Campus de São Carlos

ESTUDO DA RETIFICAÇÃO DE
ULTRAPRECISÃO DE MATERIAIS FRÁGEIS

ROGÉRIO MADUREIRA DE ALMEIDA

Orientador: Prof. Assoc. Arthur José Vieira Porto

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

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

**ESTUDO DA RETIFICAÇÃO DE ULTRAPRECISÃO DE MATERIAIS
FRÁGEIS**

ROGÉRIO MADUREIRA DE ALMEIDA
Engenheiro Mecânico

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 04 / 06 / 02

Ass.:

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

Orientador: Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto

São Carlos
-2002-

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036964

Class.	TESE
Cult.	0244
Tombo	T 0150/02
Sysno	RS 0784

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A447e Almeida, Rogério Madureira de
Estudo da retificação de ultraprecisão de materiais
frágeis / Rogério Madureira de Almeida. -- São Carlos,
2002.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.
Área: Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto.

1. Retificação de ultraprecisão. 2. Rebolo de
diamante. 3. Materiais frágeis. 4. Remoção dúctil de
material. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ROGERIO MADUREIRA DE ALMEIDA**

Dissertação defendida e julgada em 22-03-2002 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Assoc. **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **JAIME GILBERTO DUDUCH**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **JUAN CARLOS CAMPOS RUBIO**
(Universidade Federal de Minas Gerais/UFGM)

APROVADO

Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*Aos meus maravilhosos pais, Iraci e Lázaro,
pelo apoio, dedicação, amor e confiança
durante toda minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo.

Ao Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto, pela orientação e paciência.

Ao Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch, pela co-orientação, oportunidade e amizade.

Ao Prof. Dr. Renato Goulart Jasinevicius, pelas sugestões e discussões sobre o trabalho.

Aos amigos do grupo de Engenharia de Precisão, Helder, Luciana, Juan Carlos, Pagotto e Renato, pelos bons momentos e um ambiente de trabalho excelente. Em especial aos amigos Helder e Luciana, pelo apoio e amizade durante esses anos de trabalho.

À minhas irmãs Heloise, Heliane e Luciane; cunhados, Flávio, Arthur e Marcelo; e sobrinhos, Matheus e Heitor, pelos momentos de prazeres juntos em família.

À minha namorada Tatiana, pelo incentivo, companheirismo, amizade e confiança.

Aos eternos amigos do peito, pela amizade em todos momentos.

Ao aluno de iniciação científica Gustavo, pela confecção de alguns desenhos.

Ao técnico do laboratório Gustavo.

Às secretárias da pós-graduação Ana Paula e Beth, pela ajuda demonstrada.

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

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

A todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
1- Introdução.....	1
Justificativa.....	1
Objetivos do trabalho.....	3
2- Usinagem de Ultraprecisão – Revisão.....	5
2.1- Introdução e Aspectos Gerais.....	5
2.2- Retificação de Ultraprecisão.....	10
2.2.1- Rebolo de Diamante.....	10
2.2.1.1- O material Abrasivo.....	11
2.2.1.2- O Ligante.....	14
2.2.1.3- Grau do Rebolo.....	15
2.2.1.4- Estrutura do Rebolo.....	15
2.2.2- Desgaste do Rebolo e Agressividade.....	16
2.2.3- Especificação do Rebolo.....	18
2.3- Retificação de Materiais Frágeis.....	20
2.4- Retificação de Monocristais de Silício.....	29
2.5- Indentação e Riscamento.....	32
2.6- Modelos de Corte.....	40
2.6.1- Modelo de BIFANO (1991).....	41

2.6.2- Modelo de CHEN (2000).....	44
2.6.3- Modelo de SUBRAMANIAN (1997).....	48
2.7- A Operação de Dressagem – Revisão.....	54
3- Metodologia dos Ensaios.....	55
3.1- Planejamento Experimental.....	55
3.2- Preparação e Características da Amostra de Silício.....	57
3.2.1- Passos para a montagem da amostra.....	58
3.2.2- Passos para a medição da montagem.....	60
3.3- A Retífica ASG2500.....	62
3.4- A Ferramenta de Corte: Características Geométricas.....	65
3.5- Análise do Acabamento e Integridade Superficial: Form Talysurf, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	66
4- Resultados e Discussões.....	69
5- Conclusões.....	81
6- Bibliografia.....	84
6.1- Bibliografia Citada.....	84
6.2- Bibliografia Consultada.....	90

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Desenvolvimento da precisão alcançável em máquinas de fabricação e instrumentos de medição (TANIGUSHI, 1983).....	6
FIGURA 2.2 – Diagrama conceitual do acabamento de ultraprecisão com abrasivos finos (KOMANDURI, 1997).....	9
FIGURA 2.3 – Rebolo de Diamante.....	10
FIGURA 2.4 – Dureza de Knoop de diversos abrasivos (LEITCHER, 1975).....	12
FIGURA 2.5 – Estrutura de um rebolo de retificação. (Adaptada de SALMON, 1992).....	16
FIGURA 2.6 – Mecanismo de desgaste do rebolo: A- desgaste por atrito; B- fratura do grão; C- fratura do ligante (MALKIN, 1989).....	17
FIGURA 2.7 – Sistema padrão para especificação de rebolos superabrasivos. (MALKIN, 1989).....	19
FIGURA 2.8 – Curva tensão-deformação de um material frágil e um dúctil. (ZANOTTO & MIGLIORE JR, 1991).....	21
FIGURA 2.9 – Fatores que afetam a deformação e fratura dos materiais. (INASAKI, 1987).....	24
FIGURA 2.10 – Estágios na formação de trincas. (SINHOFF, 1998).....	25
FIGURA 2.11 – Deformações localizadas e fraturas devido ao indentador. (INASAKI, 1987).....	26
FIGURA 2.12 – Modelo esquemático de formação de cavacos na retificação de materiais frágeis. (INASAKI, 1987).....	27
FIGURA 2.13 – Vista transversal da superfície do Si torneada com uma ferramenta de diamante. (JASINEVICIUS, 2000).....	32
FIGURA 2.14 – Esquema de iniciação e propagação de trincas no carregamento (a, b, c) e descarregamento (d, e, f) em um teste de indentação. (LAWN & SWAIN, 1975 e LAWN & WILSHAW, 1975).....	33
FIGURA 2.15 – Representação esquemática dos tipos de trincas que podem aparecer durante a usinagem de materiais frágeis. (SUBRAMANIAN, 1997).....	34
FIGURA 2.16 – Pequena trinca radial em uma amostra de silício monocristalino com uma carga do indentador de 10g. (JASINEVICIUS, 2000).....	36

FIGURA 2.17 – Crescimento das trincas radiais em uma amostra de silício monocristalino com um aumento da carga do indentador de 10 para 25 e 50g. (JASINEVICIUS, 2000).....	36
FIGURA 2.18 – Gráfico do corte de um grão perfeito. (CHEN, 2000).....	37
FIGURA 2.19 – Ilustração do mecanismo de riscamento para alumina. (MALKIN, 1996).....	39
FIGURA 2.20 – Regimes de corte para silício. (MALKIN, 1996).....	40
FIGURA 2.21 – Diagrama do processo de retificação de uma aresta de corte de um grão do rebolo. (CHEN, 2000).....	45
FIGURA 2.22 – Diagrama de uma pequena espessura de corte do grão. (CHEN, 2000)...	45
FIGURA 2.23 – Interações na zona de retificação: (1) interface abrasivos/peça; (2) interface ligante/cavaco; (3) interface cavaco/peça; (4) interface ligante/peça. (SUBRAMANIAN, 1997).....	48
FIGURA 2.24 – Representação esquemática do modelo de formação de cavaco com o grão abrasivo como um indentador. (SUBRAMANIAN, 1997).....	50
FIGURA 2.25 – Mecanismos e variáveis que controlam o processo de retificação de cerâmica. (SUBRAMANIAN, 1997).....	52
FIGURA 2.26 – Interações na zona de retificação. (SUBRAMANIAN; et all, 1997).....	53
FIGURA 3.1 – Máquina ASG 2500.....	57
FIGURA 3.2 – Aquecedor elétrico Fisatom.....	59
FIGURA 3.3 – Esquema da montagem da amostra.....	60
FIGURA 3.4 – Amostra de silício fixada no suporte de vidro e o suporte metálico.....	60
FIGURA 3.5 – Montagem para medição da inclinação no desempenho.....	61
FIGURA 3.6 – Montagem para medição da inclinação final com o suporte metálico fixado à placa através de vácuo.....	62
FIGURA 3.7 – O suporte metálico com a amostra de silício fixado à placa do eixo-árvore através de vácuo e o dispositivo de fixação da placa.....	63
FIGURA 3.8 – Cabeçote Retificador ASG 2500.....	64
FIGURA 3.9 – Medição da profundidade do sulco através do Talystep.....	67
FIGURA 4.1 – Vista da região do sulco obtido através da retificação (MEV).....	70

FIGURA 4.2 – Regiões avaliadas ao longo do sulco (Microscopia Óptica, aumento de 100 X).....	71
FIGURA 4.3 – Diagrama correspondente à profundidade de corte de 1,05 μm	71
FIGURA 4.4 – Diagrama correspondente à profundidade de corte de 0,25 μm	72
FIGURA 4.5 – Diagrama correspondente à profundidade de corte de 0,2 μm	72
FIGURA 4.6 – Diagrama correspondente à profundidade de corte de 0,15 μm	73
FIGURA 4.7 – Região de fratura frágil e formação de trincas no material (MEV – aumento 5000x).....	74
FIGURA 4.8 – Diagrama correspondente a profundidade de corte de 0,05 μm	74
FIGURA 4.9 – Diagrama correspondente à profundidade de corte de 0,03 μm	75
FIGURA 4.10 – Região de provável escoamento plástico e fratura frágil do material (MEV – aumento 5000x).....	76
FIGURA 4.11 – Diagrama correspondente à profundidade de corte de 0,01 μm	76
FIGURA 4.12 – Diagrama correspondente à profundidade de corte de 0 μm	77
FIGURA 4.13 – Região de remoção dúctil de material (MEV – aumento 5000x).....	78
FIGURA 4.14 – Diagrama correspondente a MEV da Figura 4.11, onde a profundidade de corte varia de 0 a 0,55 μm aproximadamente.....	78
FIGURA 4.15 – Região de transição dúctil/frágil (MEV – aumento 3000x).....	79

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Tolerâncias de componentes para uma gama de produtos produzidos por processos de usinagem (McKEOWN, 1987).....	7
TABELA 2.2 – Afinidade Química dos abrasivos (LEITCHER, 1975).....	13
TABELA 2.3 – Características dos tipos de ligantes dos rebolos de diamante. (SUBRAMANIAN, 1988).....	14
TABELA 2.4 – Comparação das características salientes entre metais dúcteis e não metais frágeis. (KOMANDURI, et al, 1997).....	22
TABELA 2.5 – Condições de retificação. (ZARUDI & ZHANG, 1998).....	30
TABELA 2.6 – Variação da rugosidade superficial das amostras com o avanço. (ZARUDI & ZHANG, 1998).....	31
TABELA 2.7 – Variação da espessura da camada amorfa com o avanço. (ZARUDI & ZHANG, 1998).....	31
TABELA 2.8 – Valores de dureza Vickers (H_v) obtidos através da indentação de amostras de silício (100) no estado polido e torneado sob cargas de 10, 25 e 50g do indentador. (JASINEVICIUS, 2000).....	35
TABELA 2.9 – Valores de dureza Vickers (H_v) obtidos através da indentação de amostras de silício (111) no estado polido e torneado sob cargas de 10, 25 e 50g do indentador. (JASINEVICIUS, 2000).....	35
TABELA 3.1 – Parâmetros de corte utilizados.....	56
TABELA 3.2 – Propriedades do silício monocristalino. (JASINEVICIUS, 1998; SPEAR, 1989).....	58
TABELA 3.3 – Características geométricas da ferramenta de diamante SD800L50-1/8.....	65
TABELA 3.4 – Especificações do Talystep.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ANSI – American National Standards Institute

CBN – Nitreto de Boro Cúbico

CNC – Controle Numérico Computadorizado

D - Diamante

SPDT – Single Point Diamond Turning

UPDT – Ultraprecision Diamond Turning

A_f – Área da superfície criada pela propagação de trinca

a_c ; a_{gc} – profundidade crítica de corte

$a_{gmáx}$ – espessura máxima de corte de um único grão

a_p ; d – profundidade de corte

c – número de grãos na zona de retificação por unidade de área

C – constante de corte

D_e – diâmetro equivalente do rebolo

d_c – profundidade crítica de indentação

d_g – tamanho do grão abrasivo

E – módulo de elasticidade

E_f ; R – energia necessária para a fratura

E_p – energia necessária para deformação plástica

F_g – força aplicada pelo grão abrasivo

G – parâmetro de propagação de trinca de Griffith

h – espessura do cavaco; profundidade de corte por grão

H_v – microdureza Vickers do material

K – largura do cavaco ou espessura

K_c – resistência à fratura do material estática

K_d – resistência à fratura do material dinâmica

K_{Ic} – resistência à fratura do material

N_d – número de arestas de corte efetivas

N_{gc} – número de grãos abrasivos por peso

N_{goc} – número de grãos abrasivos por unidade de volume

P – carga de indentação

P_c – carga crítica de indentação estática

P_d – carga por impulso dinâmica

V_p – volume específico de material

v_w – taxa de avanço; velocidade de corte

v_s – velocidade tangencial do rebolo

w_g – peso de um grão abrasivo por unidade de volume do rebolo

α – fator adimensional relacionado à geometria do indentador

α_0 – ângulo de ponta do indentador

λ_0 – fator integrativo

σ_y – tensão de escoamento

RESUMO

ALMEIDA, R.M. (2002). Estudo da Retificação de Ultraprecisão de Materiais Frágeis. 92p. *Dissertação (Mestrado)* – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A crescente necessidade por parte da indústria óptica e eletrônica por componentes que possuam características como elevada precisão de forma e acabamento em materiais frágeis, vem despertando um grande interesse nas pesquisas dos processos de usinagem de ultraprecisão. Neste sentido, a retificação e o torneamento de materiais frágeis com ferramentas de diamante têm se destacado como substitutos dos processos tradicionais de fabricação de precisão como a lapidação e polimento. Propõe-se o estudo da retificação de ultraprecisão de materiais frágeis através da realização de ensaios de corte em uma retificadora de ultraprecisão com rebolo de diamante de forma a estabelecer os parâmetros de corte compatível com a remoção dúctil de material. Foram usinadas amostras de silício monocristalino através de retificação tangencial de mergulho plana sob diferentes condições de usinagem para posteriormente avaliar a integridade superficial da peça. A amostra foi montada sob um aparato especial com uma inclinação conhecida a fim de se realizar um corte em cunha. Com isso, três situações distintas de remoção de material foram investigadas: totalmente dúctil, dúctil-frágil e totalmente frágil. O parâmetro de corte variado foi a profundidade de corte; o avanço e velocidade de corte foram mantidos constantes.

Palavras-chave: retificação de ultraprecisão, rebolo de diamante, materiais frágeis, remoção dúctil de material.

