

# ANÁLISE DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DO SILÍCIO POLICRISTALINO

CARLOS RENATO PAGOTTO



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

DEDALUS - Acervo - EESC



31100036026

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jaime  
Gilberto Duduch

São Carlos  
1998

Class.	TESE/EESC
Curt.	4151
Tombo	0256198

3110003 b 026

At 0999163

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

P139a Pagotto, Carlos Renato  
Análise do processo de torneamento do silício policristalino / Carlos Renato Pagotto. -- São Carlos, 1998.

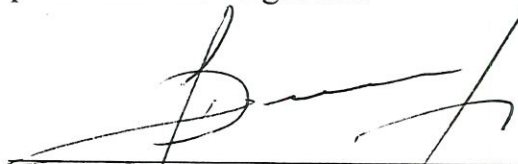
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.  
Área: Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch.

1. Torneamento com diamante. 2. Silício policristalino. 3. Infra - vermelho. 4. Lentes anesféricas. I. Título.

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

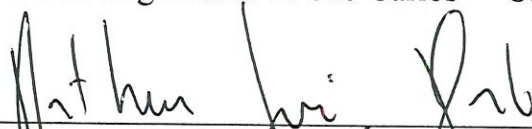
Candidato: Engenheiro **CARLOS RENATO PAGOTTO**

Dissertação defendida e aprovada em 03.09.1998  
pela Comissão Julgadora:



---

Prof. Dr. **JAIME GILBERTO DUDUCH (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Assoc. **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



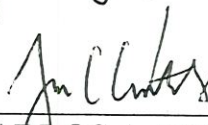
---

Prof. Dr. **LUIZ GONÇALVES NETO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**  
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



---

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

---

## DEDICATÓRIA

**Este trabalho é dedicado à minha mãe Shirley,  
meus irmãos Daniela e Alexandre e a meus avós  
paternos e maternos pelo carinho.**

*A meu pai...*

---

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch pela orientação, dedicação e amizade nesses anos de mestrado.

Ao Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto pelas sugestões quanto à definição dos objetivos a serem atingidos.

Ao colega Renato Goulart Jasinevicius pelas sugestões apresentadas.

Ao técnico Deivid Luiz da Silva pela ajuda na preparação do trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Engenharia de Precisão pelo apoio e convivência diária durante a realização desse trabalho.

A todos os funcionários e colegas do Departamento de Engenharia Mecânica.

À minha família e a meus amigos que sempre estiveram ao meu lado nas horas boas e difíceis deste meu caminho.

A CNPQ, por ter custeado esses anos de estudos e pesquisa.

**A Deus.**

---

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	vi
➔ RESUMO.....	viii
<i>ABSTRACT</i> .....	ix
➔ 1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo.....	4
➔ 2 USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO - REVISÃO.....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Processos de usinagem abrasiva de materiais frágeis.....	6
2.2.1 Lapidação.....	6
2.2.2 Polimento.....	10
2.2.3 Retificação.....	11
2.3 Indentação.....	15
2.4 Riscamento.....	21
2.5 Torneamento de materiais frágeis com ferramenta de diamante.....	27
2.5.1 A ferramenta de ponta única de diamante.....	28
2.5.2 O torno de ultraprecisão ASG2500.....	30
2.5.3 Formação de cavaco.....	31
2.5.4 Transição dúctil-frágil.....	32
2.5.5 Modelo de torneamento de materiais frágeis (Blake,1988).....	34
2.5.6 Modelo de Blackley(1991).....	41
2.6 Conclusão.....	44
3 METODOLOGIA PARA OS ENSAIOS.....	46
3.1 Planejamento dos ensaios.....	46
3.1.1 Material.....	46
3.1.2 Preparação da amostra de silício policristalino.....	48

---

3.1.3 Ferramenta de corte e máquina - ferramenta .....	49
3.2 Procedimento experimental.....	51
3.3 Propriedades dos materiais frágeis.....	52
3.3.1 Resistência Mecânica.....	52
3.4 Análise da topografia e acabamento superficial.....	56
3.4.1 Form Talysurf.....	57
3.4.2 Interferômetro a laser.....	62
3.5 Integridade superficial e subsuperficial.....	64
3.5.1 Microscópio Eletrônico de Varredura.....	64
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
4.1 Análise de crateras remanescentes.....	68
4.2 Análise da superfície.....	70
4.3 Análise da rugosidade.....	79
4.4 Discussões.....	84
5 CONCLUSÃO.....	87
5.1 Sugestão para trabalhos futuros.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
APÊNDICE	

---

## LISTA DE FIGURAS

	página
FIGURA 2.1 - Faixas de exatidão em usinagem de ultraprecisão .....	5
FIGURA 2.2 - Modelo simplificado do processo de lapidação .....	7
FIGURA 2.3 - Máquina de polimento .....	11
FIGURA 2.4 - Modelo esquemático de formação de cavaco em retificação de materiais frágeis .....	12
FIGURA 2.5 - Distribuição de pressão do contato elástico para vários tipos de indentadores .....	16
FIGURA 2.6 - Modelo para o problema de indentação elástico - plástica .....	23
FIGURA 2.7 - Esquema de formação de trincas sobre o ponto de indentação .....	19
FIGURA 2.8 - Imagem do M.E.V. que mostra a formação de sulcos em ensaio de riscamento em silício monocristalino .....	27
FIGURA 2.9 - Algumas trincas padrão produzidas no riscamento de materiais frágeis com uma carga vertical de 25 gramas .....	28
FIGURA 2.10 - Micrografia do M.E.V. mostrando a transição dúctil - frágil produzida no riscamento de "vidro verde" com uma carga vertical de 90 gramas .....	24
FIGURA 2.11 - Cavacos em forma de arco com marcas visíveis de cisalhamento no lado de trás .....	26
FIGURA 2.12 - Geometria da ferramenta de diamante com ponta arredondada .....	28
FIGURA 2.13 - Geometria de usinagem para corte ortogonal .....	34
FIGURA 2.14 - Geometria de corte para o torneamento com ferramenta com ponta arredondada .....	35
FIGURA 2.15 - Geometria de corte vista num plano normal à direção de corte .....	36
FIGURA 2.16 - Vista em verdadeira escala da seção transversal do cavaco da	



---

figura 2.14 .....	37
FIGURA 2.17 - Modelo para usinagem no regime dúctil .....	38
FIGURA 2.18 - Vista lateral do modelo mostrado na figura 2.17 .....	40
FIGURA 3.1- Microscopia Eletrônica de Varredura da bolacha de silício policristalino em sua forma a) serrada , 200x e b) polida, 200x .....	47
FIGURA 3.2 - Croqui do dispositivo de fixação da peça. ....	48
FIGURA 3.3 - Gráfico em 3D mostrando o desvio de forma da bolacha de silício policristalino .....	49
FIGURA 3.4 - Torno de ultraprecisão ASG 2500 Rank Pneumo do laboratório de engenharia de precisão da escola de engenharia de São Carlos .....	50
FIGURA 3.5 - Curva de tensão x deformação para materiais frágeis e dúcteis .....	53
FIGURA 3.6 - Componentes de um rugosímetro .....	58
FIGURA 3.7 - Impossibilidade de penetração do apalpador em vales estreitos .....	59
FIGURA 3.8 - Impossibilidade de penetração do apalpador em reentrâncias .....	59
FIGURA 3.9 - Interferômetro de Fuzeau .....	63
FIGURA 3.10 - Esquema de um equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura.....	67
FIGURA 4.1 - Microscopia eletrônica de varredura (M.E.V.) da superfície serrada da bolacha de silício policristalino .....	69
FIGURA 4.2 - Microscopia da bolacha de silício policristalino onde percebe-se que as trincas residuais não foram retiradas, pois a profundidade de corte é inferior à profundidade de crateras remanescentes .....	69
FIGURA 4.3 - Micrografia mostrando a região do ombro produzido durante o ensaio de corte interrompido .....	70
FIGURA 4.4 - A figura mostra foto em duas partes: a) região do ombro não cortado, 500x e b) micrografia dupla que mostra detalhe da região não usinada (1) e da região usinada (2). 1000x; $f = 10\mu\text{m}/\text{rev.}$ , $d = 10\mu\text{m}$ , $R=1,13\text{mm}$ .....	71
FIGURA 4.5 - Usinabilidade do silício policristalino com $f=7,0\mu\text{m}/\text{rev.}$ , $d=10\mu\text{m}$ ,	

a)500x e b) 1000x .....	72
FIGURA 4.6 - Usinabilidade do silício policristalino com $f = 5,0\mu\text{m}/\text{revolução}$ , $d = 10\mu\text{m}$ , $R = 1,13\text{mm}$ , a)500x e b)1000x .....	73
FIGURA 4.7 - Usinabilidade do silício policristalino com $f=4,5\mu\text{m}/\text{rev}$ , $d=10\mu\text{m}$ , $R = 1,13\text{mm}$ , a) 500x e b) 1000x .....	74
FIGURA 4.8 - A figura mostra a superfície usinada do silício policristalino com $f = 4,0\mu\text{m}/\text{revolução}$ , $d=10\mu\text{m}$ , $R=1,13\text{mm}$ , a)500x e b)1000x .....	75
FIGURA 4.9 - Superfície do silício policristalino com $f=3,5\mu\text{m}/\text{rev.}$ , $d=10\mu\text{m}$ , $R=1,13\text{mm}$ , a) 500x e b) 1000x .....	76
FIGURA 4.10 - Superfície usinada do silício policristalino com $f = 3,0 \mu\text{m}/\text{rev}$ , $d = 10\mu\text{m}$ , $R = 1,13\text{mm}$ , a)500x e b)1000x .....	77
FIGURA 4.11 - Superfície do silício policristalino com $f = 2,5 \mu\text{m}/\text{rev}$ , $d = 10\mu\text{m}$ , $R = 1,13\text{mm}$ , a) 500x e b) 1000x .....	78
FIGURA 4.12 - Figura que mostra a escada feita na formação dos ombros. Cada degrau apresenta $10\mu\text{m}$ que é o valor da profundidade de corte usada nos ensaios. ....	79
FIGURA 4.13 - Perfil da rugosidade do silício policristalino; $f = 10 \mu\text{m}/\text{revolução}$ , $d = 10\mu\text{m}$ , $R = 1,16\text{mm}$ , $R_a = 39,8\text{nm}$ .....	80
FIGURA 4.14 - Perfil da rugosidade do silício policristalino; $f = 7,0\mu\text{m}/\text{revolução}$ , $d = 10\mu\text{m}$ , $R = 1,16\text{mm}$ , $R_a = 30,5\text{nm}$ .....	80
FIGURA 4.15 - Perfil da rugosidade no silício policristalino; $f = 5,0\mu\text{m}/\text{revolução}$ , $d = 10\mu\text{m}$ , $R = 1,16\text{mm}$ , $R_a = 31,1\text{nm}$ .....	81
FIGURA 4.16 - Perfil da rugosidade para o silício policristalino; $f = 4,5 \mu\text{m}/\text{rev}$ , $d = 10\mu\text{m}$ , $R = 1,16\text{mm}$ , $R_a = 11,7\text{nm}$ .....	81
FIGURA 4.17 - Perfil da rugosidade para o silício policristalino; $f = 4,0\mu\text{m}/\text{rev}$ , $d = 10\mu\text{m}$ , $R = 1,16\text{mm}$ , $R_a = 13,7\mu\text{m}$ .....	82
FIGURA 4.18 - Perfil da rugosidade para o silício policristalino; $f = 3,5\mu\text{m}/\text{rev}$ , $d = 10\mu\text{m}$ , $R = 1,16\text{mm}$ , $R_a = 13,9\text{nm}$ .....	82
FIGURA 4.19 - Perfil da rugosidade para o silício policristalino; $f = 3,0\mu\text{m}/\text{rev}$ , $d = 10\mu\text{m}$ , $R = 1,16\text{mm}$ , $R_a = 13,8\text{nm}$ .....	83

---

FIGURA 4.20 - Perfil da rugosidade do silício policristalino;  $f = 2,5\mu\text{m}/\text{revolução}$ ,  
 $d = 10\mu\text{m}$ ,  $R = 1,16\text{mm}$ ,  $R_a = 21,7\text{nm}$  .....83

---

## LISTA DE TABELAS

	página
TABELA 1.1 - Materiais usináveis em processos de ultraprecisão .....	2
TABELA 3.1 - Dados da ferramenta de diamante .....	49
TABELA 3.2 - Condições de corte da bolacha de silício policristalino .....	51
TABELA 3.3 - Alguns parâmetros que influenciam as propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos .....	55
TABELA 3.4 - Exemplos de aplicação da rugosidade $R_a$ .....	61

---

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CNC	- Computer Numerical Control
HP	- Hewlett Packard
MEV	- Microscópio Eletrônico de Varredura
3D	- Três Dimensões
AD	- Analógico e Digital
seg.	- Segundo
$Al_2O_3$	- Alumina
$ZrO_2$	- Óxido de Zircônio
Si	- Silício
Ge	- Germânio
$\mu m$	- Micrometro
mm	- Milímetro
nm	- Nanometro
V	- Velocidade de polimento
Kpa	- Kilo Pascal
P	- Pressão de contato elástico
a	- extensão do contato na indentação
$t_c$	- espessura crítica de corte
$\psi$	- constante dependente da geometria do indentador
E	- módulo de Young
H	- dureza Vickers
$K_c$	- resistência à fratura
seg	- segundos
$r_e$ ou R-	raio de ponta da ferramenta de diamante
b	- largura da aresta cortante
$\alpha_1$	- ângulo de folga
$\gamma$	- ângulo de saída
$R_a$	- rugosidade superficial

---

$P_c$	- carga crítica do indentador de diamante
$\Omega$	- função de E/H
d	- profundidade de corte nominal
f	- avanço
$t_{ef}$	- espessura crítica de corte efetiva
$\theta$	- posição angular da profundidade crítica de corte efetiva
$t_m$	- espessura máxima de corte
W	- largura do cavaco
$\theta$	- posição angular máxima
$y_c$	- profundidade da zona danificada no corte
z	- linha de transição de danos
$K_{m\acute{a}x}$	- fator intensidade de tensão máximo
$z_{ef}$	- localização da transição dúctil/frágil
$f_{m\acute{a}x}$	- avanço máximo
$\phi$	- diâmetro
°	- indicador de grau
rev	- revolução
°C	- grau Celsius
MP <sub>a</sub>	- megaPascal
m/m	- metro por metro
$\sigma$	- tensão normal
$\varepsilon$	- grau de deformação do material
$\tau$	- tensão de cisalhamento
$\gamma'$	- deformação de cisalhamento do material
G	- módulo de elasticidade no cisalhamento
$\nu$	- coeficiente de Poisson
$\Delta_d/d$	- variação na espessura do material
$\Delta_l/l$	- variação no comprimento do material
$y_i$	- pontos discretos ao longo do perfil da peça
KV	- kiloVolts

## RESUMO

PAGOTTO, C.R. (1998) Análise do processo de torneamento do silício policristalino. São Carlos, 1998. 93p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A produção de superfícies com qualidade óptica usando-se máquina-ferramenta de ultraprecisão é uma tecnologia que cresce a cada dia. Essa evolução vem da necessidade de se produzirem elementos ópticos com forma complexa (anesféricas) para a redução do número de componentes em sistemas ópticos. Uma única lente anesférica pode substituir várias esféricas com maior eficiência. A obtenção de elementos anesféricos através de técnicas convencionais (lapidação e polimento) é, entretanto, praticamente artesanal com pouca chance de se tornarem processos automatizados e com alta repetibilidade (determinismo). Entretanto, materiais frágeis como as cerâmicas, vidros e cristais são difíceis de serem usinados devido à sua baixa resistência à fratura. Não convencionais, as máquinas-ferramenta de alta precisão são usadas para controlar os parâmetros de usinagem e produzir o que tem sido chamado de usinagem em "regime dúctil". Neste regime, é obtida uma superfície com excelente qualidade óptica livre de microfraturas.

