condição de corte (Faixa 1), nota-se que a rugosidade (Ra) aumentou de 18,01nm para 138,52nm. Pode-se atribuir esta diferença de rugosidade ao aumento da taxa de avanço,

sendo esta única variável alterada no experimento, já que a profundidade de corte foi mantida em $0,50\mu\text{m}$

As FIGURAS 4.7 e 4.8 apresentam outras usinagens com $3,00\mu\text{m}/\text{revolução}$, porém com profundidades de 1 e $2\mu\text{m}$ respectivamente. Na Faixa 5 com profundidade de $1\mu\text{m}$ pode-se observar a pouca influência do aumento da profundidade (a_p) nos resultados de rugosidade, entretanto, na faixa 6, com profundidade de $2\mu\text{m}$ nota-se aumento significativo da rugosidade.

FIGURA 4.7 - Resultado de usinagem da Faixa 5

FIGURA 4.8 - Resultado de usinagem da Faixa 6

Na FIGURA 4.9 é apresentado o resultado da usinagem da Faixa 7. Para esta etapa do experimento aumentou-se a profundidade de corte para 5,00 μm .

FIGURA 4.9 - Resultado de usinagem da Faixa 7

Podem-se observar grandes fraturas nas imagens da FIGURA 4.9 onde quase não é possível diferenciar a região cortada e não cortada, nota-se que a superfície da peça ficou totalmente danificada. Na FIGURA 4.9(a) observam-se severas crateras (*pitting*), podendo estes ser danos introduzidos através de microfraturas.

A FIGURA 4.10 é uma foto retirada no perfilômetro VEECO onde se podem comparar as duas superfícies usinadas das Faixas 2 e 3 com profundidades de corte na ordem de 1,00 e 2,00 μm . Nota-se o aumento de crateras na medida em que se aumenta a profundidade.

FIGURA 4.10 - Foto comparativa do torneamento de ultraprecisão entre as profundidades de corte de 1,00 e 2,00 μm .

Na comparação entre as duas profundidades de corte (1,00 e 2,00 μm) observa-se o aparecimento de crateras quando ultrapassada a profundidade de 1,00 μm . Não haverá estas comparações para a primeira faixa (0,50 μm), devido esta não apresentar trincas ou crateras conforme visto anteriormente na FIGURA 4.4.

A FIGURA 4.11 mostra o mesmo resultado da FIGURA 4.10 agora projetada pelo perfilômetro Wyko NT1100.

FIGURA 4.11 - Imagem comparativa no perfilômetro óptico do torneamento de ultraprecisão entre as profundidades de corte de 1,00 e 2,00 μm .

As FIGURAS 4.12, 13, 14 apresentam os resultados de usinagem das faixas 8 a 14 com a ferramenta CO60WG (ângulo de saída de -25°). Os parâmetros de corte são alterados conforme os experimentos realizados anteriormente com a ferramenta de ângulo 0° .

FIGURA 4.12 - Resultado de usinagem da Faixa 8

(4.13 b)

(4.13c)

(4.13 d)

(4.13 e)

FIGURA 4.13 - Resultado de usinagem da Faixa 9

(4.14 b)

(4.14c)

(4.14d)

(4.14 e)

FIGURA 4.14: Resultado de usinagem da Faixa 10

As FIGURAS 4.15, 4.16, 4.17 apresentam os resultados do avanço (f) para 3,00µm/revolução a ferramenta (CO60WG, ângulo de saída -25°). As profundidades de corte serão repetidas conforme os experimentos anteriores.

FIGURA 4.15: Resultado de usinagem da Faixa 11

FIGURA 4.16: Resultado de usinagem da Faixa 12

FIGURA 4.17: Resultado de usinagem da Faixa 13

Nesta imagem é possível observar nitidamente o escoamento lateral do material.

FIGURA 4.18: Resultado de usinagem da Faixa 14

Os resultados de usinagem com avanço de $3,00 \mu\text{m/rev}$ usando ferramenta com ângulo de saída igual de -25° demonstram resultados de rugosidade incompatíveis com o

torneamento de ultraprecisão, pois houve um aumento considerável no valor da rugosidade quando comparado com os experimentos que usaram avanço de $1\mu\text{m}/\text{revolução}$.