ABSTRACT

ALMEIDA, R.M. (2002). The Study of Ultraprecision Grinding of Brittle Materials. 92p.
Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The requirements of components that demand high precision finishes and form in brittle materials has roused a huge interest in the ultraprecision machining process in the optical and electronic industries. The diamond grinding and turning of brittle materials have been used more and more as replacements to the traditional lapping and polishing. The study of ultraprecision grinding of brittle materials is proposed. Cutting experiments on an ultraprecision grinding machine using a diamond wheel were carried out to establish cutting parameters compatible with ductile material removal. Silicon samples were machined through flat plunging tangential grinding under different machining conditions and the sample surface integrity was assessed. The sample was mounted on a special apparatus with a known inclination so as to carry out an edge cutting. Thereby, three different material removal situations were investigated: whole ductile, ductile/brittle, whole brittle. The depth of cut was the parameter varied. Feedrate and cutting speed of the wheel were held constant.

Keywords: ultraprecision grinding, diamond wheel, brittle materials, ductile material removal.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução e Justificativa

A sociedade hoje exige, cada vez mais, produtos de melhor qualidade e a custos menores. Isto tem forçado os fabricantes a desenvolver sistemas de produção que priorisem a flexibilidade e o melhor aproveitamento do parque fabril, para tornar seus sistemas produtivos economicamente competitivos, para uma gama maior de produtos. Alimentados pelas perspectivas de diminuição de custos, a grande maioria dos fabricantes tem adotado a filosofia da automação de processos como ferramenta para aumentar a produtividade mantendo ou muitas vezes aumentando a qualidade de seus produtos (DORNFELD, 1994).

Estes processos sofrem os efeitos das variações inerentes aos processos de fabricação, tais como, tipo de material, desempenho do maquinário, taxas de produção, entre outros. A grande maioria dos processos de fabricação utilizados são com retirada de material (usinagem), realizados através de operações repetitivas de corte, as quais conferem à peça trabalhada as características de forma e acabamento superficial.

À medida que as características metrológicas e de acabamento tornam-se mais críticas, o desempenho da máquina de usinagem cresce em importância. Desta forma, quando ingressamos no campo da mecânica de precisão, o desempenho desejado de máquinas de usinagem destinadas à fabricação de componentes de elevada precisão de forma e rugosidade superficial na faixa de 10 nm Ra (e.g. moldes para lentes, discos de memória para

computador, lentes e espelhos para sistemas ópticos, etc.) demandam a utilização de máquinas com melhor precisão de posicionamento, na ordem dos nanômetros (DOW; et al, 1991).

Atualmente tem-se vertido esforços que possibilitem a usinagem de materiais cerâmicos, vítreos e monocristalinos com a utilização de ferramentas de diamante mono ou poli-cristalino, onde o material é removido sob determinadas condições de corte, as quais facilitam a remoção por deformação plástica, obtendo superfícies livres de trincas, melhorando com isto aspectos como a integridade superficial e subsuperficial. Este processo denominado de “regime dútil” é alcançado via taxas de remoção otimizadas, nas quais a espessura de corte (função da geometria da ferramenta, profundidade de corte e avanço), torna-se uma variável de extrema importância.

A crescente demanda por componentes de precisão feitos de materiais tais como vidros, cerâmicas avançadas e silício é tal que técnicas convencionais de polimento e lapidação não mais atendem aos requisitos atuais de manufatura de precisão. Alta qualidade superficial e baixa incidência de trincas sub-superficiais são necessárias em formas complexas (anesféricas) além das formas plana e esférica que podem ser produzidas com certa facilidade por técnicas de abrasão convencionais.

Para satisfazer essa demanda, uma nova gama de materiais e novas técnicas de manufatura estão sendo desenvolvidas. Entre essas técnicas de usinagem, a retificação com ferramenta de diamante está sendo seriamente considerada para substituir a lapidação e o polimento. O uso de ferramentas de diamante permite a usinagem de muitos materiais com tolerâncias nanométricas.

Na busca por materiais avançados, as cerâmicas e outros materiais frágeis têm recebido especial atenção por seus atributos de alta rigidez, estabilidade dimensional e térmica e resistência a ataques químicos. Os requisitos de materiais frágeis (eg cerâmicas),

particularmente aqueles com melhores propriedades elétricas/eletrônicas, piezoelétricas, magnéticas, piroelétricas e eletro-ópticas (laser) têm-se estabelecido.

Exemplos típicos de componentes que exigem a manufatura de precisão em materiais frágeis são: sistemas ópticos, mancais, injetores para a indústria automobilística, pás para turbinas a gás, componentes de memória de computadores, cabeçotes magnéticos para computadores e componentes com semicondutores. O avanço na manufatura de precisão de materiais frágeis é, portanto, crítico na produção econômica desses componentes.

A retificação convencional está sendo bastante estudada, porém a de ultraprecisão ainda não apresenta resultados científicos relevantes. No Brasil não há pesquisas nesse assunto.

1.2. Objetivos e Estrutura do Trabalho

O objetivo desse trabalho é o estudo da retificação de ultraprecisão com rebolo de diamante de materiais frágeis. Será estudada a influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade e integridade superficial das peças através da análise por perfilômetro mecânico, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados obtidos deverão ser comparados com resultados de torneamento com ferramenta de diamante em termos de rugosidade e integridade superficial a fim de se alcançar resultados científicos satisfatórios.

A estruturação do trabalho está na forma de capítulos, cujos conteúdos são descritos a seguir:

O Capítulo 2 trata da revisão bibliográfica, enfocando, primeiramente, o processo de retificação de ultraprecisão, ilustrando os modos dúctil e frágil de remoção, e enfocando os modelos de remoção, de indentação e riscamento até os modelos de corte para materiais frágeis.

O capítulo 3 trata da metodologia utilizada para os ensaios, tais como as montagens executadas e procedimentos experimentais, bem como o planejamento experimental.

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões do trabalho.

No capítulo 5, as principais conclusões e recomendações para novos trabalhos são apresentadas.

CAPÍTULO 2

USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO

2.1 Introdução e Aspectos Gerais

A usinagem de ultraprecisão é conhecida atualmente como um processo de usinagem onde se utiliza uma ferramenta de diamante monocristalino, em máquinas de ultraprecisão comandadas numericamente, para produção de componentes ópticos, eletrônicos e mecânicos com nível de precisão submicrométrico e, em alguns casos, nanométrico. Dentre os processos mais conhecidos podem-se citar o torneamento e a retificação de ultraprecisão.

A usinagem de ultraprecisão não possui uma definição fixa, pois esta 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 uma determinada época, com um determinado tipo de equipamento (DUDUCH, 1993). O desenvolvimento desta tecnologia de fabricação vem obtendo avanços consideráveis no decorrer do século. Um estudo cronológico sobre estes avanços, realizado por TANIGUCHI (1983), é reproduzido no diagrama da Figura 2.1 sob uma classificação geral dos processos de usinagem convencionais, de precisão e de ultraprecisão e também vários instrumentos usados para a medida da precisão.

Este diagrama nos permite observar que a denominação para usinagem de ultraprecisão no início do século (1920) correspondia a tolerâncias da ordem de 10 μm , e que por volta de 1980 já havia alcançado a ordem de 0,005 μm ou 5 nm de precisão. Atualmente, para um processo ser classificado como de ultraprecisão as tolerâncias de fabricação alcançáveis situam-se na faixa de 1 nm. Seguindo o mesmo raciocínio, através da

extrapolação da curva, a tolerância de fabricação nos próximos anos tende a alcançar níveis atômicos de precisão. (TANIGUCHI, 1992).

Figura 2.1 - Desenvolvimento da precisão alcançável em máquinas de fabricação e instrumentos de medição (TANIGUCHI, 1983).

Segundo McKEOWN (1987), uma possível classificação das usinagens convencional, de precisão e de ultraprecisão em termos de tolerância e variedade de produtos produzidos por cada processo, pode ser vista na Tabela 2.1.

TABELA 2.1 - Tolerâncias de componentes para uma gama de produtos produzidos por processos de usinagem (McKEOW, 1987).

	Faixa de Tolerância	Mecânico	Eletrônico	Óptico
Usinagem Convencional	200 μ m	Elementos gerais para aplicações domésticas, auto-peças em geral etc	Elementos eletrônicos em geral, motores e conectores	Corpos de câmeras, telescópios e binóculos
	50 μ m	Elementos gerais para motores	Transistores, diodos, cabeçotes magnéticos para gravadores	Diafragma de câmeras, porta lentes para câmeras e telescópios
Usinagem de Precisão	5 μ m	Partes mecânicas para relógios, mancais para máquinas-ferramenta, engrenagens	Relé elétricos, resistores, condensadores, "wafers" de silício	Lentes, prismas, fibra óptica e conectores (múltiplo modo)
	0,5 μ m	Mancais de esfera e rolo, válvulas servo-hidráulicas, mancais aerostáticos, bicos injetores para impressoras etc	Escalas magnéticas, osciladores de quartzo para câmera CCD, memórias magnéticas ("bubbles"), transdutores de pressão finos, cabeçotes de impressão térmicos, cabeçotes de disco finos	Lentes de precisão, escalas ópticas, espelhos poligonais para laser, espelhos de raio-X, espelhos de deflexão, conectores e fibra óptica (modo único)
Usinagem de Ultraprecisão	0,05 μ m	Blocos padrões, pontas de indentadores de diamante, mesas X-Y de ultraprecisão	Memórias de circuito integrado, vídeo-disc eletrônicos, LSI (Large Scale Integrated)	Espelhos planos, lentes Fresnel, redes de difração, vídeo-disc óptico
	0,005 μ m		VLSI(Very Large Scale Integrated)	Redes de difração de ultraprecisão

O progresso das técnicas de fabricação para a produção de componentes de alta precisão é essencial para muitas áreas de alta tecnologia. Sistemas ópticos, mancais, componentes para memória de computadores e dispositivos microeletrônicos têm uma dependência direta no campo da fabricação de precisão. Para muitos sistemas de tecnologia avançada, componentes que exigem alta precisão de fabricação são difíceis de serem obtidos

em se tratando do uso de materiais frágeis. Tem se visto na última década um crescimento acentuado do uso de cerâmicas para aplicações estruturais. A excelente resistência térmica, química e ao desgaste destes materiais puderam ser utilizadas, em função das recentes melhorias de resistência e uniformidade de cerâmicas avançadas. Cabeçotes para computadores, injetores para motores diesel, componentes semicondutores e lentes ópticas são típicos exemplos de componentes que requerem a utilização de processos fabricação de precisão de materiais frágeis. Desta forma, avanços na tecnologia de fabricação passam a ter uma importância essencial para produção econômica destes componentes (BIFANO, et al., 1991).

A usinagem de materiais frágeis, também conhecida como nanotecnologia, é de interesse particular das indústrias óptica e eletrônica e envolve tanto o torneamento com diamante de ponta única (SPDT - "Single Point Diamond Turning") quanto a retificação com rebolo de diamante (UPDG - "Ultraprecision Diamond Grinding"). O torneamento de ultraprecisão, já bem explorado, é um processo capaz de produzir superfícies com acabamento espelhado sem a necessidade de um polimento posterior utilizando máquinas-ferramenta especialmente projetadas com alta rigidez e mancais aerostáticos (SHAW, 1995). Já a retificação com ferramenta de diamante ainda precisa ser mais explorada.

Outras características das máquinas de usinagem de ultraprecisão, além das já citadas alta rigidez e mancais aerostáticos, são o controle de posicionamento de alta resolução feito através de um CNC ("Computer Numeric Control"), ambiente controlado de umidade e temperatura, a ferramenta de alto desempenho e até mesmo as características do material da peça a ser usinado.

Em vista das peculiaridades dos materiais (peça) a serem usinados, a necessidade de taxas de remoção muito pequenas de material, de maneira a minimizar ou eliminar fraturas frágeis comuns neste tipo de material, a busca para se obter superfícies com ótimo acabamento, precisão de forma e integridade superficial (isto é, mínimo ou nenhum dano

superficial incluindo mudanças metalúrgicas, tensões residuais e defeitos tais como microtrincas), é necessário considerar todo o processo de usinagem de ultraprecisão como um sistema e não como componentes individuais. Embora as necessidades possam variar de processo para processo, para o acabamento de ultraprecisão com abrasivos finos, está-se interessado em sistemas integrados com as seguintes características: alta precisão; alta rigidez dinâmica; alta rigidez estática; alta rigidez entre ferramenta e peça; alta resolução no controle de posicionamento; grãos abrasivos submicrométricos colados uniformemente ao rebolo; estabilidade térmica e; controle de temperatura, vibração e umidade do ambiente (KOMANDURI, 1997).

Na Figura 2.2, um diagrama conceitual da usinagem de ultraprecisão usando abrasivos finos é reapresentado por KOMANDURI (1997).

Figura 2.2 - Diagrama conceitual do acabamento de ultraprecisão com abrasivos finos (KOMANDURI, 1997).

2.2 Retificação de Ultraprecisão

2.2.1 Rebolo de Diamante

A ferramenta de corte utilizada no processo de retificação de ultraprecisão é o rebolo de diamante, que deve atender a requisitos necessários a este tipo de retificação onde acabamentos superficiais inferiores a 10 nm são freqüentes. Os rebolos são compostos de grãos abrasivos, neste caso de diamante, discretamente dispersos em um meio ligante contínuo. A Figura 2.3 apresenta um rebolo típico utilizado neste tipo de processo de retificação.

FIGURA 2.3-Rebolo de diamante.

Dentre os diversos aspectos que podem ser analisados na escolha de um rebolo para uma aplicação específica, os seguintes elementos podem ser considerados na seleção:

- 1- O material abrasivo: é o agente retificador usado no rebolo. Composição química, propriedades físicas e a forma das partículas afetam seu desempenho.
- 2- Tamanho do grão: O tamanho das partículas dos grãos abrasivos influencia a taxa de remoção de material e o acabamento superficial.
- 3- Ligante: É o material que segura os grãos abrasivos juntos para formar o rebolo. A composição química do ligante afeta a resistência, resiliência e outras propriedades físicas do rebolo.
- 4- Grau do rebolo: é a resistência do rebolo, usualmente controlada pela variação da quantidade do material ligante. Refere-se freqüentemente à dureza do rebolo.
- 5- Estrutura: é a proporção e arranjo dos grãos e ligante no rebolo. A porosidade do rebolo é afetada por ambos, estrutura e grau.

2.2.1.1 O material abrasivo

Os materiais usados para fazer abrasivos podem ser em geral classificados como naturais ou sintéticos. Os abrasivos naturais incluem diamante, corundum e esmeril; eles se encontram em depósitos naturais e podem ser extraídos e processados para o uso com pouca alteração. Os abrasivos sintéticos, por outro lado, são produtos obtidos a partir do processamento de materiais brutos ou precursores químicos; eles incluem carboneto de silício, diamante sintético e alumina (um sintético formado de corundum). A maioria dos abrasivos naturais têm sido substituídos por materiais sintéticos porque quase toda aplicação industrial requer propriedades consistentes. Com a exceção do diamante natural, a maioria dos abrasivos naturais são variáveis em suas propriedades.