Neste trabalho será estudado o torneamento de silício policristalino com ferramenta de diamante como opção viável à produção de lentes anesféricas com alta qualidade óptica para utilização no espectro infra - vermelho (Além disso, este processo traz uma diminuição no tempo de produção, trazendo vantagens econômicas à manufatura desse produto).

Palavras-chave: torneamento com diamante, silício policristalino, infra - vermelho, lentes anesféricas.

## ABSTRACT

PAGOTTO, C.R. (1998). Single point diamond turning of polycrystalline silicon. São Carlos, 1998. 93p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

The single point diamond turning of optical surfaces has evolved into a significant technology. This comes from the requirements for complex form (aspheric) optical elements for the reduction of the number of components in optical systems. A single aspheric lens can replace several spheric lenses more efficiently. The fabrication of aspheric elements through conventional techniques (lapping and polishing) are, however, hardly recommended since they have few chances of becoming deterministic processes, not allowing automation and yielding high repeatability. On the other hand, brittle materials such as ceramics, glasses, crystals are difficult to machine due to their low fracture strength. Ultraprecision machine tools are able to control cutting conditions so as to permit ductile - regime machining. In this regime, high quality, crack - free, optical surfaces can be obtained.

In this work, the diamond turning of polycrystalline silicon is studied as a viable option for the production of aspheric lenses for the infrared spectrum.

The main purpose of this work is to study the cutting condition of polycrystalline silicon so as to obtain support for establishing a manufacturing process from a diamond sawn surface to the finished (mirrored) surface, using diamond turning technique.

Keywords: turning, silicon polycrystalline, infrared , aspheric lenses



---

# Capítulo 1

## Introdução

O estudo da usinagem de ultraprecisão de materiais frágeis vem da necessidade de se produzirem produtos economicamente viáveis e com alta qualidade de superfície e forma. Materiais frágeis podem ser definidos como sólidos com ligações covalentes/iônicas susceptíveis a danos superficiais e sub-superficiais devido a concentrações localizadas de tensão quando em contato com objetos afiados e duros, tais como uma ferramenta de diamante durante um processo de usinagem.

Nos últimos anos o desenvolvimento da tecnologia de novos materiais com estruturas cristalinas complexas e alta dureza requer técnicas de corte altamente eficientes, já que estes materiais são mais difíceis de usinar do que os tradicionais.

O campo de aplicação da usinagem com diamante monocristalino pode ser dividido em três segmentos: a fabricação de elementos ópticos reflexivos (como espelhos de alto desempenho para sistemas Laser), de elementos ópticos transmissivos e componentes mecânicos.

Um exemplo da necessidade deste estudo é a indústria eletro-eletrônica. Semicondutores tipicamente duros e frágeis são o silício e o germânio. O silício constitui 90% de todos os materiais semicondutores. O impacto da manufatura do silício puro é ilustrado por estatísticas que mostram que a produção, em 1993, de 3 bilhões de dólares resultaram em 780 bilhões de dólares no comércio de dispositivos e equipamentos eletrônicos. Para 1997 o comércio de dispositivos e equipamentos eletrônicos podem chegar facilmente na marca de 1 trilhão de dólares. Além do

aumento em quantidade, os requisitos de qualidade também aumentaram (VENKATESHI et al, 1995).

Na tabela 1.1 são mostrados alguns materiais usináveis com ferramenta de diamante e suas respectivas aplicações.

TABELA 1.1 Materiais usináveis em processos de ultraprecisão

	<b>Campo de aplicação</b>	<b>Materiais</b>	<b>Especificação</b>
<b>Óptica de reflexão</b>	Espelhos poligonais para - impressoras <i>laser</i> - máquinas copiadoras - fotografias terra-ar  Espelhos metálicos para aplicação <i>laser</i> - <i>planos</i> - <i>parabólicos</i> - <i>integrador de feixe</i>	- Alumínio - Cobre - Latão - Ouro - Níquel - Molibidênio	- Refletividade 98% - Exatidão de forma 0,2-0,01 $\mu$ m - Rugosidade Ra 0,005 $\mu$ m
<b>Óptica de transmissão</b>	- Lentes de Fresnel - Lentes para fotocélulas - Lentes para foco <i>laser</i> - Óptica p/ cd players	- Plásticos ópticos - Silício - GaAs - ZnSe - ZnS - Germânio	- Exatidão de forma 0,2-0,5 $\mu$ m

---

Alguns exemplos de aplicação dessa tecnologia bastante conhecidos são os cilindros para fotocopiadoras, discos magnéticos para computadores, espelhos poligonais para impressoras, espelhos para raio-X, cabeçotes magnéticos para vídeos, giroscópios e lentes para o espectro infravermelho (SCHROETER, 1997).

Os anos 90 são caracterizados pelo domínio da tecnologia de usinagem de elementos ópticos transmissivos em materiais de comportamento frágil, a fabricação de elementos ópticos para pequenos comprimentos de onda e a produção de micro-peças. O Silício (Si) e o Germânio (Ge) são exemplos desses materiais. Tais materiais têm aplicação cada vez maior na produção de elementos ópticos de alta precisão transmissivos no espectro infravermelho, Lentes para Células Solares e Lentes Fresnel.

Neste trabalho será mostrado que o torneamento com ferramenta de diamante monocristalino de certos materiais frágeis é uma opção viável à produção de superfícies especulares (esféricas e anesféricas) como uma alternativa ao uso dos processos tradicionais como a lapidação, o polimento e a retificação.

A produção de superfícies especulares em materiais frágeis usando-se máquina ferramenta de ultraprecisão é uma tecnologia que cresce a cada dia. Entretanto, materiais frágeis como as cerâmicas, os vidros e cristais são difíceis de serem usinados devido à sua baixa resistência à fratura. Não convencionais, as máquinas ferramenta de alta precisão são usadas para controlar os parâmetros de usinagem e produzir o que tem sido chamado de usinagem em "regime dúctil". Neste regime, é obtida uma superfície com excelente qualidade óptica livre de microfraturas (BLACK & SCATTERGOOD, 1990). O torneamento de materiais frágeis com ferramenta de ponta única de diamante no regime dúctil tem recebido, nos últimos anos, grande atenção dos pesquisadores de todo o mundo, pois este processo traz uma certa diminuição no tempo de produção, trazendo vantagens econômicas à manufatura desses produtos (PURQUERIO et al, 1994).

Para isso, no capítulo de Revisão será mostrado, em detalhes, cada processo acima citado para que se possa apresentar quais são as **vantagens e desvantagens**

desses processos (lapidação, retificação e polimento) em relação ao torneamento de ultraprecisão.

O torneamento com ferramenta de diamante monocristalino será discutido de maneira detalhada, bem como mecanismos de remoção de material, dados sobre a ferramenta a ser utilizada, o torno utilizado na experimentação e finalmente será apresentado um modelo de corte de torneamento utilizado na parte experimental do trabalho.

De posse destas informações explicadas item a item, será apresentada uma metodologia para os ensaios de torneamento de silício policristalino com ferramenta de ponta única de diamante, resultados obtidos e discussões.

## **1.1 Objetivo**

Estudar a usinabilidade do silício policristalino e, determinar experimentalmente a transição frágil-dúctil para o torneamento de ultraprecisão desse material, comparando com os limites estabelecidos para o silício monocristalino.

Este estudo fornecerá subsídios para se estabelecer, numa análise futura, um processo de fabricação desde a superfície serrada em disco diamantado até o espelhamento com ferramenta de ponta única de diamante. Os parâmetros de usinagem das etapas de desbaste e acabamento deverão estar fundamentadas nos princípios de modelos de corte apresentados por diversos autores, mecanismos de remoção de material e interação ferramenta - peça.

## Capítulo 2

### Usinagem de Ultraprecisão - Revisão

#### 2.1 Introdução

Vários pesquisadores tentaram definir a usinagem de ultraprecisão. Segundo TANIGUSHI (1993), a usinagem de ultraprecisão é o processo de usinagem com o qual são ou foram atingidas as maiores precisões dimensionais em um determinado período de tempo.

A figura 2.1 mostra o desenvolvimento na exatidão de usinagem nos últimos 70 anos.

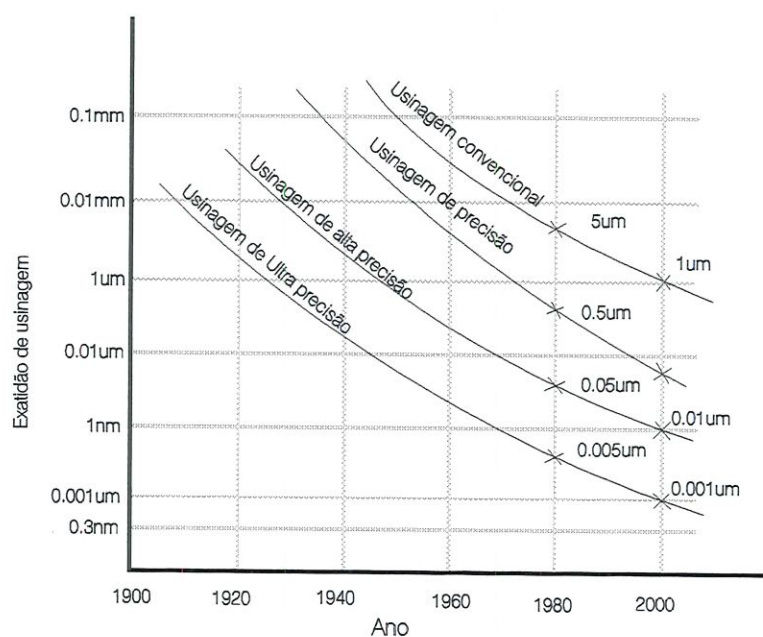


FIGURA 2.1 Faixas de exatidão em usinagem de ultraprecisão (TANIGUSHI, 1983)

Na usinagem de ultraprecisão é possível se alcançar rugosidades na ordem de 1nm; daí o termo “nanotecnologia”.

Esta tecnologia emprega ferramenta de diamante monocristalino de elevada precisão em máquinas-ferramenta especialmente projetadas para esta função e sob condições controladas de temperatura, umidade e isolamento do meio ambiente com o objetivo de obter superfícies de altíssima precisão (TANIGUSHI, 1993).

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

## **2.2 Processos de Usinagem Abrasiva de Materiais Frágeis**

### **2.2.1 Lapidação**

A lapidação é uma operação de acabamento que tem como resultados:

- a) grande exatidão de dimensões na peça
- b) correção de pequenas imperfeições de forma
- c) refinamento da superfície final
- d) possibilidade de um perfeito acoplamento entre superfícies lapidadas

Em operações de lapidação é gerado menos calor do que em outras operações de acabamento. Quando ambos os lados de uma peça plana são lapidados numa

mesma operação, é conseguida uma perfeita exatidão em planicidade e paralelismo e, na remoção da mesma quantidade de material de ambos os lados de uma determinada peça de maneira simultânea, algumas tensões inerentes à peça são igualmente atenuadas. Tanto nas operações manuais de lapidação quanto em máquinas semi-automáticas, os resultados finais dependem de vários fatores:

- a) tipo de material do lapidador,
- b) velocidade de lapidação,
- c) material a ser lapidado,
- d) maneira que o processo é realizado,
- e) tamanho do grão abrasivo,
- f) pressão de lapidação, entre outros (DALLAS, 1976).

A relação entre estes parâmetros e seus efeitos no processo global não são claramente conhecidos devido à complexidade do processo. A figura 2.2 mostra um modelo simplificado de lapidação mostrando duas formas da ação do grão abrasivo no processo. O grão 1 gira sem deslizar enquanto que o grão 2 apenas desliza.

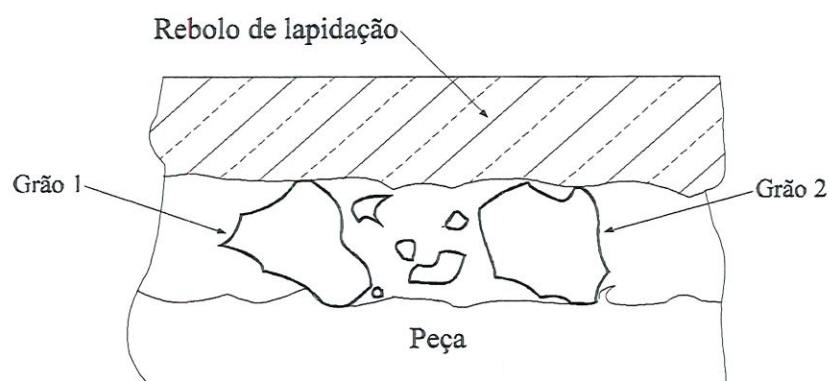


FIGURA 2.2 Modelo simplificado do processo de lapidação (KIM & CHOI, 1993).

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

---

No segundo caso, micro cavacos são produzidos devido à operação de corte. A razão entre os grãos que giram e os que deslizam surtem efeito na eficiência do processo, sendo que a razão ótima para uma boa eficiência é difícil de se prognosticar pois são muitas as variáveis envolvidas. Além disso, como o tamanho e a forma dos grãos são aleatórios e mudam continuamente, é necessária uma aproximação experimental para se fazer uma melhor análise do processo de lapidação (KIM & CHOI, 1993).

Os grãos de lapidação mais comumente usados para bolachas de silício são: "corundum" ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), carbeto de silício (SiC) ou misturas especialmente preparadas tais como  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{ZrO}_2$ . Abrasivos de diamante e carbeto de boro desempenham papel secundário devido ao seu alto custo. O tamanho do grão varia de 100  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$  (acabamento final).

A remoção de material durante a lapidação de silício acontece através de trincas e fratura frágil do material cristalino. Isto é causado por causa dos grãos abrasivos que rolam entre a superfície da bolacha e o lapidador. No processo de lapidação o tamanho dos grãos abrasivos ditam a taxa de remoção de material. Os grãos pequenos, por exemplo, não contribuem para o processo de remoção (TOENSHOFF, H.K. et al, 1990).