As FIGURAS 4.19, 4.20 e 4.21 apresentam imagens retiradas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura da superfície da amostra usinada com ferramenta com ângulo de saída 0° , onde é possível visualizar as marcas deixadas pela ação da ponta da ferramenta.

FIGURA 4.19 - Imagem gerada pelo M.E.V com os seguintes parâmetros: profundidade de corte = $2,00\mu\text{m}$; avanço = $1,25\mu\text{m} / \text{revolução}$ Rotação = 1000RPM.

FIGURA 4.20 - Imagem gerada pelo M.E.V com os seguintes parâmetros: profundidade de corte = 2,00 μ m; avanço = 2,50 μ m / revolução Rotação = 1000RPM.

FIGURA 4.21 - Imagem gerada pelo M.E.V com os seguintes parâmetros: profundidade de corte = 5,00 μ m; avanço = 5,00 μ m / revolução Rotação = 1000RPM.

A FIGURA 4.22 apresenta a imagem da superfície polida da amostra de WC que utilizamos nestes ensaios, nesta podemos analisar e comparar o acabamento e qualidade especular em relação ao acabamento obtido pelo processo de torneamento de ultraprecisão.

(4.22 b)

(4.22c)

(4.22d)

FIGURA 4.22 - Superfície polida da amostra de WC em perspectiva isométrica com rugosidade superficial de 20,22 nm.

Na vista em perspectiva da FIGURA 4.22 (a) observa-se a presença de crateras na superfície. Este tipo de irregularidade no material pode ser originado por trincas geradas no processo de polimento ou até mesmo ser uma falha intergranular do material. Outra característica que deve ser ressaltada no polimento são os riscos discordantes deixados após o

processo, ainda na vista (a) é possível a visualização de um dos riscos. No processamento de materiais frágeis, o polimento dá a peça uma textura especular com alto grau de acabamento, porém, os riscos desordenados podem comprometer a qualidade óptica do material, necessárias a várias aplicações.

Na FIGURA 4.23 são apresentadas duas imagens na qual pode ser comparado o resultado do processo de torneamento com o processo de polimento. A baixa rugosidade que ambos os processos proporcionam ($R_a=13,60\text{nm}$ para o torneamento e $R_a=20,22\text{nm}$ para o polimento).

FIGURA 4.23: Comparativo entre Torneamento de Ultraprecisão X Polimento. (a) Superfície com aplicação do torneamento de ultraprecisão ($R_a=13,60\text{nm}$), (b) Superfície polida da amostra conforme recebido ($R_a=20,22\text{nm}$).

As tabelas 4.2 e 4.3 apresentam resumidamente os resultados obtidos nos experimentos de usinagem.

TABELA 4.2 – Resumo dos resultados obtidos com ferramenta CO60LG (saída 0°)

FAIXA	IMAGEM	Saída	f ($\mu\text{m}/\text{rev}$)	ap (μm)	Ra (nm)
1		0°	0,50	1,00	18,01
2		0°	1,00	1,00	16,46
3		0°	2,00	1,00	13,73
4		0°	0,50	3,00	138,52
5		0°	1,00	3,00	145,50
6		0°	2,00	3,00	244,27
7		0°	5,00	1,00	29,49

TABELA 4.3 – Resumo dos resultados obtidos com ferramenta CO60WG (saída -25°)

FAIXA	IMAGEM	Saída	f ($\mu\text{m}/\text{rev}$)	ap (μm)	Ra (nm)
8		-25°	0,50	1,00	6,67
9		-25°	1,00	1,00	10,70
10		-25°	2,00	1,00	8,47
11		-25°	0,50	3,00	40,40
12		-25°	1,00	3,00	64,23
13		-25°	2,00	2,50	136,01
14		-25°	5,00	4,50	112,85

A FIGURA 4.24 mostra o efeito dos parâmetros de corte na usinagem do carbeto de tungstênio.

Rugosidade (nm) Ra

FIGURA 4.24 – Gráfico dos resultados de rugosidade (Ra) em função da profundidade de corte e avanço.