Uma das propriedades mais importante, necessária em um abrasivo, é a dureza. Como se sabe, o abrasivo deve ser mais duro do que o material a ser usinado, ou seja, retificado, polido ou removido. A dureza dos vários materiais abrasivos pode ser medida em um número de escalas, incluindo o teste de dureza Mohs, o teste de dureza Knoop e o teste de dureza Vickers. A escala Mohs, primeiramente descrita em 1812, mede a resistência na indentação como julgamento de qual material irá riscar o outro. É largamente aceita e usada por mineralogistas. Os testes Knoop e Vickers empregam o dispositivo de indentação com diamante em formato piramidal para a medida da dureza. Com o teste Knoop, no entanto, a dureza de materiais extremamente frágeis incluindo vidro e até mesmo diamante podem ser medidos sem danificar o indentador e o material a ser medido.

A Figura 2.4 mostra a dureza de alguns abrasivos, tais como, óxido de alumínio, nitreto de boro cúbico (CBN), carboneto de silício e diamante segundo o método Knoop (LEITCHER, 1975)

FIGURA 2.4 - Dureza de Knoop de diversos abrasivos (LEITCHER, 1975).

A tenacidade ou resistência à fratura também é uma característica significativa para as funções dos abrasivos. Idealmente uma única partícula abrasiva se reafia pela quebra de sua aresta de corte desgastada (“cega”), e expõe outra aresta de corte na mesma partícula. Em abrasivos sintéticos é possível alcançar algum grau de controle sobre esta propriedade, variando-se a forma do grão durante a pressão de contato, através da mudança da pureza dos abrasivos, através da mudança do ligante e através do controle da estrutura cristalina dos grãos abrasivos. Assim, os abrasivos podem ser desenvolvidos para determinadas condições de operação em uma variedade de aplicações.

Além da dureza dos materiais abrasivos um outro critério deve ser levado em conta na escolha para um dado material a ser retificado. Segundo LEICHTER (1975), a afinidade química entre o grão abrasivo e o material da peça obra é muito importante. A interação entre os dois impede o uso de abrasivos como um meio universal. Por exemplo, quando um carboneto de silício é usado no aço, ou a alumina no vidro, algumas reações químicas ocorrem ocasionando um rápido desgaste e ineficiente ação dos abrasivos. A Tabela 2.2 apresenta a afinidade química que diversos materiais têm com os principais abrasivos citados anteriormente além da temperatura limite de estabilidade estrutural de cada um.

TABELA 2.2 - Afinidade química dos abrasivos (LEICHTER, 1975).

<i>Abrasivo</i>	<i>Estabilidade térmica até: (°C)</i>	<i>Afinidade química com</i>	<i>Adequado para</i>
<i>Óxido de Alumínio</i>	2000	Óxidos Vidros	Aços de todas as qualidades
<i>Nitreto de Boro Cúbico-CBN</i>	1370	Cerâmicas Rochas	
<i>Carboneto de Silício</i>	1300	Materiais que assimilam carbono Ex: aço de baixo carbono	Aços com carbono saturado, ferro fundido, óxidos (vidro, cerâmica, etc.)
<i>Diamante</i>	900		

2.2.1.2 O Ligante

O propósito do ligante é segurar os grãos abrasivos juntos á superfície do rebolo. Em geral, o ligante precisa ser forte o suficiente para resistir às forças de corte, temperatura e força centrífuga, sem desintegrar, enquanto resiste ao ataque químico pelo fluido de corte. Ele também precisa manter a rigidez do rebolo durante o corte. (MALKIN, 1989).

Os três tipos de ligantes mais usados para rebolos superabrasivos são: ligantes de resina, ligantes vitrificados e os ligantes de metais. As características de cada tipo de ligante estão resumidas na Tabela 2.3 (SUBRAMANIAN, 1988).

TABELA 2.3 - Características dos tipos de ligantes dos rebolos de diamante. (SUBRAMANIAN, 1988)

Tipo de Ligante	Características
Resina	Prontamente disponível Fácil para nivelar e dressar Aplicável para uma faixa de operações Primeiro tipo selecionado para o uso de rebolos de diamante.
Vitrificado	Fácil nivelamento Não necessita dressagem (se selecionado e nivelado corretamente) Porosidade controlada para permitir o escoamento do fluido refrigerante na zona de retificação e remoção de cavaco Formas complexas Vida do rebolo potencialmente mais longa do que resinas Excelente com a utilização de fluidos refrigerantes à óleo. Muito durável
Metais	Alta rigidez Mantém sua forma Boa condutividade térmica Potencial para operações a alta velocidades Geralmente quando altas forças de retificação são requeridas Difícil de nivelar e dressar

2.2.1.3 Grau (Dureza) do Rebolo

O grau do rebolo não é um termo precisamente definido mas é usualmente tomado como uma indicação da resistência do ligante. Grau ou dureza de um rebolo relata a quantidade de ligante no rebolo, com resistência sendo influenciada pelas propriedades dos agentes ligantes. Quanto maior a quantidade de ligante mais duro o rebolo. Um rebolo mole (“soft”) terá uma pequena quantidade de ligante e/ou um ligante fraco. Muitos usuários escolhem rebolos de dureza elevada com uma idéia errada que eles seriam mais econômicos porque duram mais. Na verdade, o grau do rebolo deveria estar relacionado à produtividade da operação e não à vida do rebolo.

Rebolos duros (“hard-grade wheels”) são usados para remover uma grande quantidade de material a altas taxas, para retificar pequenas áreas de contato, para remover material de peças moles e para manter a forma em operações precisas. Já os rebolos macios (“soft-grade wheels”) são usados para pouca remoção de material, para retificar grandes áreas de contato, para remover material de peças duras onde as condições de corte são leves e o contínuo desgaste do rebolo é necessário para manter os grãos afiados e minimizar os defeitos metalúrgicos dos materiais sensíveis ao calor.

2.2.1.4 Estrutura do Rebolo

A estrutura de um rebolo é o espaço relativo de um grão abrasivo em um determinado volume, ou seja, a medida da densidade e porosidade do rebolo. Supondo que uma grande quantidade de grãos abrasivos muito finos foram misturados com uma quantidade equivalente de um ligante e pressionados sob alta pressão, o resultado seria um rebolo de alta densidade e baixa porosidade. Se uma pequena quantidade de grãos abrasivos fossem misturadas à uma

pequena quantidade de ligante, o resultado, uma vez que os espaços médios fossem removidos, seria um rebolo com alta porosidade. A Figura 2.5, retirada de SALMON (1992), mostra duas estruturas de um rebolo, uma aberta (muita porosidade) e outra fechada (pouca porosidade)

FIGURA 2.5 - Estrutura de um rebolo de retificação (Adaptada de SALMON, 1992).

2.2.2 Desgaste do Rebolo e Agressividade

O desgaste do rebolo é geralmente expresso como uma perda volumétrica de material, ou seja, é a quantidade de rebolo consumida durante um determinado ciclo ou operação de retificação. Enquanto que a agressividade ou perda de afiação é decorrente do arredondamento (“cegamento”) das arestas cortantes dos grãos do rebolo.

A topografia do rebolo exerce uma grande influência sobre seu desempenho no processo de retificação. Muitos fatores podem mudar a topografia do rebolo durante o seu tempo de vida devido ao desgaste. Depois de um certo período de uso, o rebolo precisa ser dressado (reafiado) para introdução de novos grãos ao processo de corte e restabelecer sua forma original (HAUSSI, et al., 1998).

Segundo MALKIN (1989), o mecanismo de desgaste de um rebolo é geralmente dividido em três situações distintas: desgaste por atrito, fratura do grão e fratura do ligante ou desprendimento do grão. A Figura 2.6 ilustra estas situações.

FIGURA 2.6 - Mecanismo de desgaste do rebolo: A-desgaste por atrito; B-fratura do grão; C-fratura do ligante (MALKIN, 1989).

O desgaste por atrito envolve o “cegamento” dos grãos abrasivos, referenciado por alguns autores como perda de afiação (OLIVEIRA, 1998), e o crescimento de áreas achatadas devido à fricção contra a peça. A fratura dos grãos refere-se a remoção de fragmentos abrasivos pela fratura dentro de um grão. A fratura do ligante ou desprendimento do grão ocorre pelo deslocamento de abrasivos do ligante devido à atrito entre o cavaco e o ligante, ou em função do desgaste do ligante por erosão, pois isto pode provocar o desprendimento dos grãos devido à redução de sua resistência.

O desgaste por atrito representa a menor contribuição para a diminuição do volume do rebolo, porém, é o mais importante para definição do final da vida do mesmo. Quanto maior o

desgaste por atrito, maior as forças e temperatura do processo levando a um comprometimento maior da qualidade e integridade superficial das peças. O mecanismo de desgaste do rebolo mais importante é a fratura do ligante que provoca a perda do tamanho (HAUSSI, et al., 1998).

Poucas pesquisas têm sido desenvolvidas a respeito do desgaste de rebolos de diamante na retificação de materiais frágeis. Segundo LIAO (1997), o comportamento típico de desgaste, visto em rebolos convencionais, tem sido observado também em rebolos de diamante quando usados na retificação de cerâmicas avançadas tais como, alumina, carboneto de silício e nitreto de silício. Notou-se, nestas experiências com rebolos de diamante, os mesmos três tipos de mecanismos de desgaste observados em rebolos convencionais. Porém, os critérios para a determinação da vida de um rebolo de diamante na retificação de cerâmicas não foram ainda totalmente estudados.

2.2.3 Especificação do Rebolo

Um sistema padrão de especificação de rebolos, definido pelo Instituto Norte Americano – ANSI (American National Standards Institute) em 1970, é utilizado atualmente pela maioria dos produtores de rebolo do mundo. Este sistema envolve o uso de letras ou números em sete diferentes posições como indicadas na Figura 2.7. As letras indicam o tipo de abrasivo, para o diamante – D e para o nitreto de boro cúbico (CBN) – B, e são usualmente precedidos por um símbolo para identificação de um material abrasivo particular. O material do ligante (resina, vitrificado ou metal) também é indicado por uma letra sempre seguida por uma notação adicional do produtor para identificar uma formulação particular. A maioria dos rebolos superabrasivos tem ligantes de resina ou metal, apesar do grande uso de ligantes vitrificados em rebolos de CBN. Como o grão abrasivo é um material muito caro, apenas uma seção relativamente estreita da área ativa da superfície do rebolo consiste realmente de

abrasivos colados ao ligante, o qual está ligado a um centro metálico ou plástico. A profundidade desta seção de abrasivos está indicada por um número no sistema de especificação da Figura 2.7.

FIGURA 2.7-Sistema padrão para especificação de rebolos superabrasivos. (MALKIN, 1989)

O tamanho dos grãos superabrasivos pode ser especificado pelo número de grãos que passaram por um teste chamado teste da “peneira”, demonstrado em detalhes por MALKIN (1989), e cuja abertura da peneira por polegada quadrada é exibida na Figura 2.7. O grau do rebolo é representado por uma letra, que fornece uma indicação relativa da resistência ou dureza do ligante. Seguindo o grau do rebolo, na sequência, vem o número que indica a concentração de abrasivos contidos no rebolo.

MILLER & DOW (1999), recentemente forneceram algumas orientações para seleção dos parâmetros de um rebolo, baseados em um modelo que investiga a cinemática do processo

de retificação. O modelo sugere que o uso de ligantes de resina é vantajoso em relação aos ligantes de metais, pois aqueles permitem uma maior conformidade entre rebolo e peça devido a uma menor rigidez, aumentando assim, o número de grãos de corte em contato com a peça. Esta afirmação está de acordo com a orientação dos produtores de abrasivos que recomendam o uso de ligantes de metais para retificar vidros e o uso de ligantes de resina para retificação de cerâmicas avançadas. Outra vantagem dos rebolos com ligantes de resina é sua habilidade de se auto afiar. Com o desgaste dos grãos, as forças de atrito aumentam e se tornam altas o suficiente para arrancar os grãos da superfície do rebolo. O ligante irá então se desgastar até que novos grãos de corte sejam expostos e o ciclo se repita. As desvantagens deste tipo de ligante são os erros de forma causados pela deflexão do rebolo e desgaste.

2.3 Retificação de materiais frágeis

Quando usinado, um material frágil pode se deformar através de uma variedade de mecanismos. Se a tensão de cisalhamento crítica em qualquer ponto do material exceder o campo de tensão elástica, o mecanismo de deformação mudará de uma energia reversível armazenada via deformação elástica para uma dissipação de energia irreversível. Exemplos de deformações irreversíveis incluem propagação de defeitos macroscópicos, formação de microtrincas, transformação de fase, movimento de deslocamento (em cristais) e deslizamentos intermoleculares (em materiais amorfos). Os mecanismos irreversíveis de remoção de material podem ser divididos em dois tipos: frágeis e dúcteis. Na usinagem frágil, a remoção de material é alcançada através da propagação e interseção de trincas, enquanto na usinagem dúctil ocorre o escoamento plástico do material na forma de cavacos cisalhados. (BIFANO, et al., 1991). Através da Figura 2.8, extraída de ZANOTTO & MIGLIORE JR (1991), a curva tensão-deformação demonstra o comportamento de um material frágil e um

dúctil. Nota-se que o material frágil apresenta somente comportamento elástico, enquanto o material dúctil, apresenta a fase de escoamento, deformação plástica e ruptura.

FIGURA 2.8 - Curva tensão-deformação de um material frágil e um dúctil. (ZANOTTO & MIGLIORE JR, 1991).

A Tabela 2.4, apresentada por KOMANDURI, et al., (1997), mostra uma comparação qualitativa entre metais dúcteis e não-metais frágeis (cerâmicas, vidros, semicondutores) indicando as diferenças e dificuldades no acabamento dos materiais frágeis com abrasivos finos comparados aos metais e suas ligas. Metais, em geral, têm muitas características desejáveis do ponto de vista da remoção de material por abrasivos finos, tais como, ligações metálicas e não direcionais, alta simetria na estrutura dos cristais, alta condutividade térmica, baixa densidade, ausência de porosidade, alta pureza, alta resistência à fratura, grande deformação quando fraturado e alta energia de impacto. Ao contrário, os não-metais são caracterizados por possuírem ligações covalentes (direcionais) ou iônicas, baixa simetria, sistema de escorregamento limitado ou inadequado para deformação plástica, baixa condutividade térmica, baixa resistência à fratura e baixa energia para o rompimento.

TABELA 2.4 - Comparação das características salientes entre metais dúcteis e não-metais frágeis (KOMANDURI, et al., 1997).