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



---

processo importante de acabamento abrasivo, comparado ao polimento e retificação de materiais frágeis muito pouco se conhece do ponto de vista fundamental.

Por causa da importância dos processos abrasivos tri - dimensionais em relação ao desgaste, a maioria dos experimentos são feitos em metais. Os resultados podem ser mais ou menos usados para se descrever a lapidação de materiais frágeis no regime dúctil, isto é, o regime onde a componente da força normal por abrasivo está abaixo da carga máxima para ocorrer a fratura

O limite entre este regime e o polimento é difuso, entretanto várias aplicações em lapidação levam à fratura da peça

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

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

**VANTAGEM:** economia em processos de grande volume quando são usados abrasivos baratos.

**DESVANTAGEM:** o processo de lapidação oferece como desvantagem a produção de numerosas microindentações em toda a área de atuação do grão abrasivo já que este está livre e imerso em solução líquida, produzindo trincas detectáveis e deslizamentos ocasionais que crescem numericamente com a dureza [ LÊDO, 1997].

### 2.2.2 Polimento

O polimento torna-se necessário, em materiais frágeis se, após a lapidação, a rugosidade não tiver alcançado a ordem de alguns nanômetros. No processamento de materiais frágeis, o polimento dá à peça uma textura especular, necessária a várias aplicações.

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

As técnicas disponíveis ao polimento de bolachas de silício são as seguintes:

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

A figura 2.3 mostra uma máquina de polimento triaxial onde os mancais são todos hidrodinâmicos. Uma máquina moderna em forma de carrossel pode ter até acima de 6 cabeças de polimento. As velocidades de polimento ( $V$ ) são acima de 3m/s para as bolachas. As pressões de polimento são de 7 a 70kPa (KIM & CHOI, 1993).

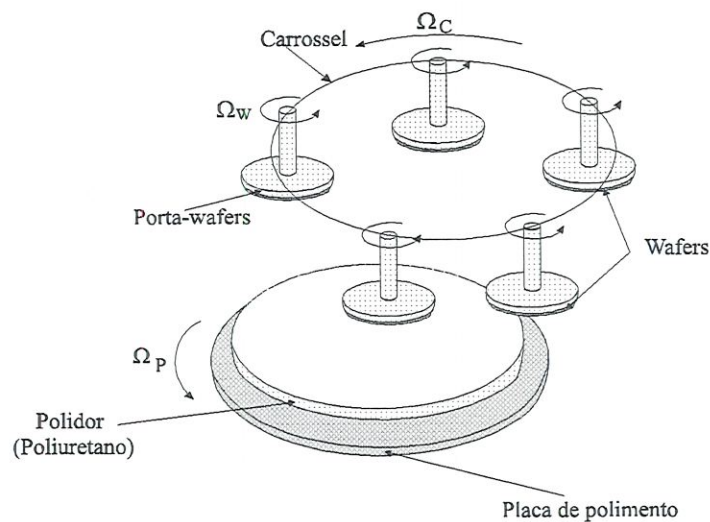


FIGURA 2.3 Máquina de polimento (VENKATESH et al, 1995).

Uma técnica popular de fixação da bolacha é a de pressioná-lo em direção a um disco poroso aderindo-se à cabeça de polimento através de forças adesivas e fixado por um anel.

**VANTAGEM:** boa remoção de material quando se usa a técnica de polimento mecânico-química.

**DESVANTAGENS:** alto custo, produtividade limitada, entre outras.

### 2.2.3 Retificação

A retificação ou usinagem abrasiva refere-se ao processo para remoção de material na forma de pequenos cavacos pela ação mecânica de partículas abrasivas de contorno irregular. Estas partículas estão vinculadas a uma pedra circular através de um material colante formando a ferramenta de corte na retificação, o rebolo. A figura 2.4 mostra com clareza o princípio do processo de retificação.

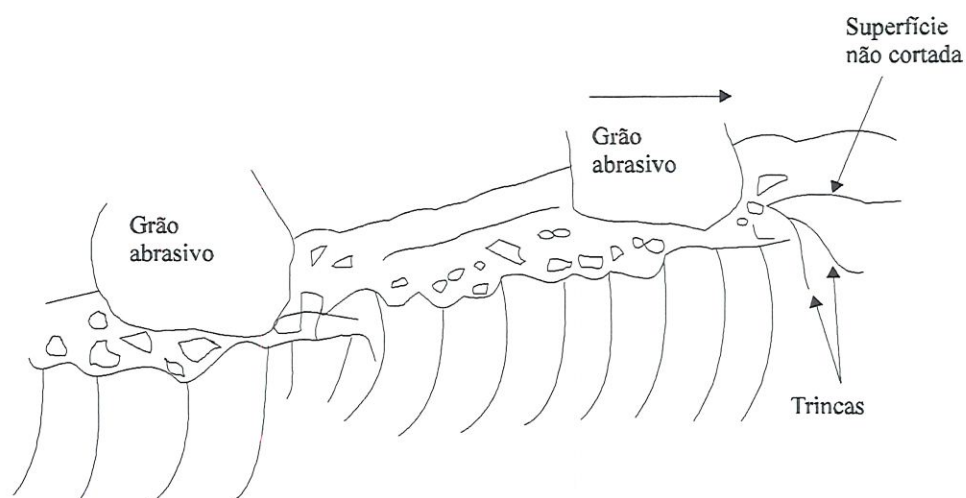


FIGURA 2.4 Modelo esquemático da formação de cavaco em retificação de materiais frágeis (INASAKI, 1987)

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

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

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

---

efetivas. Esta condição é conseguida com uma pequena profundidade de corte e alta velocidade da peça numa taxa constante de remoção de material (INASAKI, 1987).

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

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

Infelizmente, no polimento, esta melhora na rugosidade superficial é acompanhada de uma diminuição na exatidão de contorno da peça. Além disso, o polimento é um processo mais caro do que a retificação, pois exige mão-de-obra especializada (BIFANO et al, 1988). Os mecanismos de retificação e polimento são similares: ambos contém partículas abrasivas orientadas aleatoriamente para a remoção de material. A diferença básica entre estes dois processos é que na retificação são usados abrasivos fixos enquanto que no polimento usam-se abrasivos livres.

Para se fazer uma retificação no regime dúctil de material frágil é necessário se fazer um estudo da correlação entre os parâmetros da exatidão superficial final e o desempenho óptico, uma análise das condições superficiais, redução e isolamento de calor e vibrações, uma tecnologia para a seleção do material de trabalho e fixação da peça. Para isso há a necessidade de se estabelecer uma tecnologia de retificação de ultraprecisão para que se possibilite o processo de geração de superfícies ópticas esféricas com alta exatidão, como um sistema integrado destas tecnologias (YOSHIDA & ITO, 1990).

**DESVANTAGEM:** dependendo da aplicação, há a necessidade de se fazer um polimento pós retificação para que se consiga uma excelente qualidade de superfície.

**VANTAGEM:** em retificação, a remoção de material é maior do que no torneamento de ponta única de diamante, entre outras.

Por causa da natureza bem caracterizada das ferramentas de ponta única de diamante comparado com a retificação, o processo de torneamento de silício policristalino com ferramenta de ponta única de diamante será estudado em detalhes neste trabalho.

A seguir serão apresentados, de maneira detalhada, os aspectos importantes e definições que dizem respeito à usinagem de ultraprecisão de materiais frágeis como uma prévia ao entendimento desse processo novo e cada vez mais necessário.

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

## 2.3 Indentação

Um teste de indentação consiste na interação entre dois corpos, sendo que um dos corpos pode ser uma superfície qualquer enquanto que o segundo um elemento mecânico com uma geometria pré definida o qual é submetido a uma força variável ou carga; este elemento mecânico é chamado de indentador (LÊDO, 1997).

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

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

Para o entendimento da fratura ocorrida por indentação em materiais frágeis, há a necessidade de um conhecimento detalhado dos campos de tensão dentro de um sistema carregado. Para isso, é necessário se ter uma visão profunda da natureza da zona de contato. A forma do indentador é um fator de vital importância na determinação das condições de contorno para o campo. A figura 2.5 nos dá as distribuições de pressão de contato elástico para vários formatos de indentadores. Espera-se um alto gradiente de tensões ao redor do contato elástico entre o indentador e a peça.

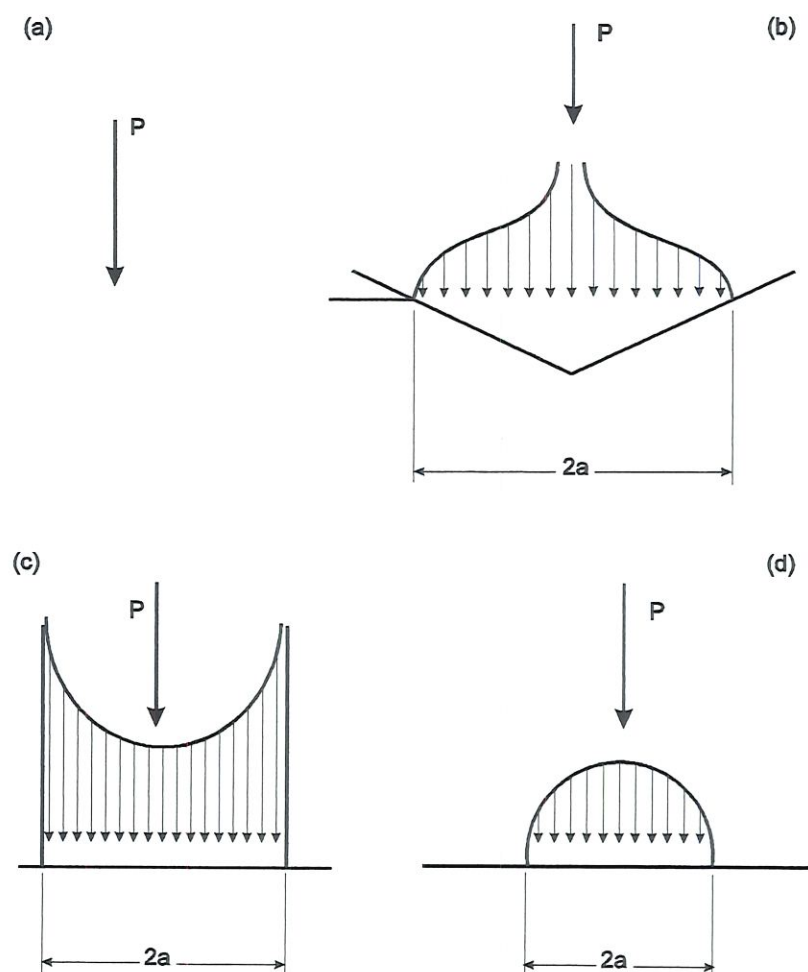


FIGURA 2.5 Distribuição de pressão do contato elástico para vários tipos de indentadores (a) carga pontual, (b) sharp (afiado), (c) punção plano e, (d) indentador esférico (ou cilíndrico);  $P$  caracteriza o carregamento aplicado na indentação e " $a$ " a extensão do contato.

É conveniente se distinguirem dois tipos extremos de campos de indentação:

- Campo "blunt", no qual a pressão de contato aumenta monotonicamente com a carga de forma que a deformação anterior à fratura seja completamente elástica.



- Campo "sharp", o qual a pressão de contato é maior do que o necessário para produzir deformação irreversível em todos os estágios do carregamento.

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

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

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

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

O modelo mais adotado e simples neste caso é o da cavidade interna expandida, o qual nos diz que o volume esférico pressurizado (impressão do indentador) induz plasticidade num volume anular imediatamente após o contato (zona de deformação), como mostrado na figura 2.6; à frente da região plástica permanece uma matriz elástica infinita. Portanto, dependendo da carga aplicada ao indentador, forma-se uma pequena região deformada plasticamente (LAWM & WIEDERHORN, 1983).

Na figura 2.6, a região mais escura mostra o núcleo hidrostático; a região hachurada mostra a zona plástica, formando a matriz elástica.

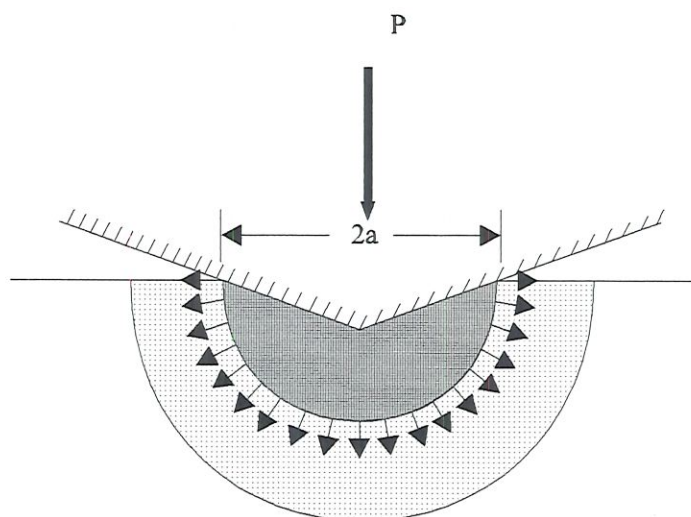


FIGURA 2.6 Modelo para o problema de indentação elástico - plástica.

A fratura padrão produzida na indentação sharp tem algumas variações geométricas, mas dois tipos básicos de trincas são geralmente distinguíveis: trincas médias/radiais e trincas laterais. A seqüência de propagação de trincas é mostrado a seguir (figura 2.7):

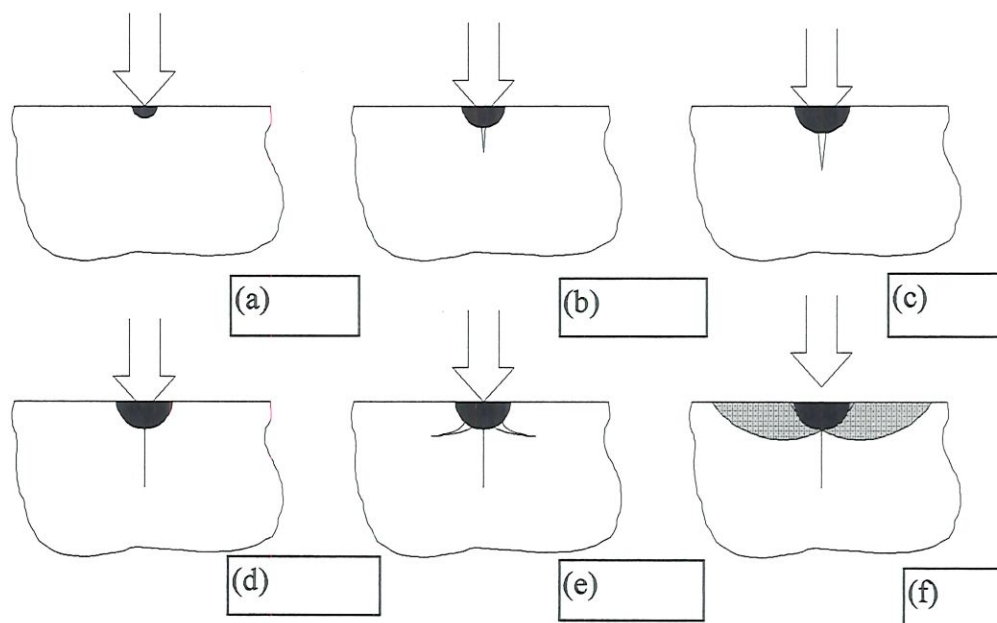


FIGURA 2.7 Esquema de formação de trincas sobre o ponto de indentação.