4.3.2 - Análise dos cavacos

Outro fator importante que se deve levar em consideração neste estudo para a caracterização do torneamento em regime dúctil de materiais frágeis é a geometria do cavaco produzido durante o processo. A formação de cavaco na usinagem dos materiais frágeis pode ser descrita como sendo o resultado do cisalhamento imposto pela ponta da ferramenta (BLACK, 1979). Este processo envolve altas taxas de deformações e alta deformação. O material escoia plasticamente sobre um plano de cisalhamento na forma de pequenos blocos de material denominado lamelas. Quando o corte é predominantemente frágil, os cavacos formados não conseguem manter a sua integridade, os pedaços grandes de cavacos juntamente com farelos são encontrados sobre a superfície.

As FIGURAS 4.25 e 4.26 são exemplos que representam a ocorrência de usinagem no regime frágil. A usinagem foi realizada com ferramenta CO60WG e com profundidades de corte e avanços superiores a $1,00\mu\text{m}$. Os cavacos identificados pela circunferência vermelha não conseguiram manter a sua integridade, sendo eles em formatos indefinidos e com aparência de pó.

FIGURA 4.25 – Cavaco na ponta da ferramenta gerado pelo processo de usinagem com ferramenta CO60WG. Ampliação 76X.

FIGURA 4.26 – Cavaco gerado pelo processo de usinagem com ferramenta CO60WG.
Ampliação 6800 X.

As FIGURAS 4.27 e 4.28 apresentam superfícies com cavacos gerados no processo de usinagem com ferramenta CO60LG. Nesta usinagem foram utilizados profundidade de corte e avanço inferiores a 1µm. O avanço foi mantido em 1,00 µm/revolução.

FIGURA 4.27 – Superfície usinada com ferramenta CO60LG / Ampliação 113 X

FIGURA 4.28 – Detalhe da superfície usinada com ferramenta CO60LG / Ampliação 2000 X.

Na FIGURA 4.28 observa-se uma quantidade considerável de cavacos gerados em forma de fita que caracterizam uma provável ocorrência da remoção de cavaco em regime dúctil.

4.3.3 - Análise da aresta da ferramenta.

Durante a operação de torneamento com ferramenta de diamante, a aresta de corte é submetida a pressões e temperaturas elevadas. Em decorrência disso, tensões muito altas aliadas à liberação de energia térmica podem desencadear o processo de desgaste e, possivelmente, introduzir danos na superfície do material usinado.

Quando microdesgastes e/ou microlascamentos ocorrem, ferramentas de diamante passa lenta e gradualmente a prejudicar o acabamento superficial, tornando as forças de corte e de atrito cada vez maiores (JASINEVICIUS, 1998)

Os resultados, apresentados aqui, baseiam-se em observações feitas da aresta de corte através de Microscopia Eletrônica de Varredura. Deve-se ressaltar que o objetivo deste item é apenas apresentar qualitativamente o desgaste das ferramentas utilizadas nos ensaios de usinagem do carboneto de tungstênio.

A FIGURA 4.29 apresenta uma ferramenta nova ampliada 500 vezes. Não é possível observar danos na aresta de corte.

FIGURA 4.29 – Exemplo de aresta de corte de uma ferramenta nova. Ampliação 500X

As duas ferramentas utilizadas foram analisadas durante o experimento de usinagem por meio de um microscópio óptico do Laboratório de Precisão e, no término dos ensaios as arestas destas ferramentas foram fotografadas no microscópio LEICA do Laboratório de Engenharia de Materiais.

Aparentemente não se notou desgaste ou trincas nas ferramentas quando utilizados parâmetros a_p e f até 2 e 1 μm respectivamente. Para os parâmetros que ultrapassaram estes valores observou-se o aparecimento de trincas na aresta das ferramentas.

A FIGURA 4.30 mostra a aresta de corte de uma ferramenta com ângulo de saída 0° . Para esta ferramenta foram utilizados parâmetros até 2 μm de profundidade de corte (a_p) e avanço (f) até 3 $\mu\text{m}/\text{revolução}$.

FIGURA 4.30 – Aresta de corte de uma ferramenta CO60LG ($\gamma=0^\circ$) após processo de usinagem. Ampliação 50X.

As FIGURAS 4.31 e 4.32 apresentam imagens de arestas de ferramentas cujos valores de profundidade de corte atingiram 5 μm (a_p) e avanço 3 $\mu\text{m}/\text{revolução}$ (f).