Propriedades	Metais	Não Metais
Tipo de ligação atômica	Metálica e não direcional	Iônica/covalente e direcional
Estrutura cristalina	Alta simetria	Baixa simetria
Expansão térmica	Alta	Baixa
Condutividade térmica	Alta	Baixa
Densidade	Alta	Baixa
Meio de deformação	Dúctil	Frágil
<i>Microestrutura</i>		
Estrutura intergranular	Relativamente simples	Complexa
Porosidade	Praticamente sem poros	Geralmente ficam poros por causa da consolidação dos processos usados
Pureza	Alta pureza pode ser obtida	Difícil de se obter alta pureza
Resistência ao Calor	Baixa a moderada	Moderada a alta
Resistência Química	Baixa	Alta
<i>Considerações sobre resistência</i>		
Tenacidade (MN/m ²)	210 (Aço carbono)	5,3 (Si ₃ N ₄)
	34 (Ligas de Alumínio)	
Deformação na Fratura	5%	0,2%
Mecanismos de deformação	Deformação plástica	Fratura frágil
Energia de rompimento (J/cm ²)	10	10 ⁻²
Resistência ao choque Térmico	Alta	baixa

Além das características já citadas anteriormente, segundo JASINEVICIUS (1998), o fato de materiais como vidros ópticos, cerâmicas e determinados cristais como silício, germânio e arseneto de gálio sofrerem fratura antes que apreciável deformação plástica ocorra, quando submetidos a tensões, caracteriza a fragilidade destes materiais.

Porém, se por um lado esta característica frágil torna a usinagem destes materiais extremamente difícil, por outro, a demanda por componentes de precisão fabricados a partir de materiais frágeis vem crescendo rapidamente, justificada pelas propriedades ópticas, eletrônicas, mecânicas e físicas que estes materiais possuem.

Várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas ao longo dos últimos anos sobre a retificação de materiais frágeis. O foco principal das pesquisas é o mecanismo de remoção de material durante a usinagem, pois o processo de formação de cavacos está diretamente ligado à qualidade de tais materiais.

No acabamento destes materiais frágeis, a resposta do material à usinagem é um fator importante que afeta a qualidade da superfície gerada. A resposta do material depende da magnitude e tamanho do campo de tensões aplicado ao material definido como “unidade de usinagem” (machining unit), e das condições do processo. Pode ser dito também de uma maneira grosseira que a “unidade de usinagem” corresponde à área da seção transversal dos cavacos. Na retificação, a remoção de material ocorre através da soma de deformações microscópicas ou fratura no ponto onde um grão abrasivo está agindo naquele determinado instante. O material é removido de diferentes maneiras dependendo do tamanho e densidade dos defeitos nos materiais, tais como falhas, trincas e o tamanho do campo de tensões. Quando a tensão aplicada pelas arestas de corte dos grãos for menor que os defeitos, o material será removido principalmente por deformação plástica. Por outro lado, quando o campo de tensões for maior do que os defeitos, microfraturas frágeis localizadas irão ocorrer. Este conceito de unidade de usinagem é extremamente importante na retificação de materiais frágeis, pois estes são muito sensíveis a tais defeitos. (KOMANDURI, et al., 1997; INASAKI, 1987)

Segundo INASAKI (1987), a “unidade de usinagem” pode ser classificada em quatro domínios como pode ser observado na Figura 2.9. Cada domínio é caracterizado pela pré-existência de defeitos ou por defeitos gerados através do processo de remoção de material. A

“unidade de usinagem” da maioria dos processos de retificação se encontra nos domínios 2, 3 e 4.

FIGURA 2.9 - Fatores que afetam a deformação e fratura dos materiais (INASAKI, 1987).

As principais formas de defeitos que usualmente ocorrem na remoção frágil de material são trincas superficiais e subsuperficiais. Diferentes tipos de trincas são produzidos devido ao processo de retificação. Estas trincas podem ser classificadas de duas formas: os primeiros tipos são as trincas radiais visíveis e marcas superficiais deixadas pela retificação. Os segundos tipos são trincas médias e laterais que são formadas abaixo da zona afetada pela retificação e assim não são visíveis. No entanto, estas trincas laterais e médias são tão responsáveis pela formação dos cavacos quanto as trincas radiais. Os principais fatores que influenciam a iniciação destas trincas são as condições do rebolo, o tamanho dos grãos do rebolo, a quantidade de carga aplicada e a pré-existência de falhas superficiais do material.

Segundo SINHOFF (1998), os estágios na formação de uma trinca devido à pré-existência de falhas superficiais do material, neste caso o vidro, podem ser observados na Figura 2.10.

FIGURA 2.10 - Estágios na formação de trincas. (SINHOF, 1998)

Os grãos do rebolo penetram a superfície do vidro devido à ação das forças tangencial e normal de corte presentes. As forças operando induzem tensões superficiais que causam a expansão e abertura das falhas pré-existentes do material, originando as trincas. A origem destas falhas reside nos processos mecânicos, químicos e térmicos ou no próprio processo de usinagem do material. Quando a pressão na configuração das trincas é reduzida, a trinca se fecha de novo. Porém, isto não significa que a trinca tenha sido removida.

A indentação destes materiais, que será vista com maiores detalhes posteriormente, no item 2.5 ilustra bem o comportamento de materiais frágeis e dúcteis na retificação de ponta única com relação às deformações localizadas e fraturas. A Figura 2.11 mostra este comportamento segundo diferentes raios de ponta utilizados do indentador. (INASAKI, 1987).

	Materiais Frágeis	Materiais Dúcteis
Raio de ponta grande	<p>Trincas cônicas Falhas</p>	<p>Deformação Plástica</p>
Raio de ponta pequeno	<p>Baixa pressão</p> <p>Deformação Plástica</p>	<p>Alta pressão</p> <p>Deformação Plástica</p>
	<p>Alta pressão</p> <p>Trinca média Trinca lateral</p>	<p>Alta pressão</p> <p>Deformação Plástica</p>

FIGURA 2.11 - Deformações localizadas e fraturas devido ao indentador (INASAKI, 1987).

Pôde ser observado na figura 2.11, que quando um material dúctil sofre indentação, somente deformação plástica ocorre e não há formação de trincas, independente do raio de ponta do indentador e da carga aplicada. Ao contrário, no caso da indentação do material frágil, a iniciação e propagação de trincas ocorrem sempre. Quando o raio de ponta do indentador é grande (ordem de mm), ocorrem as chamadas trincas radiais. No caso de indentação com raios de ponta pequenos, ocorre a iniciação e propagação de trincas médias e laterais quando a carga aplicada é grande. Com pouca carga, pode-se notar a presença de falhas superficiais e deformação plástica.

Para ilustrar o processo de formação de cavacos quando um material frágil é submetido à retificação, levando-se em consideração um único grão cortante, o modelo esquemático (Figura 2.12) apresentado por INASAKI (1987), mostra que o material é removido através de um lascamento superficial, possivelmente explicado pelo fenômeno de

formação de trincas radiais no material. Pode ser também que os cavacos provenientes dessas fraturas frágeis sejam maiores que a profundidade de corte utilizada, devido provavelmente, à propagação de trincas médias e laterais subsuperficiais formadas no material.

FIGURA 2.12 - Modelo esquemático de formação de cavacos na retificação de materiais frágeis (INASAKI, 1987).

Muitos pesquisadores têm observado que a tendência para o desenvolvimento de microtrincas subsuperficiais, no caso de materiais frágeis, diminui com a diminuição da espessura do cavaco não deformado (profundidade de corte) e quase desaparece para profundidades de corte abaixo de um valor crítico. Pensou-se que isso ocorresse devido ao comportamento do material, sendo menos frágil abaixo deste valor crítico e, portanto, o material seria removido através de um escoamento plástico e não por fratura, que é denominado, remoção dúctil de material. A remoção dúctil ocorre porque a profundidades de corte ou avanços muito pequenos, as tensões geradas, com a maioria das ferramentas, podem não alcançar os valores necessários para geração de trincas médias nos materiais. (KOMANDURI, et al., 1997)

Uma hipótese básica, postulada por BIFANO, et al. (1991), para retificação no regime dúctil, diz que todo material, apesar de sua dureza e fragilidade, irá passar por uma transição

de um regime frágil a um regime dúctil na usinagem se a taxa de avanço utilizada for suficientemente pequena. Esta transição frágil/dúctil na remoção de material, a profundidades de corte tão pequenas, foi discutida puramente sob o ponto de vista da energia despendida no processo. Especificamente, para profundidades de corte menores, o escoamento plástico é um processo de remoção de material energeticamente mais favorável do que a fratura frágil, como veremos a seguir.

A profundidade do material que caracteriza a resistência ao escoamento plástico é a tensão de escoamento, σ_y . A energia (E_p) necessária para deformar plasticamente um volume específico de material (V_p) pode ser escrita como:

$$E_p = \sigma_y V_p \quad (1)$$

A propriedade do material que caracteriza a resistência à fratura é o parâmetro de propagação de trinca Griffith, (G). A energia (E_f) necessária para que ocorra fratura é função da área (A_f) da nova superfície criada pela propagação da trinca. Assim,

$$E_f = GA_f \quad (2)$$

Para uma profundidade de corte (d), é razoável assumir que a ordem de magnitude de ambos V_p e A_f é determinada por d . O que significa:

$$V_p \propto d^3 \quad (3)$$

$$A_f \propto d^2 \quad (4)$$

A razão da energia de remoção de material então é dada por:

$$\frac{\text{Energia para escoamento plástico}}{\text{Energia para fratura}} \propto \frac{E_p}{E_f} \propto d \quad (5)$$

Conseqüentemente, como a escala de usinagem diminui, o escoamento plástico se torna o mecanismo de remoção de material mais energeticamente favorável, isto é, assumindo que σ_y e G são fixos, E_p/E_f diminuirá com a diminuição de d . A profundidade de corte específica no qual a transição frágil/dúctil ocorre é função das propriedades intrínsecas do material que governam a deformação plástica e fratura.

Esta consideração feita sob a energia necessária para remoção de material leva a generalização do que BIFANO, et al. (1987; 1991), chamaram de “hipótese da retificação no regime dúctil”. Esta hipótese afirma que para qualquer material, se a escala de dimensões da remoção de material é suficientemente pequena, a remoção ocorrerá por escoamento plástico e não por fratura.

Os mecanismos e parâmetros envolvidos na remoção de materiais frágeis serão mais bem discutidos posteriormente, quando serão vistos os modelos de corte para estes tipos de materiais, de BIFANO, et al. (1991), CHEN, et al. (2000) e SUBRAMANIAN (1997).

2.4 Retificação de monocristais de silício

O silício (Si) monocristalino, largamente utilizado em dispositivos eletrônicos, requer uma superfície usinada livre de defeitos. No entanto, usinagens convencionais tais como a retificação, normalmente introduzem uma camada severamente deformada com trincas subsuperficiais, a qual tem que ser removida em uma operação de acabamento posterior. O

torneamento de ultraprecisão pode produzir superfícies com excelente acabamento superficial, porém, microtrincas são difíceis de se evitar. (BLAKE & SCATTERGOOD, 1990).

Uma característica da subsuperfície de um monocristal usinado por um processo de ultraprecisão é que uma camada amorfa normalmente aparece na superfície do material seguida por uma zona com alta densidade de deslocamentos e defeitos. Segundo JASINEVICIUS (1998), cristais semicondutores, tais como Si e Ge, que apresentam estrutura cúbica cristalina do diamante, quando submetidos a altas pressões hidrostáticas, sofrem uma mudança de fase de semicondutor para metal. Esta transformação de fase gera a formação da camada amorfa na superfície destes semicondutores.

ZARUDI & ZHANG (1996) e ZARUDI & ZHANG (1998), através de ensaios experimentais, investigaram os efeitos da retificação de ultraprecisão na mudança microestrutural em monocristais de silício, tais como rugosidade superficial e deslocamento estrutural, a fim de obter melhor entendimento dos defeitos subsuperficiais neste tipo material provenientes deste processo.

As condições de retificação utilizadas no experimento estão resumidas na Tabela 2.5 (ZARUDI & ZHANG, 1998).

TABELA 2.5 - Condições de retificação (ZARUDI & ZHANG, 1998).

Material da Peça	Bolachas de silício monocristalino
Rebolo de retificação	SD4000L75BFP
Diâmetro do rebolo (mm)	305
Velocidade do rebolo (m/min)	27
Largura de retificação (mm)	5
Avanço (m/min)	0,02; 0,1; 0,2; 0,5; 1
Profundidade de corte (mm)	100
Lubrificante	Syntilo 3 (99% água e 1% óleo mineral)

Os resultados experimentais de ZARUDI & ZHANG (1998), mostram que a variação no avanço não causou efeitos consideráveis na rugosidade superficial da amostra (Tabela 2.6), porém a espessura da camada amorfa variou com a variação do avanço (Tabela 2.7).

TABELA 2.6 - Variação da rugosidade superficial das amostras com o avanço (ZARUDI & ZHANG, 1998).

Avanço (m/min)	1	0,5	0,2	0,1	0,02
Rugosidade Rms (nm)	30	40	28	40	25
Desvio (nm)	6	6	6	6	6

TABELA 2.7 - Variação da espessura da camada amorfa com o avanço (ZARUDI & ZHANG, 1998).

Avanço (m/min)	1	0,5	0,2	0,1	0,02
Espessura da camada amorfa (nm)	60	53	48	42	36
Desvio (nm)	15	15	15	15	15

A Figura 2.13, retirada de JASINEVICIUS (2000), apresenta uma vista transversal de uma amostra de silício torneada com uma ferramenta de diamante monocortante. São observados a espessura da camada amorfa formada e os defeitos na zona logo abaixo desta camada. A mudança microestrutural do Si observada por ZARUDI & ZHANG (1998), devido à retificação, também apresentaram as mesmas características.

FIGURA 2.13 - Vista transversal da superfície do Si torneada com uma ferramenta de diamante. (JASINEVICIUS, 2000)

2.5 Indentação e Riscamento

A indentação e riscamento são duas técnicas altamente importantes que ajudam no esclarecimento dos fenômenos envolvidos na remoção de materiais frágeis.

As técnicas de indentação vêm sendo usadas desde 1900 (teste Brinell) como um meio de medir dureza o qual, de forma comparativa, mede a resistência de um material que passa por deformação permanente local ou escoamento plástico. O teste de indentação consiste em pressionar um indentador duro sobre a superfície da amostra do material a ser estudado, a uma determinada taxa de penetração. Usualmente, são usados dois tipos de indentadores; indentadores “afiados” (sharp indenter) tais como os aplicados nos testes de dureza Knoop e Vickers (ponta de diamante cônica e piramidal, respectivamente) e os indentadores “cegos” (blunt indenter), utilizados no teste de dureza Brinell (ponta do indentador de esfera de aço). (CHAO, 1991)

O teste de indentação mais utilizado atualmente é aquele que se usam indentadores afiados, cônico ou piramidal, pois assemelham-se mais à forma geométrica das ferramentas de corte de diamante (LAWN & SWAIN, 1975).

Para um dado campo de tensões abaixo de um indentador, é possível, a princípio, determinar os mecanismos de qualquer configuração de fratura. Dois aspectos importantes a este respeito são, o começo e a propagação das trincas.

Entre estes dois aspectos, o começo da trinca é o menos receptivo à quantificação em termos de propriedade dos materiais. Ela se inicia de uma falha, já existente ou induzida pelo próprio processo de indentação. As falhas pré-existentes ocorrem tipicamente como microtrincas; sua natureza e distribuição dependem do histórico mecânico, químico e térmico do material, porém está mais ligada à susceptibilidade da superfície frágil do material a danos devido o contato e manuseio (LAWN & WILSHAW, 1975).