- a) A ponta do indentador produz uma zona de deformação não elástica;
- b) No início, um fluxo repentino de deformação induzida desenvolve uma pequena trinca chamada de trinca média;
- c) Um aumento no peso causa, imediatamente em seguida, um crescimento regular da trinca média;
- d) Sob descarregamento, a trinca média começa a se fechar;
- e) No descarregamento completo, se inicia a propagação de orifícios laterais em direção à superfície do corpo de prova causando, desta forma,
- f) o esfarelamento do material (LAWN & WILSHAW, 1975).

---

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

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

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

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

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

## 2.4 Riscamento

Com respeito à usinagem, a indentação é um processo essencialmente estático. Por isso, torna-se interessante se estender o modo de operação incluindo-se o estudo do movimento lateral retilíneo.

O riscamento é um processo análogo à usinagem de ultraprecisão usado para a manufatura de redes de difração e escalas. A rede de difração é um componente vital à dispersão espectroscópica na maioria dos instrumentos ópticos. Este processo requer dois modos laterais de movimento ferramenta/peça:

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

O riscamento é um processo de carga constante que envolve o arrastamento de uma ferramenta de diamante através da superfície da peça, formando alguns sulcos, como mostrado na figura 2.8.

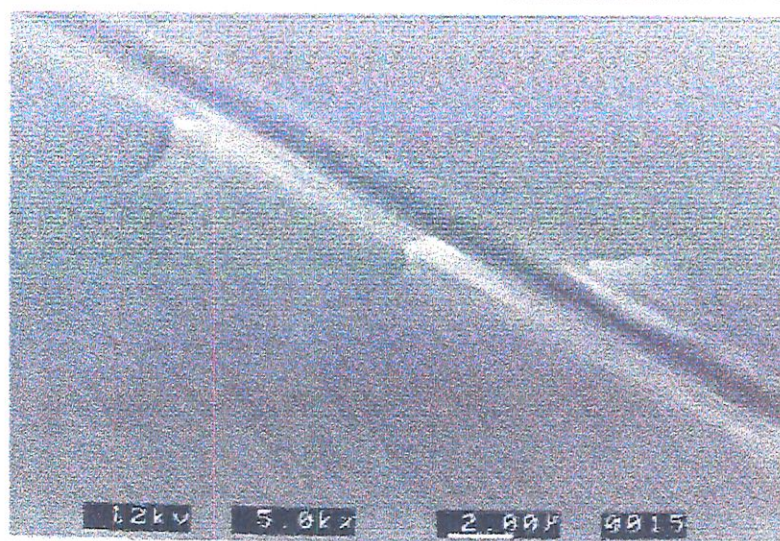
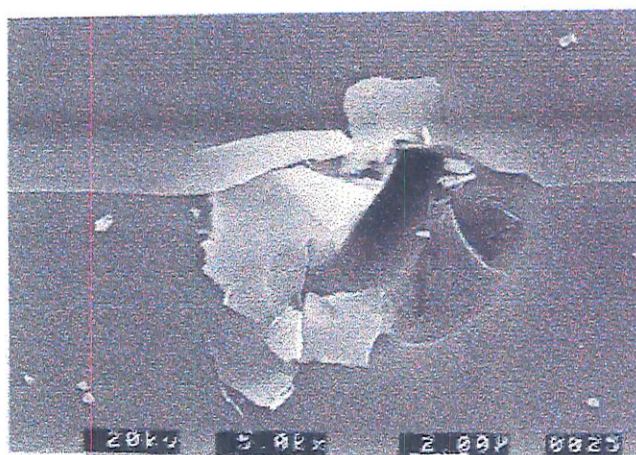


FIGURA 2.8 Imagem do M.E.V que mostra a formação de sulco em ensaio de riscamento em silício monocristalino (CHAO, 1991).

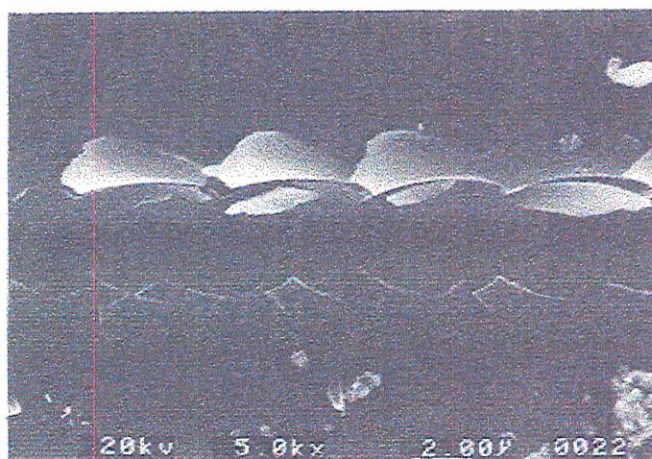
Embora o riscamento seja considerado diferente de um torneamento com ferramenta de diamante na maneira pela qual a ponta da ferramenta se aproxima de uma profundidade particular no material da peça, ele representa um processo intermediário entre a indentação e a usinagem prática. Na usinagem, aplica-se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

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

Para o estudo da ocorrência de trincas no riscamento segundo CHAO (1991), usou-se um indentador piramidal Vickers em vidros, alumina policristalina e monocristal de alumina. Cada espécime ensaiado foi seccionado para se verificar a formação das trincas médias sub superficiais e trincas laterais, como visto na figura 2.9 a) e b); verificou-se que estas trincas se originam da zona de deformação plástica e que em altas cargas de carregamento do indentador as trincas laterais formadas se estendem à superfície do material causando o seu esfarelamento (chipping).



a)



b)

FIGURA 2.9 a) e b) Algumas das trincas padrão produzidas no riscamento de materiais frágeis com uma carga vertical de 25 gramas (CHAO, 1991).

Com baixas cargas e baixas profundidades de penetração formam-se sulcos dúcteis (completamente plásticas) em vidro verde (soda lime glass), indiferente a

velocidades e ferramentas usadas. Para cargas intermediárias verificou-se fratura frágil em baixas velocidades (isto é, no início e no fim da ranhura).

Assim sendo, uma transição frágil para dútil pode ser vista no fim da aceleração enquanto que uma transição dútil frágil pode ser vista no fim da desaceleração. Portanto, entre o início e o fim do riscamento, numa região intermediária numa variação de velocidade de 40 a 90 mm/seg, pode ser vista uma região de retirada de material de forma dútil sem danos consideráveis (figura 2.10).

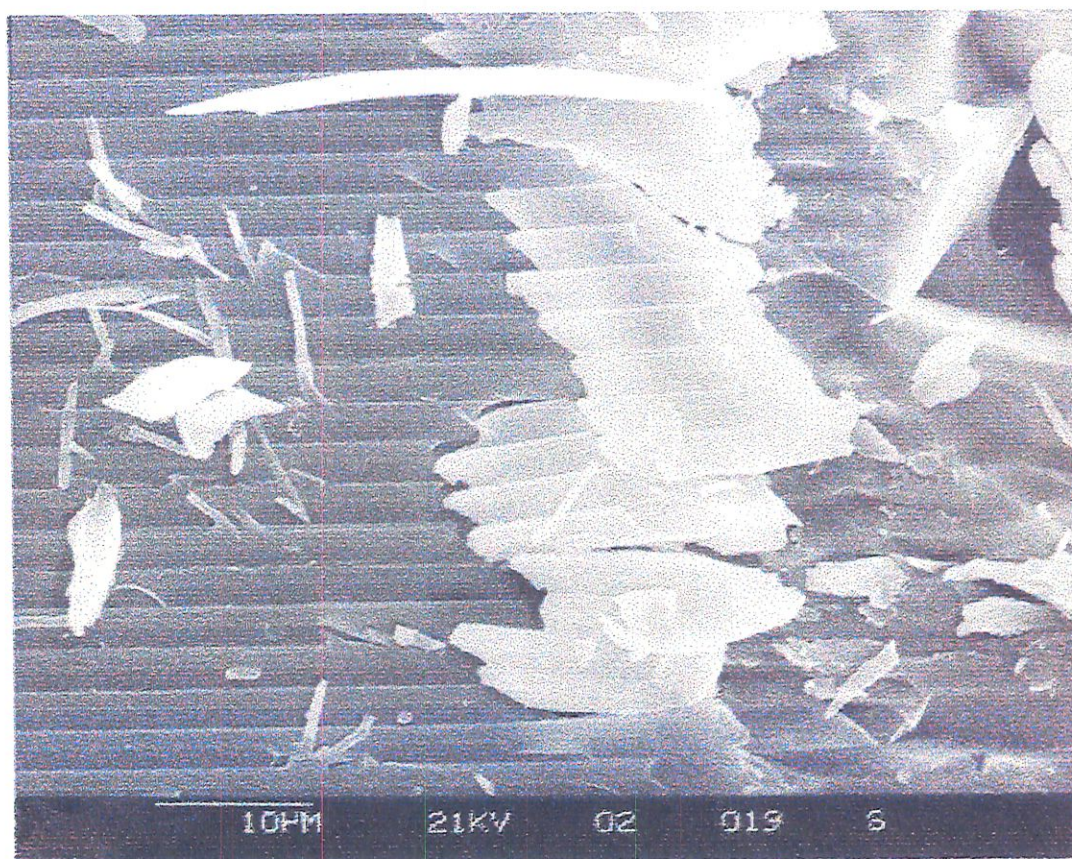


FIGURA 2.10 Micrografia do M.E.V mostrando a transição dútil/frágil produzidas por riscamento em "soda lime glass" com uma carga vertical de 90 gramas (CHAO, 1991).

A transição dútil - frágil pode ser dividida em três estágios:



- 1) pequenas trincas laterais aparecem no fundo dos sulcos,
- 2) estas trincas laterais se propagam e se combinam com trincas laterais adjacentes causando o esfarelamento pós riscamento de material,
- 3) um grande esfarelamento ocorre levando à formação de grandes crateras no material com profundidades 5 a 10 vezes o valor da profundidade do sulco dúctil.

Segundo CHAO (1991), os resultados de riscamento em vidro mostram que a transição dúctil - frágil depende da velocidade da ferramenta. Geralmente, a largura do sulco diminui com o aumento da velocidade provavelmente por um problema de desalinhamento da ferramenta em altas velocidades. Com isso, a aresta de corte torna-se mais negativa (em geral, a tensão de escoamento aumenta com o aumento da taxa de deformação). Contudo, pode-se dizer que com o aumento da velocidade da ferramenta o material escoava com maior rapidez até a ruptura.

No riscamento dúctil de materiais frágeis, os cavacos gerados são curvilíneos, contínuos e com marcas distintas de cisalhamento no lado de trás (figura 2.11). Este tipo de cavaco contínuo é geralmente produzido em corte de materiais dúcteis como o alumínio, por exemplo. A aparência destes cavacos em forma de arco e dos sulcos dúcteis demonstram que é possível a usinagem de materiais frágeis de maneira similar aos metais dúcteis.

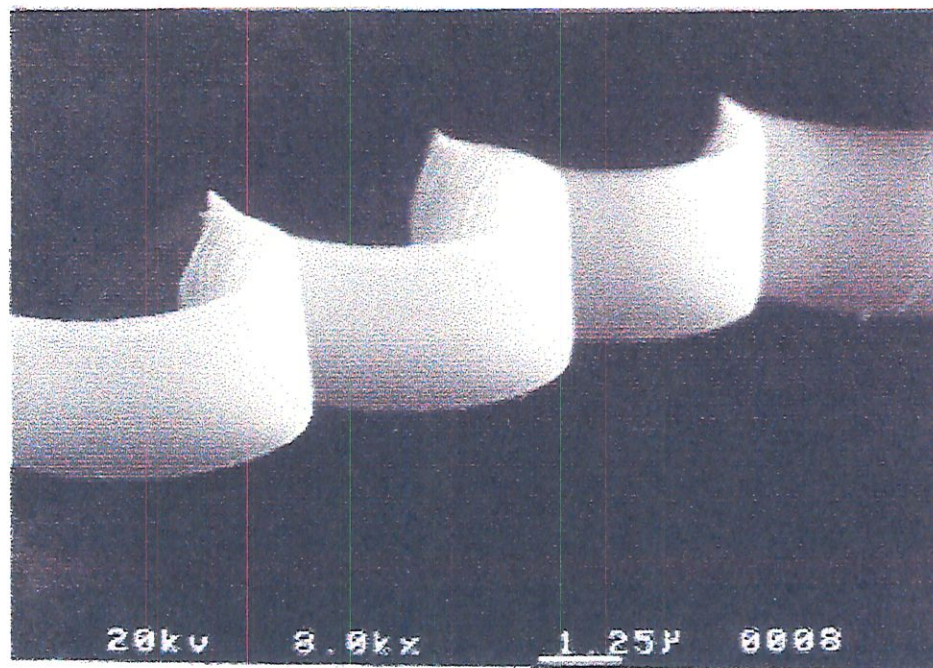


FIGURA 2.11 Cavacos em forma de arco com marcas visíveis de cisalhamento no lado de trás (CHAO, 1991).

Estes mecanismos mencionados anteriormente indicam que a ponta da ferramenta exerce uma poderosa influência na remoção de material. A tendência é de que ângulos de saída fortemente negativos (como o indentador piramidal Vickers) gerem um campo de tensão de compressão na frente da ferramenta o qual domina o mecanismo de fluxo cizalhante (corte) (CHAO, 1991).

## 2.5 Torneamento de Materiais Frágeis com Ferramenta de Diamante

O torneamento com ferramenta de ponta única de diamante é o processo onde se utiliza ferramenta monocortante de diamante em uma máquina ferramenta de ultraprecisão especialmente projetada para produzir acabamentos superficiais na ordem de nanômetros (PURQUERIO, 1994).

Os metais não ferrosos, como o alumínio e o cobre, foram os primeiros materiais torneados com ferramenta de diamante; porém, com o desenvolvimento na indústria eletro - eletrônica e de materiais ópticos infra - vermelhos e reflexivos, houve a necessidade de se tornearem materiais frágeis.

A produção de superfícies com qualidade especular de materiais frágeis usando-se máquinas ferramentas de ultraprecisão é uma tecnologia em crescimento e com aplicações importantes (BLACKLEY & SCATTERGOOD, 1991).