FIGURA 4.31 – Aresta de corte de uma ferramenta CO60LG ($\gamma=0^\circ$) após processo de usinagem. Ampliação 500X

FIGURA 4.32 – Aresta de corte de uma ferramenta CO60LG ($\gamma=0^\circ$) após processo de usinagem Ampliação 500X.

4.3.4 - Análise visual da superfície da amostra.

A FIGURA 4.33 apresenta a amostra de carbetto de tungstênio após a finalização do experimento. Por meio destas fotos é possível observar o acabamento “espelhado” que a usinagem de ultraprecisão proporcionou em algumas faixas da amostra.

FIGURA 4.33 – Fotos da superfície usinada da amostra de Carbetto de Tungstênio.

CAPÍTULO 5

5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 - Conclusões

Com o objetivo de estudar a usinabilidade do carbetto de tungstênio (WC) policristalino e determinar experimentalmente a fase frágil-dúctil para o torneamento de ultraprecisão deste material, foram realizados experimentos nos quais algumas das condições de corte foram variadas para avaliar o efeito sobre a usinagem.

A lapidação e polimento são os processos tradicionalmente usados para o acabamento de materiais frágeis, porém, são limitados tanto em termos de taxa de remoção quanto à forma dos componentes produzidos. Na retificação a não uniformidade dos grãos da face dos rebolos produzem diversos modos de remoção de material, dificultando a produção de superfícies ópticas, além disso, a retificação é essencialmente dependente dos grãos mais protuberantes e as taxas de remoção podem não ser significativamente maiores que as alcançáveis com ferramentas de ponta única. Foi escolhido, preliminarmente neste estudo, o torneamento com ponta única de diamante por ser um processo mais determinístico.

No experimento foram realizadas usinagens de 12 faixas com comprimento de 0,50mm. Os parâmetros de corte foram variados para avaliar sua influência no acabamento e integridade da superfície da amostra. Foram utilizadas profundidades de 0,50; 1,00; 2,00 e 5,00 μ m, avanços de 1 e 3 μ m/revolução e ferramentas com ponta de diamante com ângulo de saída de 0 e -25°. Também foram usinadas duas faixas adicionais com profundidades de 5 μ m com o objetivo de avaliar o comportamento do WC quando submetido a severas profundidades de corte.

A FIGURA 4.19 apresenta o gráfico das rugosidades em R_a obtidas no experimento. Nesta análise não foi considerado os valores de rugosidade em R_t devido à medição dos picos e vales ser realizada em toda a área usinada, gerando valores de rugosidade não conclusivos para estudo.

Na FIGURA 4.24 a linha do gráfico com pontos triangulares (verde) representa os valores de rugosidade em R_a da Faixa 8 (6,67nm), Faixa 9 (10,70nm) e Faixa 10 (8,47nm), obtidos com avanço fixo em $1\mu\text{m}/\text{revolução}$, γ igual a -25° e profundidade (a_p) de 0,50; 1,0 e $2,0\mu\text{m}$, respectivamente. Observa-se nesta etapa do experimento que não ocorreu alteração significativa da rugosidade com o aumento da profundidade de corte. Estes resultados são semelhantes ao observar a linha do gráfico com pontos quadrados (azul) quando realizada a usinagem com ferramenta com ângulo de saída de 0° na Faixa 1 (18,01nm), Faixa 2 (16,46nm) e Faixa 3 (13,73nm), ocorrendo apenas um pequeno aumento de rugosidade.

Ainda na FIGURA 4.24 observa-se o aumento significativo nos resultados de rugosidade. A linha do gráfico com pontos circulares (roxo) representa os valores de rugosidade em R_a da Faixa 4 (40,40nm), Faixa 5 (64,23nm) e Faixa 6 (136,01nm), obtidos com avanço fixo em $3\mu\text{m}/\text{revolução}$, γ igual a -25° e profundidade (a_p) de 0,50; 1,0 e $2,0\mu\text{m}$, respectivamente. Os resultados também são semelhantes para a linha do gráfico com pontos quadrados (vermelho) onde a usinagem foi realizada com os mesmos parâmetros, porém com ferramenta com ângulo de saída de 0° .