Um diagrama esquemático da iniciação e propagação de trincas durante o carregamento e descarregamento em um teste de indentação é ilustrado na Figura 2.14.

FIGURA 2.14 - Esquema de iniciação e propagação de trincas no carregamento (a, b, c) e descarregamento (d, e, f) em um teste de indentação (LAWN & SWAIN, 1975 e LAWN & WILSHAW, 1975).

Durante o ciclo de carregamento, um indentador afiado induz uma zona de deformação irreversível sobre o ponto de contato. O tamanho desta área de contato aumenta com o aumento da carga. Em um certo ponto, sob uma determinada carga crítica, ocorre o aparecimento de trincas médias abaixo do ponto de contato, onde a concentração de tensões é maior. Com o aumento da carga de penetração as trincas se propagam de forma estável e subsuperficial.

No ciclo de descarregamento, com a retirada progressiva da carga, as trincas médias começam a se fechar e há o aparecimento de trincas laterais originadas na base da zona deformada plasticamente. Estas trincas laterais continuam a se estender até que o ciclo de descarregamento esteja completo, podendo propagar-se até a superfície da peça. Na usinagem, quando a profundidade de corte é grande, as trincas laterais podem se estender à superfície e causar o lascamento (Figura, 2.15).

FIGURA 2.15 - Representação esquemática dos tipos de trincas que podem aparecer durante a usinagem de materiais frágeis. (APUD DUDUCH, 1993).

As tabelas 2.8 e 2.9, apresentam resultados de indentações realizados em amostras de silício (Si) monocristalino no estado polido e no estado torneado com uma ferramenta monocortante de diamante. Em ambos casos a orientação cristalográfica do silício era (100) e (111). As indentações foram realizadas com cargas de 10, 25 e 50g do indentador. Foram tomadas 5 medidas para cada carga do indentador e obtido a dureza média e desvio padrão para cada estado da amostra (JASINEVICIUS, 2000).

TABELA 2.8 - Valores de Dureza Vickers (H_v) obtidos através da indentação de amostras de silício (100) no estado polido e torneado sob cargas de 10, 25 e 50g do indentador.

Carga (g)	H_v (kgf/mm ²)	H_v (kgf/mm ²)
	Si (100) Polido	Si (100) Torneado
10	1243,03±91,98	912,60±44,59
25	1111,78±59,34	913,11±28,59
50	1026,12±60,82	1086,78±38,68

TABELA 2.9 - Valores de Dureza Vickers (H_v) obtidos através da indentação de amostras de silício (111) no estado polido e torneado sob cargas de 10, 25 e 50g do indentador.

Carga (g)	H_v (kgf/mm ²)	H_v (kgf/mm ²)
	Si (100) Polido	Si (100) Torneado
10	1319,35±38,51	1009,01±78,87
25	1195,40±28,05	1059,72±81,22
50	1109,18±57,99	1097,80±44,62

Através de análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV), vários autores (PUTTICK, 1980; JASINEVICIUS, 2000) observaram que as amostras de silício não apresentaram sinais de trincas superficiais sob cargas inferiores a 3g, somente impressões do indentador deixadas por deformação plástica. As trincas começaram a aparecer quando cargas

de aproximadamente 4g foram aplicadas; e acima de 5g, todas as impressões deixadas apresentaram trincas. As figuras 2.16 e 2.17, mostram o aparecimento de trincas radiais e o aumento destas trincas com o aumento da carga aplicada do indentador de 10, 25 e 50g, respectivamente.

FIGURA 2.16 - Pequena trinca radial em uma amostra de silício monocristalino com uma carga do indentador de 10g. (JASINEVICIUS, 2000)

FIGURA 2.17 - Crescimento das trincas radiais em uma amostra de silício monocristalino com um aumento da carga do indentador de 10 para 25 e 50g. (JASINEVICIUS, 2000)

A relação de carga (P) e dimensão característica das impressões de indentação (Figura 2.18) segundo CHEN (2000), pode ser expresso como:

$$P = \alpha \cdot H_v \cdot a^2 \quad (6)$$

onde, H_v é a microdureza do material, α é o fator adimensional relacionado à geometria do indentador e P a carga aplicada.

FIGURA 2.18 - Gráfico do corte de um grão perfeito. (CHEN, 2000)

Os cristais de silício começam a fraturar devido o aumento da carga aplicada. A relação entre a carga crítica (P_c), onde a geração de trincas na superfície do material inicia-se e sua resistência a fratura, é expressa como:

$$P_c = \lambda_0 \cdot K_{Ic} \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{H} \right)^3 \quad (7)$$

onde, λ_0 é o fator integrativo, $\lambda_0 = (1,0 \sim 1,6) \cdot 10^4$ e K_{Ic} é a resistência à fratura do material.

Segundo CHEN (2000), quando cargas maiores são aplicadas, a ocorrência de trincas radiais, laterais e médias são observadas na superfície do silício.

Estes pesquisadores perceberam que, até determinadas cargas críticas, e por consequência, profundidades de penetração crítica, o escoamento era plástico; vencidas estas cargas, ocorria a fratura do material.

No riscamento, também foi observada a influência da carga aplicada e da profundidade de penetração do indentador (CHAO, 1991; MALKIN, 1996). Segundo os pesquisadores a deformação plástica torna-se energeticamente favorável à medida que a quantidade de deformação diminui e existe um volume limite (“threshold”) abaixo do qual o material irá se deformar, mas não fraturar.

Riscamentos produzidos por ferramentas de ponta única de diamante em materiais frágeis tais como, alumina e nitreto de silício, foram produzidos por MALKIN (1996), e estão demonstrados na Figura 2.19. Nota-se nesta figura a evidência de escoamento dúctil, trincas laterais, formação de cavaco ao longo das ranhuras e um esmagamento abaixo e afrente da ferramenta, no substrato de alumina. Para profundidades de corte menores que 1 μm (figura 2.19a), somente escoamento dúctil foi observado, o qual implicaria em uma carga normal abaixo de um valor limite. Para profundidades de corte entre 1 e 3,5 μm (Figura 2.19b), ambos trincas e escoamento plástico foram observados na superfície da ranhura, com a maioria do material removido em forma de partículas esmagadas. Para profundidades de corte acima de 10 μm (Figura 2.19c), trincas laterais desenvolveram-se radialmente ao longo das ranhuras, e a profundidades maiores ainda, uma escala maior de formação de cavacos e esmagamento foi observado.

FIGURA 2.19 - Ilustração do mecanismo de riscamento para alumina (MALKIN, 1996).

A maioria dos testes de riscamento são realizados com profundidades de corte fixas. No entanto, na maioria dos processos de retificação atuais, a profundidade de corte aumenta progressivamente quando os grãos abrasivos passam através da zona de retificação. Uma maneira de simular este comportamento com um corte de ponta única é inclinar a peça em relação à direção de corte. Para cortes de ponta única inclinados, de silício e germânio, o escoamento dúctil inicial progressivamente muda para fratura frágil depois que uma profundidade crítica de corte é alcançada, Figura 2.20 (MALKIN, 1996). A força normal aumentou linearmente com a distância (profundidade de corte) no regime dúctil e flutuou em valores menores quando fraturas frágeis ocorreram. Isto implica que as forças de retificação e energia são expandidas principalmente em função do escoamento dúctil, mesmo que a maioria da remoção de material ocorra por fratura frágil.

FIGURA 2.20 - Regimes de corte para silício (MALKIN, 1996).

A formação do cavaco na retificação com ferramenta de diamante difere dinamicamente e geometricamente da deformação produzida pela indentação e riscamento. Entretanto, as similaridades existentes entre os processos e o grande corpo de dados concernente à quantidade limitada de deformação plástica que precede o início de fratura frágil, demonstram a viabilidade da remoção dúctil de materiais frágeis na retificação de ultraprecisão, quando profundidades de corte combinadas com condições de usinagem (parâmetros do rebolo, avanço e velocidade de corte) forem convenientemente aplicadas, levando ao desenvolvimento de modelos de corte para tais materiais.

2.6 Modelos de Corte

2.6.1 Modelo de BIFANO (1991)

A hipótese básica postulada para este modelo (BIFANO, et al., 1991), já citada anteriormente, para retificação de materiais frágeis no regime dúctil, diz que todo material, apesar de sua fragilidade e dureza, irá sofrer uma transição de um regime frágil a um regime dúctil na usinagem, se a taxa de avanço utilizada for suficientemente pequena. Abaixo desta taxa limite de avanço, a energia necessária para propagar trincas é maior do que a energia para que o escoamento plástico ocorra, portanto a plasticidade torna-se o mecanismo de remoção de material predominante.

Para investigar a influência das propriedades dos materiais na transição frágil/dúctil, uma grande variedade de vidros amorfos, monocristais e cerâmicas avançadas, foram escolhidas para retificação. Comparando-se a ductilidade desses materiais às suas propriedades intrínsecas, um modelo para profundidade de corte crítica foi estabelecido. Este modelo relaciona a taxa de avanço crítica medida para 10% de fratura superficial com a profundidade crítica de corte baseado nas propriedades do material (os 10% de fratura superficial foram escolhidos arbitrariamente como um valor referente à transição frágil/dúctil).

O modelo tem como origem uma fórmula que descreve a profundidade crítica para que a fratura ocorra durante a indentação de materiais duros (LAWN, et al., 1976). Baseado no critério de propagação da fratura frágil de Griffith, esta fórmula prevê uma profundidade crítica de indentação de:

$$d_c = \frac{ER}{H^2} \quad (8)$$

Onde, d_c é a profundidade de indentação crítica, E é o módulo de elasticidade, R a energia para fraturar o material e H a sua dureza. Para materiais que exibem uma zona plástica próximo ao topo da trinca, o valor de R pode ser avaliado usando a análise clássica de propagação de trincas de Griffith. Uma aproximação para definir a energia de fratura em pequena escala é substituí-la por uma medida dimensionalmente análoga de energia, necessária para propagar trincas, chamada:

$$R \approx \frac{K_c^2}{H} \quad (9)$$

Na indentação, a quantidade K_c^2/H tem sido chamada de medida efetiva da fragilidade (MARSHALL & LAWN, 1986). Esta quantidade pode ser combinada com o modelo para profundidade crítica da equação (8), produzindo:

$$d_c \propto \left(\frac{E}{H} \right) \left(\frac{K_c^2}{H} \right)^2 \quad (10)$$

Como uma medida da transição para profundidade de corte frágil. Os resultados experimentais para os testes de indentação usando esta fórmula têm mostrado um extraordinário grau de consistência. Se este tipo de análise foi adotado para retificação, d_c representaria uma medida da taxa de avanço crítica esperada para mudar o mecanismo de remoção de material de um regime dúctil para um frágil. Assim, presumivelmente uma série de materiais frágeis poderiam ser enquadrados de acordo com suas propriedades para determinar a taxa de avanço do rebolo, abaixo do qual, fratura frágil não ocorreria.

As propriedades relevantes de cada material foram medidas, usando técnicas de microindentação. Enquanto a medida da dureza dos materiais através da indentação é um

procedimento padrão, a determinação de K_c e E , também pela indentação, é uma área de pesquisa em desenvolvimento (MARSHALL & LAWN, 1986). As propriedades das superfícies dos materiais variam com a profundidade da indentação, no qual elas estão medidas. Esta variabilidade das propriedades dificulta a medida de K_c . Efeitos de tamanho de escala levam a uma dependência de K_c com o tamanho da trinca, o qual pode ser muito grande em certos materiais. (SCATTERGOOD, 1988). Tais variações das propriedades dos materiais complicam a extrapolação de uma escala de indentação ($\sim 10 \mu\text{m}$) para uma escala de microindentação ($< 1 \mu\text{m}$). Apesar destes problemas em calcular as propriedades dos materiais, uma correlação razoável foi obtida entre a profundidade crítica de corte calculada e a taxa de avanço crítica medida (isto é, o avanço que produzirá 10% de superfície fraturada).

Para esta correlação (BIFANO, et al., 1991), a constante de proporcionalidade para equação (10), pode ser estimada, produzindo:

$$a_c = 0,15 \left(\frac{E}{H} \right) \left(\frac{K_c}{H} \right)^2 \quad (11)$$

Somente materiais que exibem uma variação significativa em K_c com a profundidade de indentação não foram bem representados pelo modelo. Para estes materiais, o valor de K_c estimado para pequenas indentações pode ser utilizado para modificar a taxa de avanço crítica calculada (BIFANO, et al., 1991).

Na retificação de mergulho, a profundidade crítica de corte corresponde à taxa de avanço crítica por revolução do rebolo. Este modelo não levou em consideração a multiplicidade das arestas de corte no processo de retificação e, portanto não incluem o efeito dos parâmetros do rebolo. O modelo de SUBRAMANIAN, et al., (1997), descrito a seguir, leva em consideração alguns destes parâmetros.

2.6.2 Modelo de CHEN (2000)

O modelo citado anteriormente (BIFANO, et al., 1991), estudou a profundidade crítica de corte sem a geração de trincas por micro indentação. Para que o número de trincas na superfície dos materiais frágeis não ultrapasse 10% de fratura; a profundidade crítica de corte deveria satisfazer a seguinte equação, já vista anteriormente:

$$a_c = 0,15 \left(\frac{E}{H} \right) \left(\frac{K_c}{H} \right)^2 \quad (11)$$

Esta equação foi obtida através de vários experimentos realizados. Porém a dinâmica do processo de retificação não foi considerada.

CHEN (2000), baseado em testes de indentação sob diferentes cargas, investigou teoricamente o valor crítico da transição frágil/dúctil de materiais frágeis através de uma simulação de um único grão do rebolo de retificação com o diamante do indentador.

O diagrama da Figura 2.21 mostra o processo de retificação de uma aresta de corte de um grão de diamante do rebolo. Nesta figura, a espessura de corte formada por um único grão pode ser obtida por uma relação cinemática entre o rebolo e a peça. Quando o grão está no topo da superfície da peça, Figura 2.22, a espessura de corte do grão é máxima.

Para o cálculo da espessura máxima de corte do grão, assume-se que a profundidade de corte sendo muito pequena, o arco de corte do grão pode ser considerado, aproximadamente, como uma linha reta; os grãos são distribuídos equidistantes ao longo do círculo do rebolo e; o grão pode ser aproximado à forma de uma octahedro equivalente e seu ângulo de ponta também tem uma participação no processo.

FUGURA 2.21 - Diagrama do processo de retificação de uma aresta de corte de um grão do rebolo (CHEN, 2000).

FIGURA 2.22 - Diagrama de uma pequena espessura de corte do grão (CHEN, 2000).

De acordo com considerações anteriores, a espessura máxima de corte de um único grão pode ser obtida por:

$$a_{gmáx} = \left[\frac{4v_w}{v_s N_d C} \sqrt{\frac{a_p}{d_e}} \right]^{1/2} \quad (13)$$

Onde, v_w é a velocidade de avanço, v_s a velocidade tangencial do rebolo, N_d o número de arestas de corte efetivas, C uma constante de corte, a_p a profundidade de corte e d_e o diâmetro equivalente do rebolo.