No torneamento dúctil de vidros, cerâmicas e outros materiais frágeis, os mecanismos de remoção de material dependem de um grande número de variáveis relacionadas à máquina (profundidade de corte, taxa de avanço, velocidade de corte e relacionadas à ferramenta (ângulo de saída e ângulo de folga).

Por causa de sua fragilidade, vidros, cerâmicas e outros materiais frágeis sofrem danos superficiais e sub-superficiais quando são colocados em contato com objetos afiados e duros como uma ferramenta de diamante ou um indentador. Porém, dependendo dos valores de usinagem dados às variáveis acima o corte do material frágil poderá ser feito através de deformação plástica sem uma introdução considerável de danos (DUDUCH, 1993).

### 2.5.1 A Ferramenta de Ponta Única de Diamante

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

A estrutura do diamante consiste de átomos de carbono em forma C.F.C (cúbica de face centrada) e sua união se dá através de ligações covalentes, ou seja, grande energia inter atômica. Esse tipo de estrutura é a responsável pela alta dureza, elevado ponto de fusão e grande resistência química dos materiais (SCHROETER, 1997).

Na figura 2.12 é apresentada uma ferramenta de diamante típica com ângulos, raios e arestas que compreendem a sua geometria.

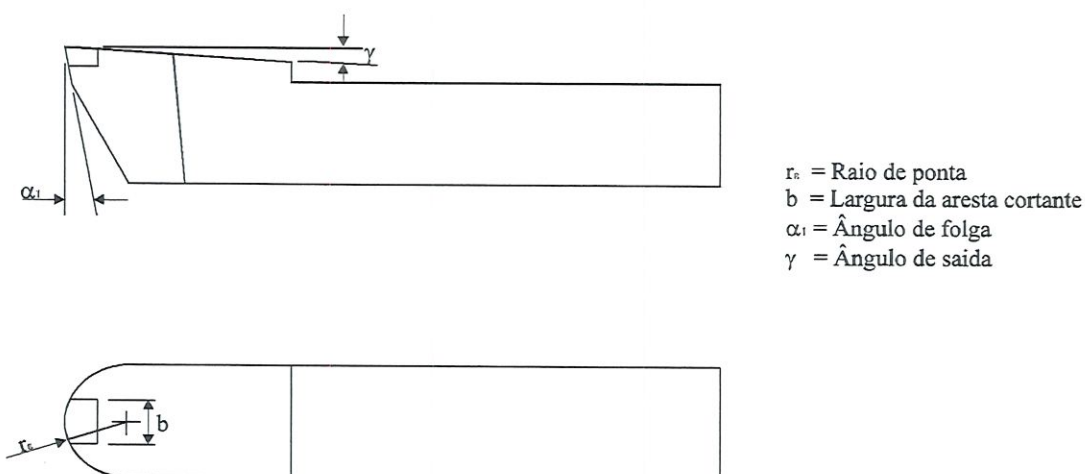


FIGURA 2.12 Geometria da ferramenta de diamante com ponta arredondada

Ferramentas de diamante monocristalino podem ser encontradas em diferentes formas:

- Ferramentas com superfície de corte com forma circular,
- Ferramentas com superfície de corte com forma truncada,
- Ferramentas com superfície de corte afiadas.

As ferramentas de diamante circulares são as mais empregadas e usadas na fabricação de superfícies anesféricas. Os raios de ponta ( $r_e$ ) para ferramentas circulares geralmente variam de 0.1 mm a 100 mm, dependendo do tipo de aplicação.

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

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

- formação de aresta postiça,
- micro - esfarelamento,
- fratura,
- fadiga [Paul et al, 1996].

Na usinagem de silício o efeito do desgaste da aresta de corte (algum arredondamento), produz um efeito similar ao que ocorre na usinagem de metais: difração de luz formando um "arco - íris"(BLACKE & SCATTERGOOD, 1990).

### 2.5.2 O Torno de Ultraprecisão ASG 2500

A produção de superfícies com qualidade óptica em materiais frágeis como o silício, usando-se máquinas - ferramenta de ultraprecisão é uma tecnologia, como já dito, em grande emergência e com grandes aplicações.

Não convencionais, as máquinas - ferramenta de precisão com alta rigidez devem ser usadas para controlar parâmetros de usinagem e produzir a chamada usinagem no regime dúctil. Neste regime, é obtida no material frágil uma superfície com qualidade óptica livre de micro fraturas.

O desenvolvimento de máquinas - ferramenta de ultraprecisão com alta rigidez baseados em mancais aerostáticos nos permite um controle preciso do volume deformado, que é um pré-requisito à usinagem no regime dúctil.

O torno ASG 2500 é uma dessas máquinas especiais à produção de superfícies ópticas em materiais frágeis. Este torno é um avançado sistema de multi - eixos com um CNC acoplado para torneamento com ferramentas de diamante monocristalino. O ASG 2500 fornece a rigidez mecânica necessária para o uso com nitreto de boro cúbico, cerâmicos ou ferramentas de corte de carbetos para produzir componentes mecânicos de precisão em titânio, aço inoxidável e muitos metais ferrosos.

O torno ASG 2500 está habilitado a produzir, quando montado com ferramenta de diamante monocristalino, componentes como lentes infravermelhas

---

complexas em germânio, silício, sulfatos de zinco e outros cristais bem como espelhos reflexivos em cobre, ouro, prata e ligas de alumínio, lentes e prismas em uma gama de polímeros, moldes de precisão, placas de níquel eletrolítica, latão e outros metais não ferrosos.

O sistema de resolução do torno ASG 2500 está na faixa de 10 nm, estando habilitado a usinar formas complexas com exatidão dimensional submicrométrica. A planicidade e a repetibilidade dos carros com mancais hidrostáticos e aerostáticos do cabeçote possibilitam o torno a produzir acabamentos superficiais de alta qualidade na ordem de 75 Angstrons  $R_a$  em muitos materiais. Para obter resoluções e acabamentos superficiais desta ordem o equipamento é constituído de um CNC série 8200 Allen-Bradley, um sistema de realimentação interferométrico laser da HP e uma avançada tecnologia de servos é combinada com os carros hidrostáticos e mancais aerostáticos para produzir um dos mais exatos sistema de usinagem de ultraprecisão disponível (LÊDO, 1997).

### 2.5.3 Formação de Cavaco

A formação de cavaco no regime dúctil é influenciada pelo estado de tensão na região de corte. O estado de tensão, por sua vez, é dependente do ângulo de saída da ferramenta. Ângulos de saída muito negativos normalmente geram aumento nas tensões hidrostáticas dentro da zona de deformação plástica na ponta da ferramenta. Estas tensões reduzem a tendência de ocorrência de fraturas, consideradas necessárias à usinagem em regime dúctil.

Para as ordens de grandeza envolvidas no corte de materiais frágeis, a espessura de corte pode ser menor que o raio da aresta cortante. Nessas condições, o

próprio raio da aresta cortante determina o ângulo de saída, que passa a ser chamado de ângulo de saída efetivo.

Quando a espessura de corte é relativamente grande em relação ao perfil da aresta da ferramenta, as forças resultantes e as energias são governadas pelo ângulo de saída nominal. Entretanto, como a espessura de corte se aproxima do tamanho do contorno da aresta, o ângulo de saída efetivo é quem determina as forças resultantes (LUCCA & SEO, 1993).

Assim, ferramentas com ângulo de saída negativos afiadas são indicadas para corte de materiais duros e frágeis. No corte com ferramenta com ponta circular esta indicação se confirma, visto que na região de corte próxima ao centro da ponta da ferramenta a espessura de corte é extremamente pequena, crescendo à medida que se afasta do centro.

A seguir será descrito, com grande riqueza de detalhes, o modelo de corte de BLAKE & SCATTERGOOD (1990) que será usado e confirmado na parte experimental deste trabalho, onde será feito o corte da bolacha de silício policristalino.

#### **2.5.4 Transição Dúctil Frágil**

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

A energia necessária para se iniciar a deformação plástica está relacionada com o volume de material deformado enquanto que a energia necessária à fratura



relaciona-se com a área superficial de trincas. A deformação plástica torna-se energeticamente favorável com a diminuição da escala de deformação, havendo um volume inicial abaixo do qual o material se deformará sem a ocorrência de fratura.

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

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

onde, H: dureza

$K_c$ : resistência à fratura

$\Omega$ : é uma função E/H

E: módulo de elasticidade

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

### 2.5.5 Modelo de torneamento de materiais frágeis (BLAKE,1988)

Através de observações da transição dos danos por micro fraturas em ensaio de corte interrompido na região do ombro (perfil da ferramenta deixado sobre a peça através do recuo rápido da ferramenta equivalente, em tamanho, à largura de corte) BLAKE (1988) sugeriu um modelo do processo de torneamento em regime dúctil.

A geometria da operação de torneamento tem um importante efeito no processo. A figura 2.13 mostra uma geometria de corte bi - dimensional clássica.

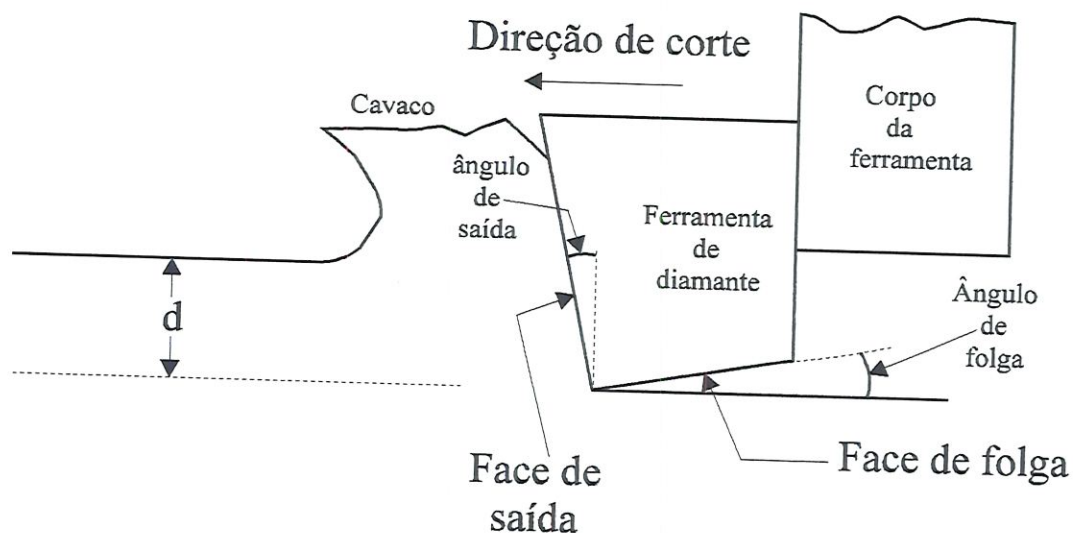


FIGURA 2.13 Geometria de usinagem para corte ortogonal. O ângulo de saída negativo corresponde à inclinação na frente da face de saída da ferramenta (BLAKE & SCATTERGOOD, 1990).

Os ângulos de saída e corte da ferramenta são mostrados. A profundidade de corte nominal ( $d$ ) é definida como a diferença de altura entre as superfícies final de corte e a inicial não cortada. Uma zona de deformação plástica se forma à frente da ferramenta, a qual fornece o cisalhamento requerido à remoção de material.

Desde que o único parâmetro de profundidade na geometria de corte ortogonal seja a profundidade nominal  $d$ , a usinagem no regime dúctil de um material frágil deve ser feita num valor crítico de  $d$ , isto é,  $d < t_c$ , para evitar a fratura. Uma cuidadosa avaliação da geometria da ferramenta é necessária para se identificar o parâmetro de profundidade. A figura 2.14 mostra uma geometria de corte real usando-se uma ferramenta de ponta arredondada. Para uma maior clareza, o cavaco que se move acima da face de saída foi omitido da figura.

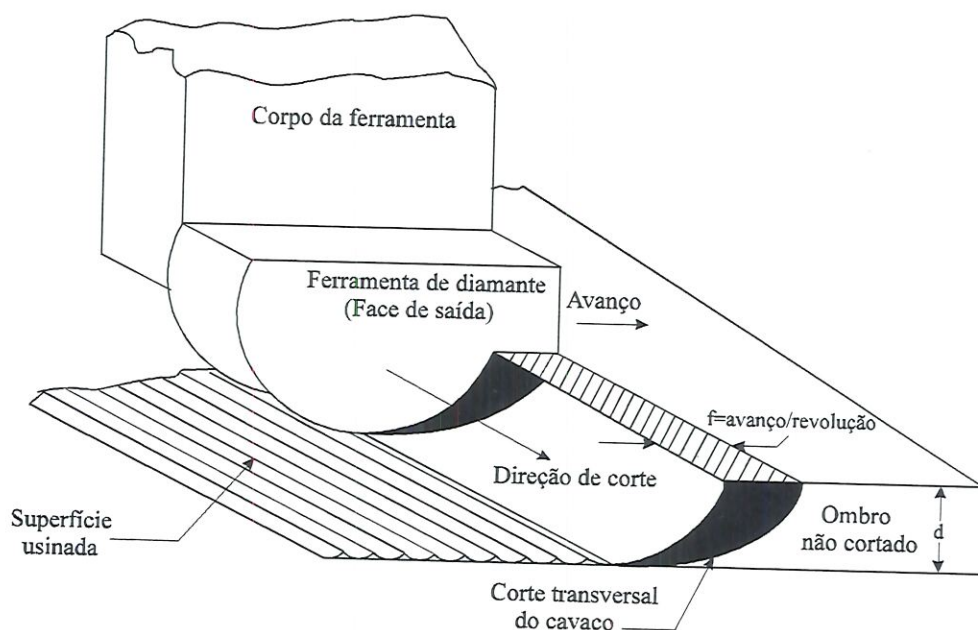


FIGURA 2.14 Geometria de corte para o torneamento com diamante com ferramenta com ponta arredondada. A combinação dos movimentos de corte e avanço produzem a seção transversal do cavaco projetada sobre o ombro não cortado (área escura)

(BLAKE & SCATTERGOOD, 1990).

A seção transversal real do cavaco projetado no ombro não cortado ao longo da direção de corte é o setor escuro (vide figura) na forma de arcos circulares. A superfície final ideal tem uma série de cavidades arredondadas.

A figura 2.15 mostra um desenho bi - dimensional da geometria de corte vista na figura 2.14, num plano normal à direção de corte.