Conforme a análise do gráfico da FIGURA 4.24 conclui-se que o para avanços da ordem de $1\mu\text{m}/\text{revolução}$ a profundidade de corte (a_p) não influencia significativamente no resultado de rugosidade, porém, observou-se trincas na aresta de corte das ferramentas para profundidades de corte maiores que $2\mu\text{m}$. Para avanços da ordem de $3\mu\text{m}/\text{revolução}$ a profundidade de corte influencia com grande significância no resultado de rugosidade.

O torneamento do carbeto de tungstênio usando ferramenta de diamante mostrou-se uma opção viável à produção de superfícies em termos de qualidade óptica, porém, devido à alta dureza deste material (aproximadamente 4000HV) o torneamento mostrou ser um processo com condições limitadas para a produção em série de componentes em função da baixa taxa de remoção de material permitida. É possível que a retificação possa apresentar taxas de remoção maiores, mesmo assim garantindo a qualidade superficial atingida pelo

torneamento, ou ainda, a retificação possa ser usada como um processo no desbaste do carbeto de tungstênio seguido do torneamento de ultraprecisão como uma opção viável a produção em série de peças.

Portanto verificou-se neste trabalho que para a obtenção de uma superfície de carbeto de tungstênio sem danos e com acabamentos da ordem de 10nm, a profundidade e avanço não devem ser superiores a 2,00μm e 1,00μm/revolução respectivamente, usando uma ferramenta de diamante nova com ângulo de saída de 0° ou -25° e uma máquina-ferramenta de alta precisão.

5.2 - Sugestões para trabalhos futuros

Procurar estabelecer uma relação entre os esforços nas usinagens e a ductilidade apresentada pelo carbeto de tungstênio.

Fazer o estudo do ombro não cortado do carbeto de tungstênio no torneamento de ultraprecisão.

Aplicar técnicas de monitoramento no processo de torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis.

Estudar a retificação como um processo viável no desbaste do carbeto de tungstênio seguido do torneamento de ultraprecisão como uma opção viável a produção em série de componentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHKEROV, Y.; MINAYEV, A. I, Standing for diamond turning of aspherical optical surfaces, v 55, n. 5, p. 319-321, 1988.

BIFANO, T.G ., DOW, T.A ., SCATTERGOOD, R.O, Ductile regime grinding of brittle materials, *Ultraprecision in manufacturing engineering*, pp. 23-40, 1988.

BIFANO, T.; DOW, T. A.; SCATTERGOOD, R. O, Ductile regime grinding: a new technology for machining brittle materials. *Trans. ASME J. of Ind.*, v. 113, p. 184-189, 1991.

BLAKE, P.N, Ductile-regime machining of Ge and Si, PhD. Thesis, North Caroline State, Raleigh, N.C, 1988.

BLACKLEY, W.S., SCATTERGOOD, R.O, Crystal Orientation dependence of machining damage – Stress mode *J. Am. Ceram. Soc.*, V.73 (10):3113-3115, 1990.

BLACKLEY, W. S.; SCATTERGOOD, R. O, Mechanics of material of removal in diamond turning. *Precision Engineering Center*, North Carolina State University, p. 68-71, 1990.

BLACKLEY, W. S., SCATTERGOOD, R. O. (1991). “Ductile regime machining model for diamond turning of brittle materials, *Precision Engineering*”, V. 13(2), p. 95-102, 1991.

BLACKLEY, W. S.; SCATTERGOOD, R. O, “Chip topography for ductile regime machining of Ge”. *J. of Eng for Industry*, v. 116, n. 2, p. 263-266, 1994.

BLACKLEY, W.S., Scattergood, R.O, “Crystal Orientation dependence of machining damage – Stress model” *J. Am Ceram. Soc.*, Vol.73 (10): 3113-3115, 1990.

BLOUGH, C.G., ROSSI, M., MACK, S.K., MICHAELS, R.L, Single point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical element *Appl. Opt.*, V. 36, p. 4648-4654, 1997.

BUIJS, M., KORPEL, K, A model of lapping of glass, *Journal of Materials Science*, V.28, p. 3014-3020, 1993.

CHAO, C.L., PhD Thesis, Cranfield Institute of Technology. School of Industrial an Manufacturin Science, p. 203p, 1992.

DELANOE, A., BACIA, M., PAUTY, M., LAY, S., ALLIBERT, C.H, Cr-rich layer at the WC/Co interface in Cr-doped WC–Co cermets: segregation or metastable carbide?. *Journal of Crystal Growth*, September, 2003.