Teoricamente, a condição crítica para que a transição frágil/dúctil ocorra, depende da espessura de corte de um único grão. Quando esta espessura de corte máxima é alcançada, assume-se a forma de uma octahedro equivalente para o grão. Portanto, a área da seção do grão agindo sobre a peça é similar à topografia da superfície obtida no teste de indentação. Isto significa que a forma do diamante do indentador é igual à do grão do rebolo, porém no processo de corte somente um ou dois dos quatro lados do grão estarão agindo sobre a peça, ao passo que, na indentação, os quatro lados do diamante estarão em contato com a peça.

A Figura 2.18 demonstra o tamanho característico da indentação dado que $2a = 2a_g \tan(\alpha_0/2)$, onde α_0 , é o ângulo de topo.

De acordo com o método de medir a microdureza, a área do grão em contato com a peça pode ser expressa pela equação (14), levando-se em consideração o fato de que somente metade do grão estará suportando a carga aplicada na retificação.

$$A_g = \frac{1}{2} a_g^2 \cdot \tan^2\left(\frac{\alpha_0}{2}\right) \quad (14)$$

Da equação (1-indentação), P_r pode ser obtido por,

$$P_r = \frac{1}{2} \alpha \cdot a_g^2 \cdot \tan^2\left(\frac{\alpha_0}{2}\right) \cdot H \quad (15)$$

No entanto, para o processo de retificação, todos os grãos do rebolo trabalham continuamente e no contato com a peça, induzem um forte impulso sobre ela. Dos estudos de Kalthoff sobre a resistência à fratura dinâmica sob cargas por impulso, é errado determinar o fator intensidade das tensões dinâmicas somente substituindo a carga por impulso pela fórmula do fator intensidade das tensões estáticas. Obviamente, utilizando a resistência à

fratura estática (k_c) para estudar a dinâmica da trinca, pode-se refletir sem precisão a tenacidade da trinca dinâmica sob carga por impulso. Experimentos realizados por Clifton para materiais frágeis, observaram que k_d é aproximadamente 30% de k_c , e ainda, os grãos serão afetados pelo impacto com a superfície da peça. No momento em que um pequeno contato ocorre, um forte impulso será produzido. A força de impacto induzida por este impulso, também é muito forte. Como resultado, o efeito dominó das marcas de retificação na superfície da peça é muito diferente em forma e dimensão das marcas de indentação obtidas nos testes de dureza, onde as cargas foram aplicadas vagarosamente. Portanto, substituindo k_d por k_c na fórmula 7, e a carga por impulso dinâmica P_d , por P_c estático, chega-se a uma carga mais apropriada para o atual processo de retificação:

$$P_c = \lambda_0 \cdot K_d \cdot \left(\frac{K_{Id}}{H} \right)^3 \quad (16)$$

Combinando as fórmulas (15 e 16), a profundidade crítica de corte para que a transição frágil/dúctil ocorra durante o processo de retificação pode ser obtido por:

$$a_{gc} = \cot g \left(\frac{\alpha_0}{2} \right) \cdot \sqrt{\frac{2\lambda_0}{a}} \cdot \left(\frac{K_{ed}}{H} \right)^2 \quad (17)$$

Este modelo é mais apropriado para a retificação no regime dúctil de materiais frágeis do que o apresentado por BIFANO, et al., (1991), pois leva em consideração os efeitos da carga por impulso na medida da micro dureza e resistência à fratura dos materiais.

2.6.3 Modelo de SUBRAMANIAN (1997)

Quando o rebolo de retificação é aplicado à superfície da peça com um dado avanço, velocidade e profundidade de corte, existem geralmente quatro tipos de interações acontecendo na zona de retificação. Estas interações podem ser caracterizadas como mostra a Figura 2.23.

FIGURA 2.23 - Interações na zona de retificação: (1) interface abrasivos/peça; (2) interface ligante/cavaco; (3) interface cavaco/peça; (4) interface ligante/peça (SUBRAMANIAN, 1997).

Os grãos abrasivos interagem com o material da peça sujeito a tensões e deformações dependendo das variáveis do processo de retificação, da geometria dos abrasivos e das propriedades dos materiais das peças. Simultaneamente, existem três interações por atrito devido ao “escorregamento” dos cavacos produzidos, atrito contra a peça, contra o ligante do rebolo e do ligante deslizando sobre a peça. A presença de fluido lubrificante influenciará estas interações.

SUBRAMANIAN (1997), através de um conjunto de observações experimentais e análises, mostrou que na retificação de cerâmica a interação abrasivos/peça pode ser tratada da mesma maneira que os já conhecidos modelos de formação de cavacos.

Uma variedade de modelos têm sido proposta por diversos pesquisadores que descrevem a iniciação e propagação de microtrincas como um modelo de fratura por indentação e a ocorrência de uma deformação dúctil sob taxas de remoção de material extremamente baixas como um modelo de retificação no regime dúctil. SUBRAMANIAN (1997), sugere um modelo no qual ambos possam operar simultaneamente, chamado modelo de formação de cavaco unificado para retificar cerâmica.

A espessura do cavaco h na retificação é geralmente derivada assumindo-se um indentador cônico (SHAW, 1972). No entanto, para um tamanho de grão abrasivo arbitrário, d_g , a espessura h do cavaco pode ser expressa como:

$$h = \left(\frac{v_w}{v_s} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{d}{D_e} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{1}{KCd_g} \right)^{1/2} \quad (18)$$

v_w = velocidade de corte,

v_s = velocidade do rebolo,

d = profundidade de corte,

D_e = diâmetro equivalente,

K = largura do cavaco eu espessura (assumido ser uma constante, geralmente uma função do tipo de abrasivo e sua geometria),

C = número de grãos na zona de retificação por unidade de área = $f(d_g, \text{volume de grãos abrasivos contidos no rebolo})$.

A variável C pode ser estimada como segue:

$$C = (N_{gcc})^{2/3} \quad (19)$$

$$N_{gcc} = N_{gc} \cdot W_g \quad (20)$$

N_{gcc} = número de grãos abrasivos por unidade de volume,

N_{gc} = número de grãos abrasivos por peso = $f(d_g)$

A tabela de N_{gc} como uma função do tamanho do grão é fornecida pelos produtores de grãos abrasivos.

W_g = Peso de um grão abrasivo por unidade de volume do rebolo (manual de especificação dos produtores).

As análises de BIFANO, et al., (1991), onde a razão de energia para remoção de material é dada pela equação (5), sugeriram que a deformação plástica é energeticamente favorecida quando a profundidade de corte d é reduzida na retificação das cerâmicas.

No entanto, no processo de retificação enquanto d representa a profundidade total de corte, h representa a espessura do cavaco ou profundidade de corte por grão, como mostrado na Figura 2.24. Através da equação 18 nota-se que a espessura do cavaco depende de um número de variáveis do processo, um dos quais, a profundidade de corte d . Além disso, como descrito na Figura 2.11, o volume deformado sob deformação plástica também é influenciado pelo raio do indentador (aproximadamente igual à metade do tamanho de um grão abrasivo d_g), e também pela força aplicada pelo grão abrasivo F_g .

FIGURA 2.24 - Representação Esquemática do modelo de formação de cavaco com o grão abrasivo como um indentador (SUBRAMANIAN, 1997).

Então,

$$V_p \propto f(h^3, d_g, F_g) \quad (21)$$

$$A_f \propto f(h^2, d_g, F_g) \quad (22)$$

A razão de energia de remoção de material então, é dada por,

$$\frac{\text{Energia para escoamento plástico}}{\text{Energia para fratura}} \propto \frac{f(h^3, d_g, F_g)}{f(h^2, d_g, F_g)} \propto f(h, d_g, F_g) \quad (23)$$

Portanto, cada incidência da interação abrasivos/peça pode ser energeticamente favorecida para a deformação plástica ou fratura frágil, dependendo da espessura do cavaco, força por grão e raio dos grãos abrasivos pertinentes a esta incidência. Assim a retificação de cerâmica na média pode ser considerada sendo influenciada por eventos probabilísticos de interações abrasivos/peça resultando em deformação plástica e fratura frágil. O resultado final pode ser uma soma desses dois eventos, da frequência em que ocorrem e da magnitude e distribuição de cada ocorrência. Este modelo é esquematicamente mostrado na Figura 2.25. Está implícito que enquanto nos referimos aos valores médios dos três parâmetros do processo (força por grão, raio do grão e espessura do cavaco), eles também deveriam ser mantidos sobre uma faixa ou distribuição um tanto pequenas. Caso contrário, a saída do processo de retificação será influenciada por condições extremas.

FIGURA 2.25 – Mecanismos e variáveis que controlam o processo de retificação de cerâmica (SUBRAMANIAN, 1997).

Também é importante notar que a discussão até o momento foi limitada às interações abrasivos/peça, o qual é apenas uma das quatro interações que ocorre na zona de retificação observada na Figura 2.26 (interações). Portanto, para que o processo seja apropriadamente utilizado, é necessário que os outros aspectos do sistema de retificação também sejam adequadamente analisados e estudados.

FIGURA 2.26 - Interações na zona de retificação (SUBRAMANIAN, et al., 1997).

2.7 A operação de dressagem

A operação de dressagem (também conhecida por afiação do rebolo ou dressamento) é o processo de restauração da eficiência de um rebolo de retificação através da usinagem da face de trabalho deste com uma ferramenta chamada dressador.

A dressagem de um rebolo de diamante tem duas finalidades principais: o perfilamento da face de trabalho para uma operação de forma e o arrancamento dos grãos abrasivos gastos para melhorar a agressividade da face de trabalho. Esta última é a principal, pois a agressividade de um rebolo determina a capacidade de remoção de material em uma operação de retificação.

Os processos de dressagem podem ser separados em dois tipos: aquele que ocorre durante o processo de retificação (“in process”) e aquele que ocorre entre as operações de retificação (“off-line”). Um método comum de retificação “off-line” envolve o avanço de uma haste dressadora de sacrifício de cerâmica contra o rebolo, entre os passes de retificação, provocando a erosão no ligante. Uma técnica alternativa de dressagem utilizada com sucesso na retificação de ultraprecisão de cerâmica é a aplicação de um composto abrasivo entre o rebolo e um disco rígido (lapidação). Já as técnicas “in-process” oferecem algumas vantagens: Elas podem potencialmente levar a um comportamento de dressagem uniforme e não necessitam de interrupção do processo. Onde este processo tem sido usado em substituição ao processo “off-line”, observou-se um acabamento superficial superior das peças.

Um método de dressagem “in-process” que vem sendo estudado por vários pesquisadores (BIFANO, et al., 1999; EUN-SANG LEE & JEONG-DU KIM, 1997; OHMORI & NAKAGAWA, 1995) nos últimos anos é o processo de dressagem eletrolítica ou ELID (“Electrolytic in-process Dressing”).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA DOS ENSAIOS

3.1 Planejamento Experimental

Os materiais frágeis possuem características teoricamente adversas ao uso do processo de usinagem. Entretanto, se respeitadas algumas premissas básicas, como profundidade e espessura de corte, podem ser torneados ou retificados no regime dúctil, de modo a obter-se uma superfície livre de defeitos e com acabamento espelhado. Porém, as dimensões envolvidas no processo fazem com que mínimos erros ou variações na usinagem produzam danos, de modo que a remoção seja acompanhada de fratura (SILVA, 1999).

Neste trabalho, procurou-se analisar o comportamento do material quando retificado com uma ferramenta de diamante, levando-se em conta parâmetros específicos para este tipo de usinagem de ultraprecisão.

Para tanto, o material escolhido foi o silício monocristalino, pela sua grande gama de aplicações e pelo fato de ter sido extensivamente utilizado em ensaios experimentais de usinagem realizados pelo Laboratório de Engenharia de Precisão (EESC – USP), proporcionando assim, base experimental para este trabalho.

O parâmetro de corte variado no experimento foi a profundidade de corte do rebolo (a_p); o avanço (f) e a velocidade do rebolo (V_s), foram mantidos constantes. Tais parâmetros foram escolhidos e combinados de modo que três modos distintos de remoção de material fossem

obtidos: totalmente dúctil, dúctil/frágil e totalmente frágil. A escolha dos parâmetros foi baseada em trabalhos pesquisados referenciados ao longo da revisão bibliográfica, manual de operação da máquina e a ajuda de Mestres e Doutores ligados a esta área (Base de conhecimento do Laboratório de Engenharia de Precisão da EESC-USP). A Tabela 3.1 mostra os parâmetros de corte utilizados.

TABELA 3.1 – Parâmetros de corte utilizados.

Parâmetros de corte	
Velocidade do Rebolo V_s (RPM)	6000
Velocidade da Peça V_w (RPM)	0
Profundidade de corte a_p (μm)	0 ~ 7
Avanço f ($\mu\text{m}/\text{rev}$)	1

A velocidade da peça (V_w) foi mantida constante em 0 rpm (zero) com a fixação do eixo-árvore. A profundidade de corte (a_p) variou de 0 a 7 μm devido à montagem da amostra (ver item 3.2.1) com um ângulo de inclinação previamente determinado. Um único experimento oferece variação contínua da profundidade de corte entre 0 e 7 μm .

Os ensaios consistem em usinar a amostra de silício monocristalino com determinada condição de corte, através de ensaios de retificação tangencial de mergulho plana.

O aparato experimental, representado na Figura 3.1, consiste basicamente do Gerador de Superfícies Anesféricas ASG 2500 da RANK PNEUMO.

FIGURA 3.1 – Máquina ASG 2500 com a montagem experimental.

Os resultados obtidos com estes parâmetros de corte permitiram a análise das condições da superfície usinada que foi feita através da medida do perfil do corte em algumas regiões ao longo de sulcos específicos (através do perfilômetro mecânico Talystep) e das imagens obtidas nas Microscopias Óptica e Eletrônica de Varredura.

3.2 Preparação e Características da Amostra de Silício

O silício monocristalino utilizado no experimento caracteriza-se por ser extremamente frágil a temperatura ambiente, tornando-se dúctil a temperaturas elevadas (900°C). Suas principais aplicações são como semicondutor, na fabricação de transistores, circuitos integrados, diodos e no campo da óptica na fabricação de lentes planas e anesféricas para o espectro infravermelho, entre outros. Algumas propriedades físicas do silício estão listadas na Tabela 3.2 (JASINEVICIUS, 1998; SPEAR, 1989).

TABELA 3.2 – Propriedades do silício monocristalino (JASINEVICIUS, 1998; SPEAR, 1989).

Propriedades	Valor
Ponto de Fusão (°C)	1420
Densidade ρ (kg/m ³)	2328
Dureza H (GPa)	10
Módulo de Young E (GPa)	186,5
Módulo de Cisalhamento G (GPa)	57,5
Resistência à fratura K_c (Mpm ^{1/2})	0,6 – 0,9

A amostra de silício utilizada tem orientação cristalográfica (111) do tipo p. As dimensões da seção da amostra são: 14mm x 16 mm.

A amostra polida como recebida, tem a rugosidade de 6,0 nm Ra.