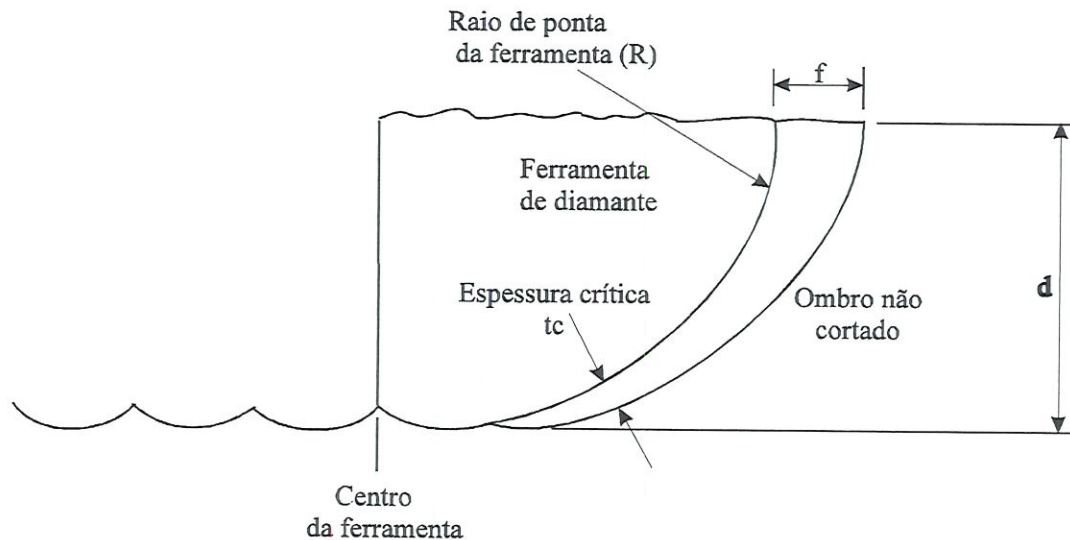


FIGURA 2.15 Geometria de corte vista num plano normal à direção de corte. A seção transversal do cavaco no ombro não cortado tem uma espessura crítica variável (como mostrado) (BLAKE & SCATTERGOOD, 1990).

$R$  mostra o raio da ponta da ferramenta (raio da aresta formado entre as faces de saída e folga). Também vale ressaltar que a profundidade de corte ou espessura do cavaco ( $t_{ef}$ ) varia em função da posição angular  $\theta$  ao longo da ponta da ferramenta. A profundidade  $t_{ef}$  é zero na linha de centro da ferramenta e é máximo  $t_{máximo}$  no topo do ombro não cortado. Para uma melhor visualização, a figura 2.15 distorce a geometria real da seção transversal do cavaco.

A figura 2.16 mostra a geometria em verdadeira escala. A largura ( $W$ ) é muito maior do que sua espessura e a variação angular  $\theta$  do cavaco ao longo da ponta da ferramenta é pequena. A figura 2.16 mostra que  $t_{ef}$  varia de  $t_{ef}=0$  para  $\theta=0$  para  $t_{ef}=t_{máximo}$  em  $\theta=\theta_{máximo}$ .

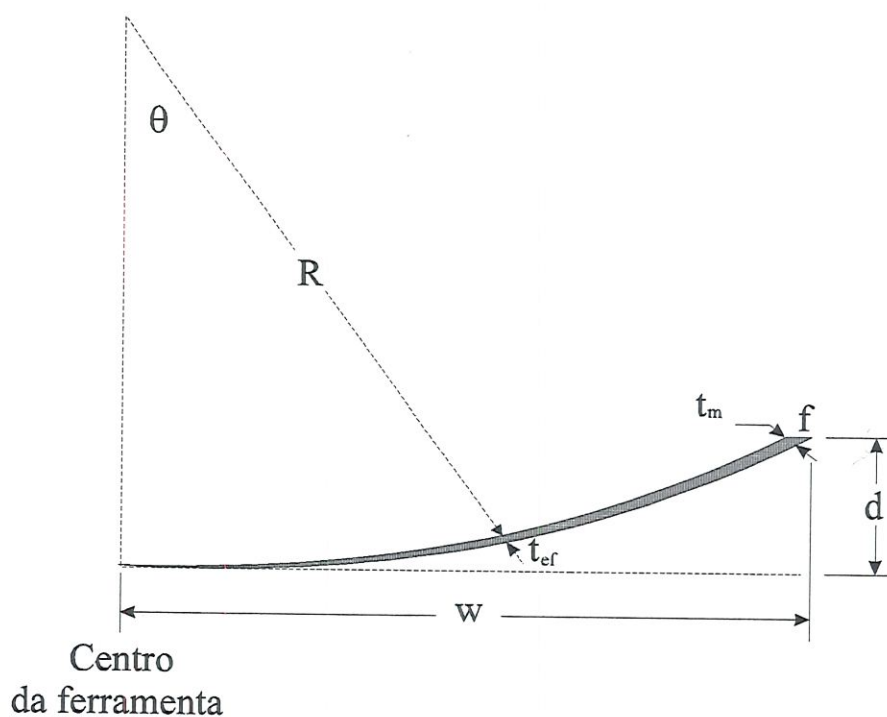


FIGURA 2.16 Vista em verdadeira escala da seção transversal do cavaco da figura 2.14.  $t_{ef}$  varia em função de  $\theta$  ao longo da ponta da ferramenta.

Após feitos os ensaios com corte interrompido, a região do ombro foi examinada. Verificou-se que nesta região serevos "pitting" (danos induzidos através de micro fraturas) ocorrem na aresta lateral de corte onde  $t_{ef}$  se aproxima de  $t_{m\text{máximo}}$  e não na linha de centro da ferramenta onde  $t_{ef}$  se aproxima de zero.

Portanto, através do estudo desta região danificada na região do ombro, um modelo de torneamento foi proposto. A idéia deste modelo é apresentada na figura 2.17. Para parâmetros de usinagem dados, há uma profundidade de corte crítica ou espessura do cavaco  $t_{ef}=t_c$  abaixo da qual a fratura não ocorre.

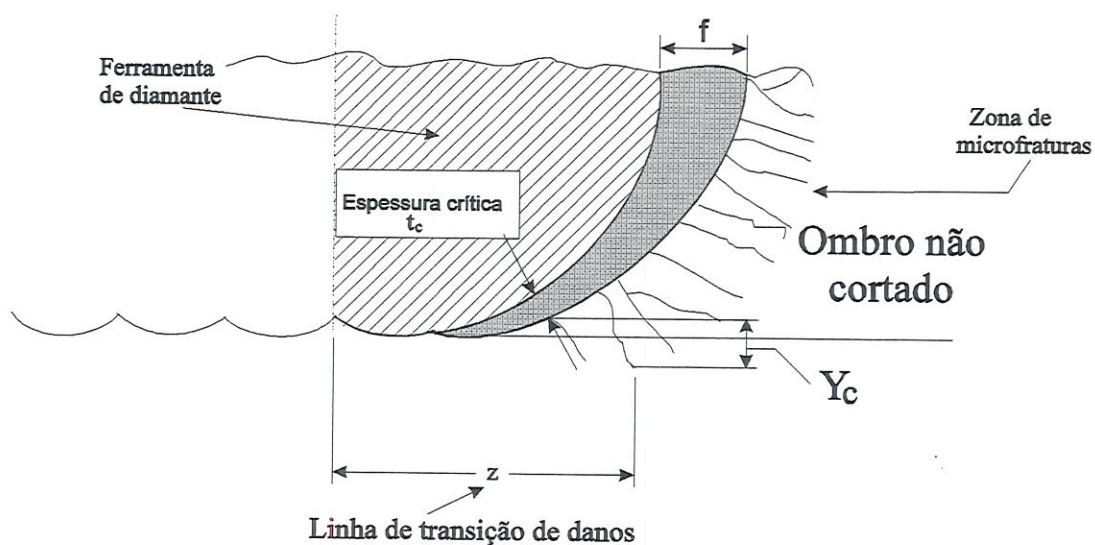


FIGURA 2.17 Modelo para a usinagem no regime dúctil. Para  $t_{ef} > t_c$ , a zona danificada se forma ao longo da ponta da ferramenta. Corte dúctil sem fratura ocorre somente ao longo da porção abaixo da seção transversal do cavaco onde  $t_{ef} < t_c$ . Se a zona fraturada se reproduzir abaixo do plano da superfície de corte, a superfície final estará repleta de "pitting". A profundidade da zona danificada formada em  $t_c$  é denotada de  $y_c$  (BLAKE & SCATTERGOOD, 1990).

Quando  $t_{ef} < t_c$  a resposta dúctil ocorre ao longo do raio da ponta da ferramenta;

Quando  $t_{ef} > t_c$  há a ocorrência de fratura, resultando numa zona danificada (figura 2.17).

O fato é que uma linha de transição de danos bem definida pode ser observada numa posição  $z$  distante do centro da ferramenta, na região do ombro em ensaios de corte interrompido.  $T_{ef} = t_c$  define a condição de transição da fratura, com  $t_c$  como o parâmetro de profundidade crítica. O avanço  $f$  é importante, pois muda a posição de  $\theta$  na qual  $t_{ef} = t_c$ . Com o aumento de  $f$ ,  $t_c$  se move abaixo da ponta da ferramenta através de sua linha de centro. Assim que a zona danificada de profundidade  $y_c$ , produzida em

$t_c$  se reproduz abaixo do plano da superfície de corte, mostrada na figura 2.17, a superfície final apresentará "pittings" introduzidos por micro fraturas.

A remoção de material no ombro não cortado acima de  $t_c$  (figura 2.17) ocorre por uma combinação de plasticidade e micro fratura. Se a fratura não se reproduzir dentro da superfície de corte ela será removida em passes subsequentes da ferramenta.

Somente onde  $t_{ef} < t_c$ , uma resposta dúctil verdadeira acontece. Para a verificação deste modelo, medidas de  $t_c$  foram feitas como uma função das condições de corte. Para o teste de corte interrompido, a distância  $z$  entre a linha de centro da ferramenta e a linha de transição do dano na figura 2.17 pode ser medida no Microscópio Eletrônico de Varredura na região do ombro.

A relação entre  $z$  e  $t_c$  é:

$$t_c = f(z + f)/R \quad (3)$$

onde  $f \ll 1$ . Note-se que  $z \gg f$  para testes típicos.

Por causa das características das ferramentas de diamante de ponta arredondada, a ponta da ferramenta no plano de projeção da figura 2.15 tem um perfil elíptico ao invés de circular. A linha de transição do dano determinando o valor de  $z$  foi definida de maneira que a posição média da linha será situada no terceiro "pit" observável na região do ombro, relativo à linha de centro da ferramenta.

A figura 2.18 mostra uma vista ortogonal da geometria de usinagem numa profundidade  $t_{ef} > t_c$  ao longo da ponta da ferramenta. Uma zona de deformação

elástico/plástica e fratura ocorrem no volume de controle ao redor da ponta da ferramenta.

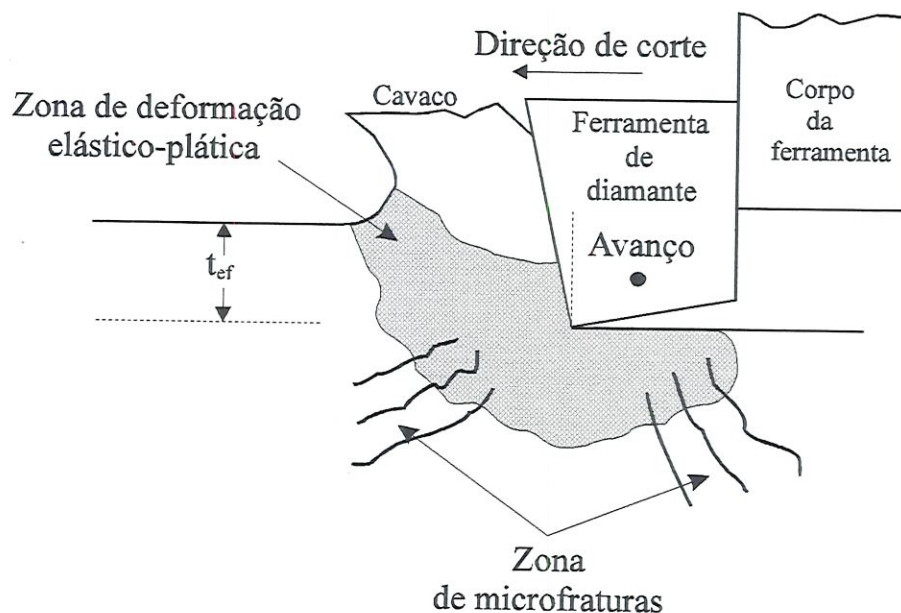


FIGURA 2.18 Vista lateral do modelo mostrado na figura 2.17. O movimento de avanço está fora do plano. Isto pode ser considerado um corte quase ortogonal com profundidade de corte  $d = t_{ef}$ , numa posição correspondente  $\theta$  ao longo da ponta da ferramenta. As microfaturas se iniciam na zona de deformação elástico/plástica quando  $t_{ef} > t_c$ , como mostrado.

A geometria apresentada na figura 2.17, que é usada em conjunto com a equação (3) formam o modelo para o torneamento de materiais frágeis em corte interrompido. Dentro da estrutura deste modelo, a posição da zona danificada no campo tensão deformação não pode ser identificada na figura 2.18. Efeitos tais como interação com ondas de choque dinâmicas estão implicitamente incluídas na determinação de  $t_c$ . Para se avaliar  $t_c$  de forma quantitativa para dada propriedade do material, o fator  $\Psi$  da equação (2) deve ser identificado. Isso requer uma solução detalhada do problema elástico/plástico. Após uma avaliação das tensões, os



mecanismos de fratura devem ser invocados a fim de se obter um critério de iniciação/propagação de trincas. O fator intensidade de tensão possível máximo  $K_{\text{máx}}$  deve aumentar com  $t_{\text{ef}}$ . Uma condição crítica necessária é alcançada quando  $K_{\text{máx}}=K_c$  com  $t_{\text{ef}}=t_c$ .

### 2.5.6 Modelo de Blackley (1991)

Um outro parâmetro que pode ser adicionado à geometria de corte estudada por BLAKE (1988) é a profundidade de dano sub superficial,  $y_c$ . Este novo parâmetro é importante pois se move ao longo do ombro em combinação com  $t_c$ , quando são usados diferentes parâmetros de ferramenta.

Quando são usadas pequenas taxas de avanço,  $t_c$  é colocada na região superior do ombro e o dano sub superficial não atinge a superfície final de corte. Isto ocorre pois os danos são removidos em passes subsequentes da ferramenta. Entretanto, quando se aumenta o avanço,  $t_c$  se move em direção à região abaixo do ombro e a profundidade de dano  $y_c$  começará a se reproduzir sobre a superfície final de corte, isto é, a superfície final fica danificada. O modelo anterior não cita  $y_c$  e não explica uma mudança aparente com o avanço no valor calculado de  $t_c$ . É importante se notar que o parâmetro  $t_c$  representa a profundidade de corte crítica para a iniciação da fratura enquanto que  $y_c$  representa a profundidade média de propagação de fraturas, após a inicialização das trincas.