DUDUCH, J. G, Some critical aspects of machine design and performance for the machining of brittle materials, Thesis (PhD) – Cranfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science, p. 168, 1993.

FORNARO, R. J.; DOW, T. A, A high performance machine tool controller. Proc IEEE, v. 34, p. 1429-1439, 1998.

GOLDSTEIN, J.I. Scanning Microscopy and X-Ray Microanalysis, second edition, New York City, Plenum Press, 1992.

GOMES, U. U. (1995) Tecnologia dos Pós – Fundamentos e Aplicações. Natal. UFRN Editora Universitária.

GUTIÉRREZ, J. A. E. Extração de ligantes e Sinterização por Plasma de Metal Duro. Florianópolis-SC, 2002.

INASAKI, I. Grinding of hard and brittle materials, Annals of Cirp, V.36(2), p. 463-471, 1987.

JASINEVICIUS, R. G. Influência da transição de fase sobre os limites de ductibilidade observados no torneamento de ultraprecisão do silício monocristalino. 1998. 173 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2004.

KAEFER, L. F. (2004). Análise do comportamento eletroquímico de revestimentos de carbeto de tungstênio cimentados obtidos por aspersão térmica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

LAWN, B.R., EVANS, A.G. A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields”, J. of Materials Science, Vol. 12, p. 2295-2199, 1977.

LAWN, B. R., SWAIN, M. V. Microfature beneath point indentations in brittle solids”. Journal of Materials Science, v. 10, n. 1, p. 113-122, 1975.

LÊDO, H.O. Aplicação da microindentação instrumentada em superfícies de alumínio usinadas com ferramenta de diamante de ponta única, Dissertação Mestrado, EESC-USP, 1997.

Usinagem de Ultraprecisão. Livro. Organizador: Artur José Vieira Porto – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2004.

NAKASUJI, T. et al. “Diamond turning of brittle materials for optical components”. Annals of the CIRP, V. 39, n. 1, p. 89-92, 1990.

PURQUERIO, B.M., PORTO, A J.V., JASINEVICIUS, R.G. O torneamento de ultraprecisão já é possível também no Brasil, Máquinas e Metais, p. 106-116, Março, 1994.

PINTO, G. B. Análise do efeito do tempo de moagem de alta energia no tamanho de cristalito e microdeformação da rede cristalina do WC-C, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, 2008.

PAGOTTO, C.R. Análise do processo de torneamento do silício policristalino” Dissertação Mestrado, EESC-USP, p. 6-7, 1998.

PINTO, G. B. Análise do efeito do tempo da moagem de alta energia no tamanho de cristalito e microdeformação da rede cristalina do WC-Co, Dissertação apresentada a Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

RANK PNEUMO INC. Catálogo Técnico ASG 2500, Precision Park, New Hampshire.

RODRIGUES, S.G. Estudo de Técnicas de Microscopia para Caracterização Estrutural de Heteroestruturas Semicondutoras, Dissertação apresentada ao IFSC da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

SCHROETER, R.B. Usinagem de ultraprecisão de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho, Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 1997.

SHIBATA, T., FUJII, S., MAKINO, E., IKEDA, M. Ductile-regime turning mechanism of single crystal Si”, *Prec. Engg.*, V.18 (2/3): 129-137, 1996.

TANIGUCHI, N. The state of the art of nanotechnology for processing of ultraprecision and ultrafine products, *Precision Engineering*, V. 16(1), p. 5-54, 1993.

TONSHOFF, H.K., SCHMIEDEN, W.V., INASAKI, I., KONIG, W., SPUR, G. Abrasive Machining of Silicon”, *Annals of the Cirp*, V.39(2), p. 621-635, 1990.

VENKATESH, V.C., INASAKI, I., TOENSHOF, H.K., NAKAGAWA, T., MARINESCU. I.D (1995). Observation on polishing and ultraprecision machining of semiconductors substrate material, *Annals of CIRP*, V.44(2): p. 611-618.

YAO, Z.; STIGLICH, J. J.; SUDARSHAN, T. S. (Nano-grained Tungsten Carbide-Cobalt (WC/Co). *Materials Modification, Inc.* 2929 Eskridge Road, 2003.