3.2.1 Passos para a montagem da amostra

- Limpeza: a amostra foi primeiramente limpa com solvente tricloroetileno (teor 99,5% álcool).
- Colagem do silício no suporte de vidro: foi utilizado um suporte de vidro e um suporte metálico, previamente polidos, de modo a se obter qualidade de forma e acabamento superficial ópticos. Tomou-se grande cuidado na colagem da amostra utilizando cera de moldagem odontológica, para se evitarem desvios de forma e paralelismo. O suporte metálico foi colocado sobre um aquecedor (FISATOM, modelo 501) à temperatura de aproximadamente 80°C (Figura 3.2).

FIGURA 3.2 – Aquecedor elétrico Fisatom.

Friccionou-se um pedaço de cera sobre a superfície do suporte metálico até derreter e tornar-se fluida. Colocou-se uma folha metálica com espessura de 18 μm (que confere o ângulo de cunha desejado) mais o suporte de vidro sobre o suporte metálico quente. Friccionou-se outro pedaço de cera sobre o suporte de vidro e deslizou-se a amostra de silício sobre ele (no sentido desejado para encontrar um comprimento suficiente para usinagem em cunha). Desligou-se o aquecedor e deixou-se o conjunto esfriar até que a cera se solidificasse ao redor das partes fixadas. Nota-se que não há acúmulo de cera sob as superfícies alterando sua inclinação (uma película muito fina e uniforme permanece entre as partes coladas), como mostra o esquema da Figura 3.3. A Figura 3.4 mostra o conjunto montado.

FIGURA 3.3 – Esquema da montagem da amostra.

FIGURA 3.4 – Amostra de Silício fixada no suporte de vidro e o suporte metálico.

3.2.2 Passos para a medição da montagem

- a) Medição da inclinação: Utilizou-se um relógio comparador eletrônico (TESATRONIC, TTA20), uma base magnética (TESA) que serviu de suporte para a haste do relógio comparador e um desempeno de granito (MITUTOYO) para medir a inclinação conseguida com a folha metálica antes de fixar o suporte metálico na

máquina (Figura 3.5). Deslizou-se o relógio comparador sobre o silício até verificar a inclinação de $14\mu\text{m}$. A existência desta inclinação foi considerada mais que suficiente para realização de um corte em cunha, face às dimensões de corte em usinagem de ultraprecisão.

- b) Montagem do suporte na placa de vácuo da máquina ASG 2500 e medição da inclinação final para o corte em cunha: a base do suporte metálico possui um furo de centro onde se encaixa o pino de centro para fixação na placa de vácuo. Regulou-se o vácuo a 70kPa aproximadamente. Girando-se o conjunto e utilizando-se novamente o relógio comparador, ajustou-se a inclinação desejada para o corte em cunha de $7\mu\text{m}$ (Figura 3.6). A placa do eixo-árvore foi então fixada através de um dispositivo (placa metálica e parafusos) construído pelo Laboratório de Engenharia de Precisão (EESC-USP) de modo a garantir a rigidez do conjunto, para a realização do corte retilíneo (sem oscilações radiais) (Figura 3.7).

FIGURA 3.5 – Montagem para medição da inclinação no desempenho

FIGURA 3.6 – Montagem para medição da inclinação final com o suporte metálico fixado à placa através de vácuo.

3.3 A Retífica ASG 2500

A máquina-ferramenta utilizada no experimento foi a Geradora de Superfícies Anesféricas ASG 2500 (“Aspheric Surface Generator 2500”), da RANK PNEUMO (RANK TAYLOR ROBSON). Trata-se de uma máquina-ferramenta especialmente projetada tanto para a retificação como para o torneamento de ultraprecisão. Esta máquina possui uma base de ferro fundido, termicamente livre de tensões, a qual é isolada de vibrações externas através de isoladores pneumáticos passivos montados cinematicamente numa estrutura de aço soldada. Os mancais do eixo-árvore, tanto o eixo para rotacionar a peça quanto o da ferramenta, são aerostáticos, de modo a garantir precisão de giro, rigidez axial e radial compatíveis com o nível de precisão a que o equipamento se propõe (10 nm de precisão de posicionamento). Um Controle Numérico Computadorizado (CNC) ALLEN BRADLEY 8200 é utilizado para controlar

simultaneamente os deslocamentos dos eixos X e Z da máquina. Neste ponto, vale a pena ressaltar que não existe superposição dos eixos, com o objetivo de se evitar a propagação dos erros de posicionamento. As posições dos eixos são monitoradas por transdutores interferométricos a laser, da HEWLETT-PACKARD, com retroalimentação ao controlador. Os deslocamentos dos eixos são suportados por guias hidrostáticas. Também a fixação das peças a serem usinadas é especial, presas à placa através de vácuo (cerca de 70kPa), como pode ser visto na Figura 3.7.

FIGURA 3.7 – O suporte metálico com a amostra de silício fixado à placa do eixo-árvore através de vácuo e o dispositivo de fixação da placa.

Os mancais do eixo-árvore do cabeçote retificador também são aerostáticos e dinamicamente balanceados. O eixo-árvore é de aço inoxidável com revestimento de níquel para evitar corrosões. Está montado na posição vertical com a ponta para baixo fixada a uma carcaça

de metal “meehanite”. O cabeçote é montado sob o eixo X da máquina (Figura 3.8). A velocidade do eixo-árvore pode chegar a 10.000 RPM.

Outro acessório indispensável à máquina retificadora é o sistema de lubrificação do eixo-árvore e o de refrigeração da peça. O fluido lubrificante recomendado para o eixo é o Etileno Glicol anti-congelante misturado à água na proporção de 1:10. Já o fluido refrigerante recomendado para a peça é o “Challenge 600-HT” também misturado à água na proporção de 1:100.

FIGURA 3.8 – Cabeçote Retificador ASG 2500.

Para finalizar, a máquina-ferramenta está instalada em uma sala semi-limpa, com controle de temperatura ($20,0^{\circ}\text{C} \pm 0,1$) e umidade relativa de 55%, máximo.

3.4 A Ferramenta de Corte: Características Geométricas

Juntamente com mancais aerostáticos, elevada rigidez e controle ultrapreciso de posicionamento, o rebolo de diamante é uma ferramenta fundamental na usinagem de ultraprecisão, onde acabamentos superficiais de ordem nanométrica são freqüentes.

As características e propriedades do rebolo, bem como os tipos de materiais que podem ser usinados com este tipo de ferramenta e os tipos de desgastes existentes foram citados no item 2.2.

A ferramenta utilizada nos ensaios foi um SD800L50B-1/8 da PARSONS DIAMOND (ver sistema padrão para especificação de rebolos superabrasivos no item 2.2.3). Suas principais características geométricas estão listadas na Tabela 3.3.

TABELA 3.3 – Características geométricas da ferramenta de diamante SD800L50-1/8.

Ferramenta SD800L50-1/8	
Diâmetro (mm)	75
Espessura (mm)	3
Tipo de Abrasivo	“D” – Diamante
Tamanho do Grão Abrasivo	“800” – Muito fino
Grau	“L” – Dureza média
Profundidade do Grão Abrasivo (polegadas)	1/8

3.5 Análise do Acabamento e Integridade Superficial: Talystep, Microscopia Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Três técnicas de caracterização para a análise dos resultados foram utilizadas: perfilometria mecânica através do Talystep, Microscopia Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

O aparelho Talystep (fabricado pela RANK TAYLOR ROBSON), instalado no Laboratório de Engenharia de Precisão (EESC-USP), é um aparelho projetado especificamente para suprir as necessidades da indústria de micro-eletrônicos. Mede com elevada resolução espessuras de filmes depositados e também a micro-topografia de superfícies. Algumas especificações do aparelho estão na Tabela 3.4.

TABELA 3.4 – Especificações do Talystep.

Unidade de Medida	Valor
Comprimento transversal (mm)	± 1
Velocidade transversal (mm/s) – fonte 50Hz	0.1; 0.025 e 0.0025
fonte 60Hz	0.12; 0.03 e 0.0003
Magnificação	x50; x200 e x2000

A Figura 3.9 mostra o processo de medição da profundidade do sulco ao longo do corte realizado em uma amostra de silício, através do aparelho Talystep.

FIGURA 3.9 – Medição da profundidade do sulco através do Talystep.

A Microscopia Óptica foi realizada no aparelho AXIOTECH (fabricado pela ZEISS), pertencente ao Laboratório de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). O aparelho tem resolução de 400x.

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada no aparelho “Digital Scanning Microscope DSM 960” (fabricado pela ZEISS-WEST GERMANY), pertencente ao Instituto de Física de São Carlos (IFSC-USP). O Microscópio Eletrônico de Varredura é um dos instrumentos mais versáteis para a avaliação e análise das características microestruturais de objetos sólidos. As resoluções que se conseguem com aparelhos disponíveis comercialmente são da ordem de 2 a 5nm e em equipamentos avançados de pesquisa da ordem de 1nm (PAGOTTO, 1998).

A Microscopia Óptica e MEV foram realizadas no intuito de se observar a integridade superficial da superfície usinada, mostrando a existência ou não de trincas, possibilitando uma análise do tipo de remoção ocorrida (dúctil, dúctil/frágil, frágil).

Foram realizadas também indentações na amostra de silício, através do Indentador MICROMET 210 (fabricado pela BUEHLER), a fim de correlacionar as superfícies indentadas e usinadas com rebolo de diamante.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos com a retificação de ultraprecisão da amostra de silício. Estes resultados serão apresentados em forma de micrografias obtidas através de microscopia óptica, MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) e gráficos obtidos através de perfilometria mecânica.

As propriedades físicas do silício monocristalino (111) apresentadas na Tabela 3, permitirá, segundo BIFANO (1991) (item 2.6.1), calcularmos a profundidade de indentação crítica abaixo do qual a fratura frágil não ocorrerá.

Baseados nos dados desta tabela 3, onde a resistência do material à fratura varia de $0,6 \sim 0,9 \text{ Mpa m}^{1/2}$, com módulo de Young de $186,5 \text{ GPa}$ e dureza de 10 GPa , utilizando a equação 11, chegamos a uma faixa no qual a profundidade crítica na indentação varia de:

$$a_c = 0,01 \sim 0,0226 \mu\text{m}$$

Segundo CHEN (2000) (item 2.6.2), a profundidade crítica de corte, para que a transição frágil/dúctil ocorra, durante a retificação, é calculada através da equação 17 utilizando-se: $K_d = 30\% K_c$; $\lambda_0 = 1,0 \sim 1,6 \cdot 10^4$ e ângulo de topo do indentador de, $\alpha_0 = 136^\circ$.

Portanto,

$$a_{gc} = 0,017 \sim 0,0243 \mu\text{m}$$

Para um melhor entendimento da discussão dos resultados obtidos, um único parâmetro de corte foi variado durante a retificação tangencial de mergulho plana, que foi a profundidade de corte, mantendo-se V_s em 6000 rpm, V_w em zero e o avanço em 1 $\mu\text{m}/\text{rev}$. Este procedimento baseia-se no fato de que a taxas de avanço suficientemente pequenas, a usinagem ocorrerá no regime dúctil dependendo da profundidade de corte utilizada, como visto na referência bibliográfica (item 2.3).

A variação da profundidade de corte foi conseguida através da inclinação da amostra de um ângulo previamente determinado (inclinação de 7 μm). Com isso conseguiu-se avaliar a integridade superficial da amostra e os modos de remoção de material ao longo do sulco deixado pelo corte, que pode ser visto na Figura 4.1 (MEV).

FIGURA 4.1 – Vista da região do sulco obtido através da retificação a ser analisado(MEV).

Na Figura 4.2, marcas deixadas pela perfilometria mecânica (Talystep), realizada na amostra de silício, demarcam a região a ser estudada. Estas marcas foram feitas através da remoção de uma fina camada de ouro depositada na superfície do silício (procedimento

utilizado para realização da MEV) pela agulha do Talystep, permitindo a avaliação da integridade física da amostra ao longo do sulco.

FIGURA 4.2 – Regiões avaliadas ao longo do sulco (Microscopia Óptica, aumento de 100 X).

Nas regiões compreendidas entre os riscos 1 e 5, a profundidade de corte variou de: $a_g = 1,05 \sim 0,15 \mu\text{m}$, como mostra os diagramas das Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6.

FIGURA 4.3 – Diagrama correspondente à profundidade de corte de $1,05 \mu\text{m}$.

FIGURA 4.4 – Diagrama correspondente à profundidade de corte de 0,25 μm.

FIGURA 4.5 – Diagrama correspondente à profundidade de corte de 0,2 μm.

FIGURA 4.6 – Diagrama correspondente à profundidade de corte de 0,15 μm .

Nestas regiões, predominantemente, a remoção de material ocorreu de modo frágil. Isto pode ser possivelmente explicado pelo fenômeno de formação de trincas laterais, bem como trincas cônicas, no material. A formação e propagação de trincas médias e laterais subsuperficiais também podem ter provocado o lascamento do material, onde a espessura do cavaco não deformado pode ter sido maior que a profundidade de corte do grão, levando-se em consideração um único grão cortante. Os principais fatores que influenciam a iniciação e propagação destas trincas são as condições do rebolo, o tamanho dos grãos abrasivos do rebolo, a quantidade de carga aplicada e a pré-existência de falhas superficiais do material. Na MEV da Figura 4.7, que corresponde ao diagrama da Figura 4.3, notamos as regiões onde a fratura frágil ocorre e a formação de trincas.

FIGURA 4.7 – Região de fratura frágil e formação de trincas no material (MEV – aumento 5000x).

Seguindo-se a diminuição da profundidade de corte ao longo do sulco, a próxima região, compreendida entre os riscos 5 e 6, nos leva a profundidades de corte que variam de, $a_g = 0,05 \sim 0,03 \mu\text{m}$, que podem ser vistas nos diagramas das Figuras 4.8 e 4.9.

FIGURA 4.8 – Diagrama correspondente a profundidade de corte de $0,05 \mu\text{m}$.

FIGURA 4.9 – Diagrama correspondente à profundidade de corte de 0,03 μm .

Esta região, onde a profundidade de corte variou de 0,05 ~ 0,03 μm , o processo de remoção de material pode ter ocorrido por escoamento plástico e fratura frágil, porém a profundidades de corte tão pequenas o escoamento plástico é mais energeticamente favorável do que a fratura frágil. A MEV da Figura 4.10, que corresponde a essa região, não mostra claramente esta transição na remoção de material frágil/dúctil, porém na Figura 4.15 podemos notar esta transição de forma bem clara.

FIGURA 4.10 – Região de provável escoamento plástico e fratura frágil do material (MEV – aumento 5000x).

Seguindo-se o sulco até onde a profundidade de corte chega a zero, temos a região compreendida entre o risco 6 e o início do corte. Nesta região, a profundidade de corte varia de, $a_g = 0,01 \sim 0$, demonstradas nas Figuras 4.11 e 4.12.

FIGURA 4.11 – Diagrama correspondente à profundidade de corte de 0,01 μm .

FIGURA 4.12 – Diagrama correspondente à profundidade de corte de 0 μm .

Assim, as regiões onde as profundidades de corte foram menores que 0,01 μm , a remoção de material ocorreu predominantemente por escoamento plástico, como podemos notar na MEV da Figura 4.13. Porém este escoamento plástico pode ter ocorrido de três maneiras, devido a interação do grão abrasivo com a superfície da peça, que são: “Sliding”, onde a superfície sofreu uma modificação tipo “amassamento”; “Plowing”, onde houve um deslocamento de material; e o corte propriamente dito, onde o material foi removido em forma de cavaco.