Um aumento no valor de  $t_c$  poderá levar a um aumento das forças que agem na ferramenta e, conseqüentemente, um aumento de  $y_c$ . A equação do novo modelo foi derivada, onde  $t_c$  e  $y_c$  devem ser obtidos usando-se parâmetros de usinagem conhecidos como o raio da ferramenta, o avanço e a localização da transição dútil/frágil ( $z_{\text{ef}}$ ). Para isso são requeridas cuidadosas considerações através do estudo

geométrico da figura abaixo. A derivação completa desta equação é dada no artigo DUCTILE REGIME MACHINING MODEL FOR DIAMOND TURNING OF BRITTLE MATERIALS (BLACKLEY & SCATTERGOOD, 1991).

$$\frac{z_{ef}^2}{R^2} - \frac{f^2}{R^2} = \frac{t_c^2}{f^2} - 2\left(\frac{t_c + y_c}{R}\right) \quad (4)$$

Um gráfico de  $(z_{ef}^2 - f^2)/R^2$  versus  $1/f^2$  nos dará uma linha onde  $t_c$  é a inclinação e  $y_c$  poderá ser obtido da sua intersecção. Os valores de  $t_c$  e  $y_c$  são parâmetros "mecanistas" dos danos e representativos das condições de usinagem (velocidade de corte, fluido lubrificante, temperatura, etc) e da geometria da ferramenta. Além disso, fazendo-se  $z_{ef}=0$  na equação (4), um valor limitante para a taxa de avanço poderá ser obtido e esse valor caracteriza o processo de usinagem em termos de valores calculados de  $t_c$  e  $y_c$ .

Quando  $z_{ef}=0$  na equação (4),  $f_{máx}$  será:

$$f_{max} = d_c \sqrt{R} \sqrt{\frac{1}{2(d_c + y_c)}} \quad (5)$$

onde  $f_{máx}$  é o avanço máximo no qual a transição dúctil/frágil move-se sobre o plano de corte.

Este parâmetro depende do número de "pits" que marca esta posição, ou seja, em  $f_{máx}$  a quantidade de "pitting" sobre a superfície é equivalente ao número mínimo de "pits" utilizado no estabelecimento da linha de transição dos danos na região do

ombro não cortado. O uso de testes de corte interrompido e medidas da transição dos danos na região do ombro é um procedimento determinístico que mostra ser extremamente útil no critério de usinabilidade. Seria difícil de se inspecionar superfícies usinadas em grandes dimensões com critério de usinabilidade com o propósito de se estabelecer uma taxa de avanço precisa. Além disso, se outro critério para a transição dos danos fosse usado para a região do ombro (como, por exemplo, o ataque químico) para revelar micro trincas sub superficiais, então pode ser estabelecida uma taxa de avanço limitante para este tipo de danos usando-se o modelo desenvolvido neste estudo (BLACKLEY & SCATTERGOOD,1991).

## 2.6 Conclusão

A necessidade de se usinar componentes ópticos transmissivos e reflexivos está cada vez mais presente na indústria mundial.

Várias aplicações desta necessidade são apresentadas, tanto no campo de elementos transmissivos quanto na óptica reflexiva.

Os anos 90 são caracterizados pelo domínio da tecnologia de fabricação de elementos ópticos transmissivos em materiais de comportamento frágil como o silício e o germânio.

Por causa da dificuldade de se usinarem materiais frágeis, há a necessidade do desenvolvimento de técnicas que diminua esta dificuldade e que seja viável economicamente. Por isso, foi provado que o torneamento de ultraprecisão com ferramenta de ponta única de diamante é um processo extremamente interessante à fabricação de elementos espelhados esféricos e anesféricos, pois dispensa os métodos tradicionais como a lapidação e o polimento, otimizando a manufatura desses produtos.

Porém, para se conseguir acabamento especular a usinagem deve ser feita de forma dúctil para que não aconteçam danos subsuperficiais na peça. Para isso, é necessário o desenvolvimento de modelos de torneamento adequados a essa necessidade.

Vários pesquisadores tentam, sem muito sucesso, conseguir um modelo de corte que não danifique a peça na usinagem. BLAKE (1988), desenvolveu um modelo através de observações dos danos por micro fraturas em ensaios de corte interrompido e que será utilizado nesta dissertação. Blackley (1990) adicionou um

novo parâmetro ao modelo de BLAKE (1988), tornando-o ainda mais viável à usinagem dúctil, que é o propósito deste trabalho.

Utilizando o modelo de BLAKE (1988), será feito o torneamento com corte interrompido de silício policristalino. Depois serão estudados vários parâmetros de corte e demonstrado, através de metrologia, que a integridade superficial da peça está na ordem de nanômetros, conseguindo-se, desta maneira, o acabamento superficial desejado.

## Capítulo 3

### Metodologia para os ensaios

#### 3.1 Planejamento dos Ensaios

##### 3.1.1 Material

Um material ideal para o uso em elementos transmissivos no espectro infravermelho é algo inexistente. Um material pode ter, por exemplo, boas qualidades em relação a algumas das características desejáveis e propriedades menos adequadas em relação a outras. Para os ensaios foi escolhido o silício policristalino, pois apresenta custos de aquisição sensivelmente inferiores aos dos materiais monocristalinos, sendo portanto economicamente mais viáveis, embora os problemas de fabricação de materiais duros e frágeis policristalinos sejam frequentemente mais complexos que dos materiais monocristalinos (SCHROETER, R.B., 1997).

Para se fazer o torneamento com ferramenta de ponta única usou-se como material frágil uma bolacha de silício policristalino com diâmetro de 50 mm, serrado com uma espessura de 5mm. A bolacha foi lapidada de um dos lados e mantida na forma serrada com disco diamantado do outro lado no laboratório do Instituto de Física de São Carlos.

A figura 3.1 mostra micrografias do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), onde podem-se verificar as superfícies da bolacha de silício policristalino a) no lado serrado em disco diamantado e b) no lado polido.

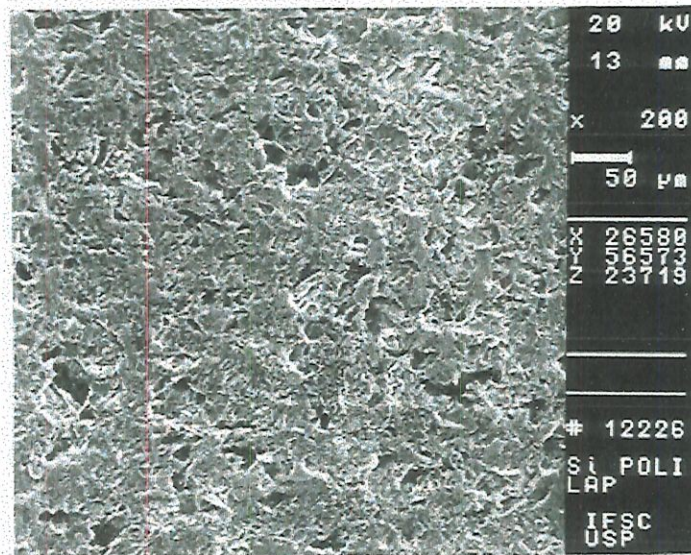


FIGURA 3.1 a) Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V) da bolacha de silício policristalino em sua forma serrada, 200x

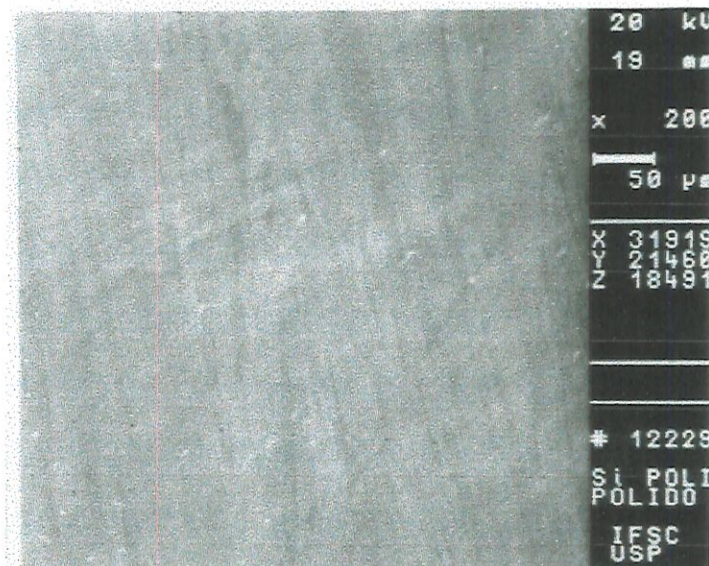


FIGURA 3.1 b) Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V) da Bolacha de Silício em sua forma polida, 200x

### 3.1.2 Preparação da amostra de silício policristalino

Para se fazer a fixação da amostra de silício policristalino à placa do torno de ultraprecisão foi fabricado um suporte de alumínio, conforme figura 3.2.

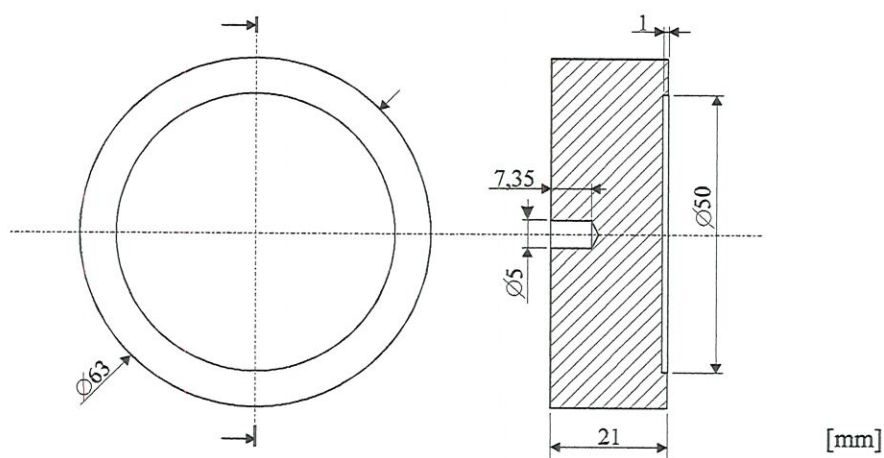


FIGURA 3.2 Croqui do dispositivo de fixação da peça

A fixação da ferramenta ao suporte da figura 3.2 foi feita com esmalte comum de maneira que a bolacha de silício fique completamente presa ao dispositivo de fixação. Feito este procedimento, a bolacha foi mapeada em 81 pequenas regiões para se verificar, com um apalpador, o desvio de forma sobre sua superfície através de comparação com um ponto zero adotado no centro da bolacha. A figura 3.3 mostra o desvio de forma sobre a superfície da peça, através de um gráfico comparativo feito em três dimensões.



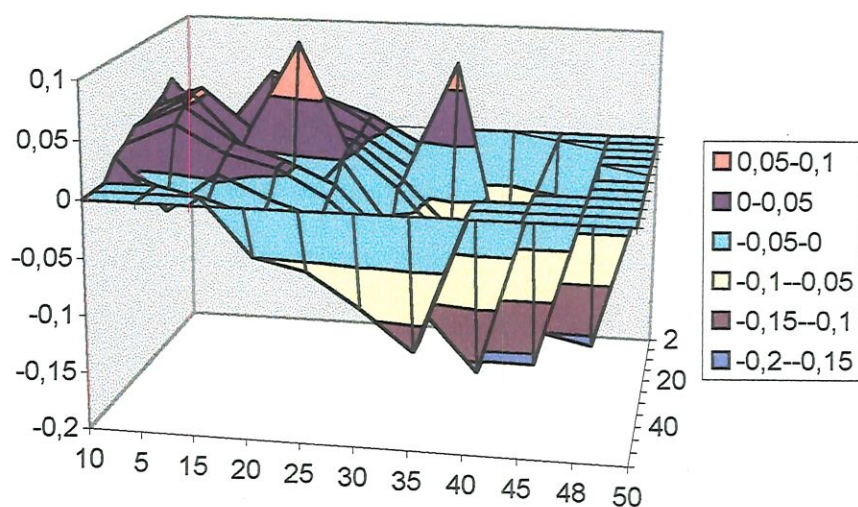


FIGURA 3.3 Gráfico em 3D mostrando o desvio de forma da bolacha de silício policristalino.

### 3.1.3 Ferramenta de corte e máquina - ferramenta

A ferramenta de corte usada foi uma "CONTOUR Fine Tooling" com número de série 31562 tipo CO45NG (tabela 3.1).

TABELA 3.1 Dados da ferramenta de diamante

Ferramenta de Ponta Única de Diamante -" Contour Fine Tooling "	
Raio de ponta (mm)	1,13665
Ângulo de saída	-5°
Ângulo de folga	12°

A máquina-ferramenta utilizada foi o torno ASG 2500 Rank Pneumo como mostrado na figura 3.4.

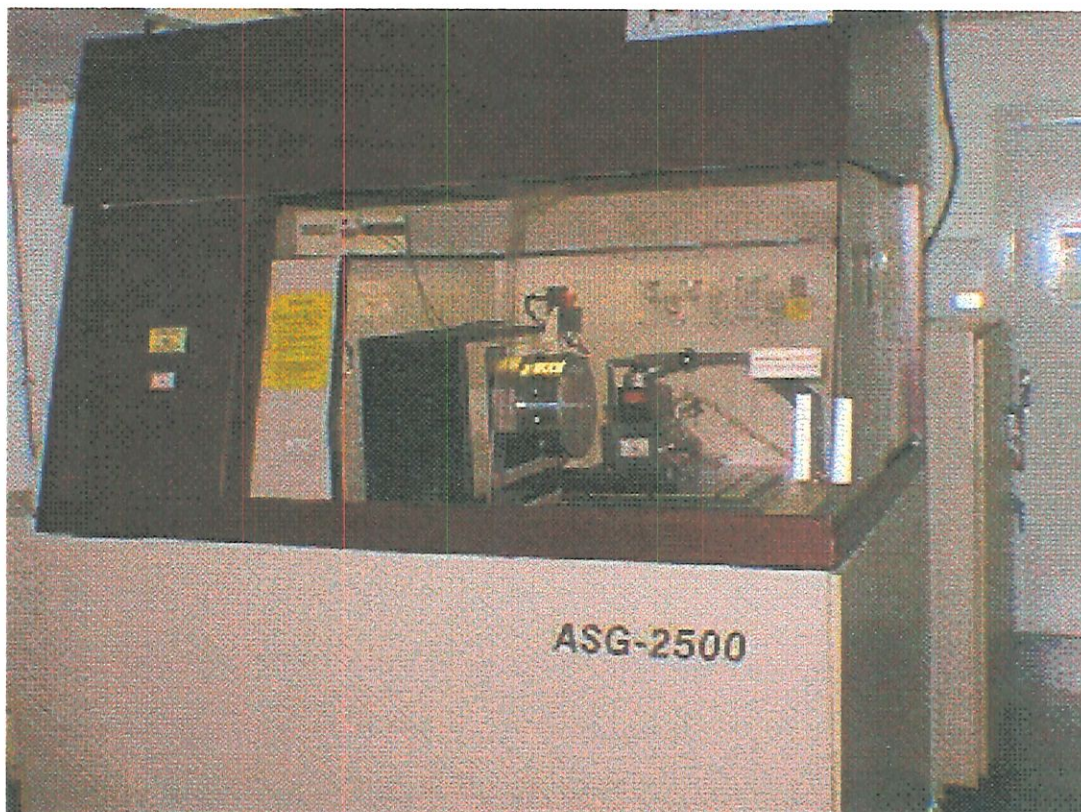


FIGURA 3.4 Torno de ultraprecisão ASG 2500 - Rank Pneumo do laboratório de engenharia de precisão da escola de engenharia de São Carlos.