FIGURA 4.13 – Região de remoção dúctil de material (MEV – aumento 5000x).

Para finalizar a análise da região do sulco estudado, as Figuras 4.14 e 4.15, respectivamente, mostram o diagrama das profundidades de corte ao longo do sulco e a região onde foi possível observar todos os modos de remoção de material. Esta região se encontra a aproximadamente 300 μm antes da primeira região a ser estudada (risco 1).

FIGURA 4.14 – Diagrama correspondente a MEV da Figura 4.1, onde a profundidade de corte varia de 0 a 0,55 μm aproximadamente.

FIGURA 4.15 – Região de transição dúctil/frágil (MEV – aumento 3000x).

Portanto, para as regiões estudadas, foram observados os três tipos de remoção de material ocorridos durante o corte. Para profundidades de corte variando de 0 a 0,01 μm observamos uma situação distinta de remoção de material totalmente dúctil. Aumentando-se a profundidade de corte, de 0,03 a 0,05 μm , uma transição dúctil/frágil foi observada, e para profundidades de corte maiores que 0,15 μm , a remoção de material foi totalmente frágil.

A faixa de valores experimental obtida para profundidades de corte, onde a remoção do silício através da retificação de ultraprecisão ocorre no regime dúctil, está bem próxima da simulação feita por CHEN (2000) nos testes de indentação, porém, a relação entre estes dados teóricos e experimentais é inviável devido ao fato de vários grãos do rebolo estarem agindo simultaneamente no corte.

O sulco formado pela ação do rebolo pode ser explicado pela pretuberância de um ou outro grão do rebolo agindo na peça em relação aos demais. Com o aumento da profundidade de corte, os demais passam também a agir sobre a peça.

Os resultados experimentais encontrados foram satisfatórios, apesar das condições iniciais da ferramenta, isto é, sua integridade física estar bastante comprometida devido, talvez, ao seu armazenamento e manuseio.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5.1 – Conclusões

A necessidade de componentes que possuam alta precisão de forma e acabamento em materiais frágeis pela indústria óptica e eletrônica vem despertando um grande interesse nas pesquisas dos processos de usinagem de ultraprecisão. Atualmente busca-se o aperfeiçoamento desta tecnologia para se conseguir produtos fabricados a partir de tais materiais com excelente qualidade e a custos menores. Para tanto, é necessário que este processo seja amplamente conhecido e dominado.

Desta forma, apresentou-se um estudo preliminar sobre o processo de remoção de material chamado retificação de ultraprecisão, no qual é utilizada uma ferramenta policortante (rebolo) de diamante para usinagem de materiais frágeis visando analisar a integridade física da amostra usinada.

Baseado nos resultados experimentais obtidos e nas etapas de análise do trabalho, as seguintes conclusões podem ser extraídas:

- Mantendo-se o avanço constante em $1\text{ }\mu\text{m/rev}$ e a velocidade do rebolo em 6000rpm variando-se apenas a profundidade de corte, a remoção de material ocorreu no regime dúctil para profundidades de corte variando até $0,01\text{ }\mu\text{m}$.

- Aumentando-se a profundidade de corte, obtém-se uma região crítica, onde a determinadas profundidades, 0,03 a 0,05 μm , a remoção de material passa por uma faixa de transição dúctil/frágil quando o aparecimento de trincas superficiais inicia-se.
- Profundidades de corte acima de 0,15 μm , o surgimento de trincas médias e laterais subsuperficiais podem ser facilmente notadas evidenciando uma remoção de material por fraturas frágeis.

Na retificação de ultraprecisão, a remoção de material ocorre através da soma de deformações microscópicas ou fratura no ponto onde um grão abrasivo está agindo num determinado instante. Contudo, para um processo onde vários grãos agem simultaneamente no corte, limitar-se apenas a essas interações abrasivos/peça não se estará estudando o processo apropriadamente. Por isso, é necessário e importante que os outros aspectos do sistema de retificação também sejam adequadamente analisados e estudados, como a força agindo em cada grão, o tamanho do grão abrasivo e a espessura do grão.

A usinagem de ultraprecisão, em especial a retificação com rebolos de diamante, é uma técnica ainda pouco explorada no Brasil. A carência de resultados e a falta de centros de pesquisa nesta área são um grande desafio para pesquisadores e fabricantes que buscam urgentemente sanar a falta de conhecimento deste processo e alcançar melhores resultados que trarão muitos frutos à ciência e a indústria de processos de fabricação.

5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Algumas sugestões para trabalhos futuros que possam vir a complementar o tema serão apresentadas abaixo:

- Utilizar a variação de mais parâmetros de corte como avanço, forças agindo no processo e velocidade do rebolo;
- Avaliar a influência destes parâmetros de corte na rugosidade superficial da amostra;
- Utilizar outras técnicas para avaliação da integridade superficial e subsuperficial da amostra, tais como, Microscopia de Força Atômica;
- Utilizar outras técnicas para avaliação superficial da amostra como a perfilometria mecânica através do Talysurf (medir rugosidade superficial da amostra);
- Comparar os resultados obtidos com resultados de torneamento de ultraprecisão;
- Utilizar técnicas de monitoramento do processo, tais como, EA (Emissão Acústica) já utilizada para o torneamento de ultraprecisão;
- Utilizar outros tipos de materiais frágeis na retificação de ultraprecisão;
- Analisar a influência do desgaste da ferramenta de diamante (rebolo) durante o processo de retificação bem como técnicas de dressagem do mesmo.

BIBLIOGRAFIA

6.1 Bibliografia citada

BIFANO, T.G.; DOW, T.A.; SCATTERGOOD, R.O. (1987). Ductile-regime grinding of brittle materials. *UPT – Ultraprecision Technology* – Springer – Verlag, Braunschweig, p22-40.

BIFANO, T.G.; DOW, T.A.; SCATTERGOOD, R.O. (1991). Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials. *Journal of Engineering for Industry*, Transactions of the ASME, v.113, p.184-189.

BIFANO, T.G.; KRISHNAMOORTHY, R.; FAWCETT, H.; WELCH, E. (1999). Fixed-load electrolytic dressing with bronze bonded grinding wheels. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Transactions of the ASME, v.121, n.1, p.20-27.

BLAKE, P.N.; SCATTERGOOD, R.O. (1990). Ductile-regime machining of germanium and silicon. *Journal of the American Ceramic Society*, v.73, n.4, p.949-957.

CHAO, C.L. (1991). Investigation of the machine glasses and other normally brittle materials in the ductile regime. *PhD Thesis*, Cranfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science, 203p.

- DORNFELD, D.A. (1994). In process recognition of cutting states. *JSME International Journals, Series C*, v.37, n.4, p.638-650.
- DOW, T.A.; MILLER, M.; FALTER, P. (1991). Application of a fast tool servo for diamond turning of non-rotationally symmetric surfaces. *Precision Engineering*, v.13, n.4, p.243-249.
- DUDUCH, J.G. (1993). Some critical aspects of Machine design and performance for the machining of brittle materials. *PhD Thesis*, Granfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science, 168p.
- EUN-SANG LEE & JEONG-DU KIM. (1997). A study on the analysis of grinding mechanism and developing of dressing system by using optimum in-process electrolytic dressing. *International Journal of Machining Tools and Manufacturing*, v.37, n.12, p1673-1689.
- HAUSSI, A.; DINIZ, A.E.; OLIVEIRA, J.F.G.; GOMES, J.J.F. (1998). Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission. *Wear*, v.217, p.7-14.
- INASAKI, I. (1987). Grinding of hard and brittle materials. *Annals of the CIRP*, v.36, n.2, p.463-471.

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

JASINEVICIUS, R.G. (2000). Resultados não publicados. Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

KOMANDURI, R.; LUCCA, D.A.; TANI, Y. (1997). Technological advances in fine abrasives process. *Annals of the CIRP*, v.46, n.2, p.545-596.

LAWN, B.R. & WILSHAW, R. (1975). Review indentation fracture: principles and applications. *Journal of Materials Science*, v.10, p.1049-1081.

LAWN, B.R. & SWAIN, M.V. (1975). Microfracture beneath point indentations in brittle solids. *Journal of Material Science*, v.10, p.113-122.

LAWN, B.R.; JENSEN, T.; AURORA, A. (1976). Brittleness as a function of indentation size effect. *Journal of Materials Science Letters*, v.11, p.575.

LEITCHER, S. (1975). A escolha de abrasivos favoráveis para a fabricação. Tradução da firma Robert Bosch, Campinas. *Technische Mitteilungen*, v.68, n.7-8.

LIAO, T.W.; LI, K.; McSPADDEN, S.B.; O'ROURKE, L.J. (1997). Wear of diamond wheels in creep-feed grinding of ceramic materials: I Mechanisms. *Wear*, v.211, p.94-103.

- MALKIN, S. (1989). Grinding technology: theory and application of machining with abrasives. *Ellis Horwood Limited*, Chichester, 275p.
- MALKIN, S.; HWANG, T.W. (1996). Grinding mechanisms for ceramics. *Annals of the CIRP*, v.45, n.2, p.569-580.
- MARSHALL, D.B. & LAWN, B.R. (1986). Indentation of brittle materials. *Microindentation Techniques in Materials Science and Engineering*, ASTM, Philadelphia, p.26-46.
- McKEOWN, P.A. (1987). The role of precision engineering in manufacturing of the future. *Annals of the CIRP*, v.36, n.2, p.495-501.
- MILLER, M.H. & DOW, T.A. (1999). Influence of the grinding wheel in the ductile grinding of brittle materials: development and verification of kinematic based model. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Transactions of the ASME, v.121, n.4, p.638-646.
- MINGJUN CHEN; DAN LI; FEIHU ZHANG; QINGLIANG ZHAO. (2000). Study of critical value of brittle-ductile transition in ultraprecision grinding of brittle materials. *European society for precision engineering and nanotechnology*, Proceedings of the First Euspen Conference on Fabrication and Metrology in Nanotechnology, v.2, p.432-439.

- OHMORI, H.; NAKAGAWA, T. (1995). Analysis of mirror surface generation of hard and brittle materials by ELID (Electronic in-process dressing) Grinding with superfine grain metallic bond wheels. *Annals of the CIRP*, v.44, n.1, p.287-290.
- OLIVEIRA, J.F.G. (1998). Análise da ação do macroefeito de dressagem de rebolos no desempenho do processo de retificação. *Tese (Doutorado)*, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 272p.
- PAGOTTO, C.R. (1998). Análise do processo de torneamento do silício policristalino. *Dissertação (Mestrado)*, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 100p.
- PUTTICK, K.E.; HOSSEINI, M.M. (1980). Fracture by a pointed indenter on near (111) silicon. *Journal of Physics*, v.13, p.875-880.
- SALMON, S.C. (1992). Modern grinding process technology. *McGraw-Hill*, Boston, 225p.
- SCATTERGOOD, R.O.; SRINIVASAN, S.; BIFANO, T.G. (1986). R-curve effects for machining and wear of ceramics. *7th International Symposium on Ceramics*, Bologna, Italy.
- SHAW, M.C. (1972). Fundamentals of Grinding, new developments in: II Grinding. *Proceedings of the International Grinding Conference*, Pittsburgh, PA.

SHAW, M.C. (1995). Precision finishing. *Annals of the CIRP*, v.44, n.1, p343-348.

SILVA, H.A.T. (1999). Análise do comportamento da emissão acústica durante o torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis. *Dissertação (Mestrado)*, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 115p.

SINHOFF, V. (1998). Generative precision grinding of optical glass. *Annals of the CIRP*, v.47, n.1, p.253-258.

SUBRAMANIAN, K. (1988). Precision finishing of ceramic components with diamond abrasives. *Ceramic Bulletin*, v.67, n.6, p1026-1029.

SUBRAMANIAN, K. (1997). Mechanisms of material removal in the precision production grinding of ceramics. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v.119, n.4(A), p.509-519.

TANIGUSHI, N. (1983). Current status in, and future trends of, ultraprecision machining and ultrafine materials processing. *Annals of the CIRP*, v.32, n.2, p.573-582.

TANIGUSHI, N. (1992). Future trends of nanotechnology. *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, v.26, n.1, p.1-7.

ZANOTTO, E.D. & MIGLIORE JR, A.R. (1991) Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: uma introdução. *Cerâmica*, v.37, n.247, p.7-16.

ZARUDI, I. & ZHANG, L.C. (1996). Subsurface damage in single-crystal silicon due to grinding and polishing. *Journal of Materials Science Letters*, v.15, n.7, p.586-587.

ZARUDI, I. & ZHANG, L.C. (1998). Effect of ultraprecision grinding on the microstructural change in silicon monocrystals. *Journal of Materials Processing Technology*, v.84, n.1-3, p.149-158.

6.2 Bibliografía consultada

BIFANO, T.G.; FAWCETT, S.C. (1991). Specific grinding energy as an in-process control variable for ductile-regime grinding. *Precision Engineering*, v.13, n.4, p.256-262.

EDA, H.; ZHOU, L.; NAKANO, H.; et al. (2001). Development of single step grinding system for large scale phi 300 Si wafer: A total integrated fixed-abrasive solution. *Annals of the CIRP*, v.50, n.1, p.225-228.

HUERTA, M.; MALKIN, S. (1976). Grinding of glass: the mechanisms of the process. *Journal of Engineering for Industry*, v.98, n.2, p.459-467.

- JEONG-DU KIM & EUN-SANG LEE. (1996). A study on the mirror-like grinding of MgO single crystal with various diamond wheels. *Journal of Materials Processing Technology*, v.72, n.1, p.1-10.
- LIN, H.Y.; CHU, J.L.; LEE, S. (2001). The brittle to ductile transition of single crystal materials – An indentation model. *Journal of Material Science*, v.36, n.15, p.3769-3775.
- PEI, Z.J.; STRASBAUGH, A. (2001). Fine grinding of silicon wafers. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, v.41, n.5, p.659-672.
- PORTO, A.J.V. (1995). Diagnóstico do processo de fabricação da operação de torneamento de face de ultraprecisão em cobre e ligas de alumínio. *Tese de Livre Docência*, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.
- RUBIO, J.C.C. (2000). Projeto, Construção e Avaliação de Microposicionadores para Usinagem de Ultraprecisão. *Tese (Doutorado)*, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 259p.
- SREEJITH, P.S.; UDUPA, G.; NOOR, Y.B.M. (2001). Recent advances in machining of silicon wafers for semiconductor applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.17, n.3, p.157-162.
- TÖNSHOFF, H.K.; SCHMIEDEN, W.V.; INASAKI, I.; KÖNIG, W.; SPUR, G.; (1990). Abrasive machining of silicon. *Annals of the CIRP*, v.39, n.2, p.621-635.

ZHANG, C.H.; OHMORI, H.; KATO, T.; et al. (2001). Evaluation of surface characteristics of ground CVD-SiC using cast iron bond diamond wheels. *Precision Engineering*, v.25, n.1, p.56-62.