### 3.2 Procedimento Experimental

A bolacha de silício policristalino foi fixada à placa no torno de ultraprecisão ASG 2500 e o procedimento usado foi o desbaste para a limpeza da bolacha de trincas remanescentes seguido de faceamento com corte interrompido. A tabela abaixo fornece as condições em que foram feitos os cortes.

TABELA 3.2 Condições de corte na bolacha de Si policristalino.

Temperatura (°C)	20
Umidade (%)	60
Fluido Refrigerante	Alkalisol 900

O faceamento da bolacha de silício policristalino foi feito da seguinte forma:

Quando foi verificado que a superfície da peça estava totalmente limpa de trincas e crateras remanescentes do processo de serramento, iniciou-se o faceamento com corte interrompido. As condições de corte usadas nesta etapa foram as seguintes:  $d = 10 \mu\text{m}$   $f = 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 7,0; 10,0 \mu\text{m/revolução}$ .

---

### 3.3 Propriedades dos Materiais Frágeis

Embora o comportamento mecânico dos materiais frágeis seja, em diversos aspectos, superior ao de outros materiais, algumas características são negativas. Esses materiais normalmente não apresentam deformação plástica apreciável e, além disso, apresentam baixa tenacidade. Além disso, é comum encontrar grandes variações da resistência à fratura entre corpos de prova ou peças de um mesmo lote, podendo ocorrer que a resistência máxima seja o dobro da mínima.

Apesar destas desvantagens, a alta resistência à abrasão, a inércia química e resistência a altas temperaturas (refratariedade) tornam os materiais cerâmicos excelentes candidatos a aplicações que vão desde implantes ortopédicos a lentes de ultraprecisão.

#### 3.3.1 Resistência Mecânica

A maioria dos materiais frágeis sofre ruptura de maneira frágil, com pouca ou sem deformação plástica. Materiais não cristalinos, tais como a fase vítrea componente da maioria das cerâmicas, são frágeis abaixo da temperatura de amolecimento e a aparência da superfície de fratura é chamada de concoidal. À temperatura ambiente, a fratura frágil tende a ocorrer por clivagem sobre planos cristalográficos particulares, isto é, fratura intragranular. Em altas temperaturas, os materiais cerâmicos tendem a se fraturar de forma intergranular. De maneira geral, a fratura ocorre de forma intra e intergranular simultaneamente. A figura 3.5 ilustra os comportamentos dúctil e frágil. A área sob a curva tensão versus deformação fornece uma medida de tenacidade do material. Até um determinado limite de

proporcionalidade, a deformação  $\varepsilon$  é diretamente proporcional à tensão aplicada  $\sigma$  (Lei de Hooke).

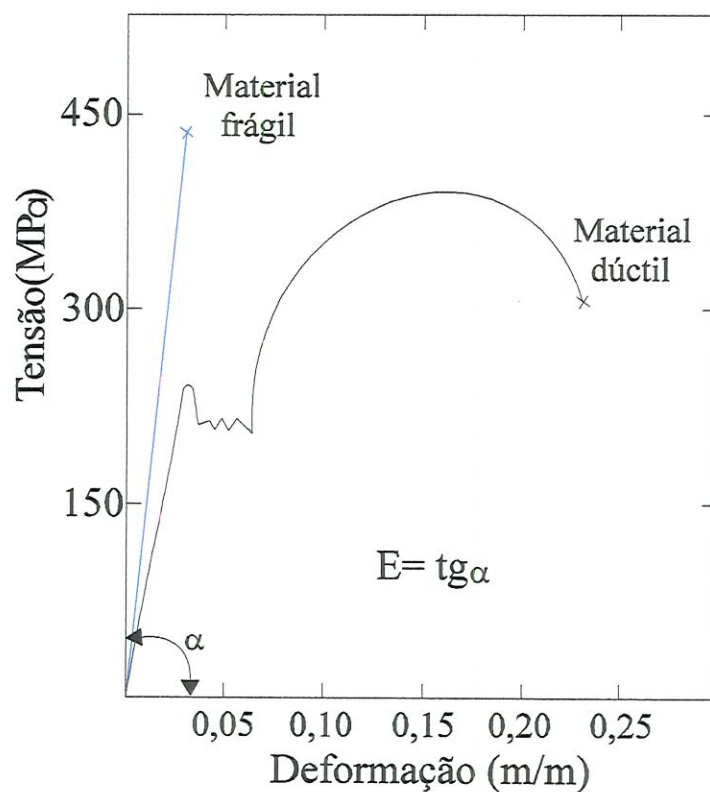


FIGURA 3.5 Curva de tensão versus deformação para materiais frágeis e dúcteis

$$\sigma = E\varepsilon \quad (6)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young. Similarmente, a tensão de cisalhamento  $\tau$  é diretamente proporcional à deformação de cisalhamento  $\gamma'$ .

---

$$\tau = G\gamma' \quad (7)$$

onde  $G$  é o módulo de rigidez ou de elasticidade no cisalhamento. Quando uma amostra é tracionada, há um decréscimo proporcional na espessura: a razão entre a variação na espessura e no comprimento é o coeficiente de Poisson:

$$\nu = \frac{\Delta d / d}{\Delta l / l} \quad (8)$$

Para fluxo viscoso e fluência, o volume permanece constante e  $\nu = 0.5$ . Para deformação elástica tem-se  $0.2 < \nu < 0.3$ . O coeficiente de Poisson relaciona-se com os módulos elásticos através da seguinte expressão:

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (9)$$

Esta equação é válida para corpos isotrópicos, tais como vidros e cerâmicas policristalinas.

A deformação elástica de um corpo corresponde a aumentar uniformemente a separação entre planos atômicos, o que é diretamente relacionado às forças interatômicas.

É fato conhecido que as propriedades dos materiais dependem não somente da composição química e estrutura de suas fases mas também do arranjo dessas. O arranjo ou microestrutura depende fortemente do processamento, matérias primas

utilizadas, relações de equilíbrio, cinética, etc. A microestrutura pode ser descrita por número e tipos de fases, incluindo porosidade, distribuição de tamanhos, forma e orientação das fases e quantidades relativas das fases.

Além da microestrutura deve-se enfatizar que as condições ambientais afetam as propriedades mecânicas de materiais cerâmicos e devem ser mantidas constantes quando se efetuam comparações gerais (ZANOTTO E.D., MIGLIORE A.R., 1991]. A tabela 3.3 lista os diversos parâmetros que influenciam as propriedades mecânicas.

TABELA 3.3 Alguns parâmetros que influenciam as propriedades mecânicas de materiais cerâmicos (ZANOTTO,E.D., MIGLIORE,A.R., 1991].

<b>Parâmetros do Material</b>	<b>Meio Ambiente</b>
Composição	Temperatura
Estrutura Cristalina	Atmosfera
Microestrutura	Taxa de Deformação
Defeitos/Falhas	Fadiga estática ou cíclica
Condições Superficiais	Estado de Tensão, isto é, uniaxial ou multiaxial.
Tensões Internas	
Tamanho e geometria da amostra	

### 3.4 Análise da Topografia e Acabamento Superficial

A textura ou rugosidade superficial caracteriza-se pelas micro - irregularidades geométricas deixadas na superfície do material trabalhado decorrentes do processo de fabricação. A rugosidade superficial pode apresentar-se de diversas maneiras. Em usinagem, ela consiste basicamente de marcas regulares deixadas pelo perfil da ferramenta combinadas a outras irregularidades, variáveis em função do processo e do material, como por exemplo micro - vibrações entre a ponta da ferramenta e a peça, devido a inclusões duras na matriz do material, vazios intermoleculares ou mesmo deformações térmicas. As dimensões dessas irregularidades podem variar entre  $10^{-10}$  a  $10^{-5}$  mm dependendo da precisão do processo de fabricação e qualidade de acabamento da superfície. Estas micro - irregularidades são, em geral, sobrepostas a outras irregularidades geométricas de dimensões com ordem de grandezas crescentes, decorrentes ainda da vibração relativa entre ferramenta cortante e a peça e também irregularidades que caracterizam os erros de forma da superfície. A rugosidade ou textura de superfícies de trabalho em mecânica de precisão afeta várias propriedades físicas do material como níveis de atrito, desgaste e tipo de lubrificação em peças de deslizamento, transmissão de calor, resistência mecânica entre outras.

A superfície real de uma peça trabalhada apresenta irregularidades geométricas resultantes de algum processo de fabricação que fazem com que elas sejam micrometricamente diferentes da superfície geométrica do projeto. Daí a necessidade de especificar limites para a rugosidade de superfície de precisão. Tomando-se uma pequena porção da superfície plana observam-se certos elementos que compõem a superfície. Estas irregularidades geométricas podem ser divididas em:

- Rugosidade ou textura primária,



- Ondulação ou textura secundária
- Erro de forma.

A forma geral da superfície, desprezando-se variações devido à rugosidade e ondulações, é mais conhecido como "erro de forma". As causas para tais problemas poderiam ser falta de rigidez da máquina ou na forma de fixação da peça, erros de deslocamentos de guias utilizadas para deslocar a ferramenta ou a peça quando o seu deslocamento não for perfeitamente linear, deformações do material da peça devido a tratamentos térmicos, etc. Erros de forma devido a estes tipos de causas poderiam gerar algumas ondulações. Ainda se considera, em proporções maiores, o erro de forma caracterizado pelos desvios da superfície em relação à forma geométrica. Exemplos: erros de planicidade, de cilindricidade e de esfericidade, considerados erros macro geométricos (CARPINETTI et al, 1996).

### **3.4.1 Form Talysurf**

O instrumento usado para a medição da rugosidade da bolacha de silício policristalino é o Perfilômetro Mecânico (Form Talysurf). Na figura 3.6 estão apresentados, de maneira esquemática, os componentes básicos desse instrumento.

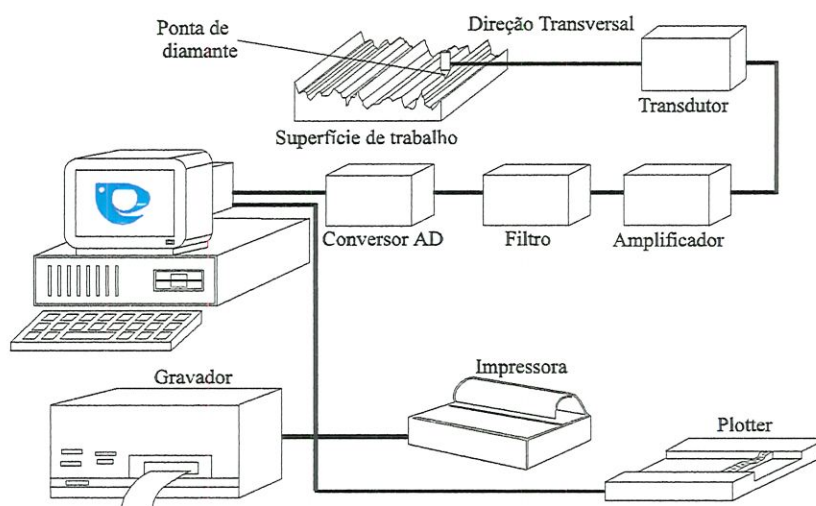


FIGURA 3.6 Componentes de um Rugosímetro (NOVASKI, 1994).

Os fatores de amplificação normalmente usados para amplificação vertical são de 500, 1000 e 2000 vezes, enquanto que para a amplificação horizontal os fatores são de 10, 100 e 500 vezes. Dessa forma, o sinal registrado pelo instrumento corresponde às irregularidades da superfície deformadas pelo fator de amplificação.

O apalpador é nominalmente tanto cônico com uma ponta esférica quanto de forma piramidal de quatro faces com o topo plano. Os apalpadores cônicos possuem um ângulo de cone de  $60^\circ$  ou  $90^\circ$  com raio de ponta menor do que  $10\mu\text{m}$  (geralmente menor do que  $2\mu\text{m}$ ). Um apalpador piramidal tem uma largura típica, no topo, de  $2\mu\text{m}$ . O tamanho finito da ponta do apalpador afeta a exatidão com a qual o perfil pode ser traçado de duas maneiras principais:

a) Penetração em vales: Em superfícies com vales profundos o apalpador, por causa de seu tamanho, pode não ser capaz de penetrar totalmente até à sua base (figura 3.7).

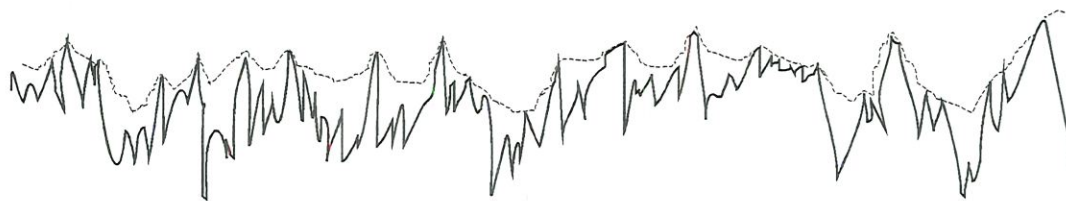


FIGURA 3.7 Impossibilidade de penetração do apalpador em vales estreitos  
(DAGNALL, 1986).

b) Reentrâncias que não podem ser traçadas (figura 3.8): Quando qualquer reentrância for encontrada pelo apalpador, a sua ponta irá perder o contato com o perfil e irá portanto, omitir esta característica no gráfico. Superfícies com asperezas em forma de reentrâncias existem principalmente com ferro fundido, materiais porosos e sinterizados, e esse é um dos motivos pelos quais a medição do Ra nestes materiais pode ser enganosa.

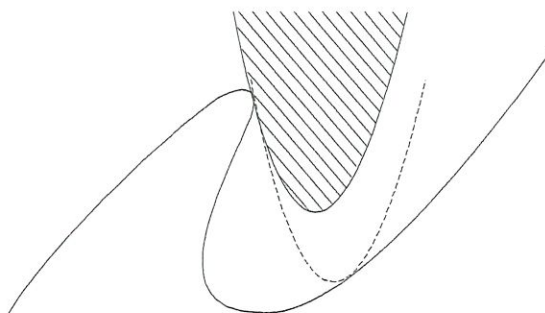


FIGURA 3.8 Impossibilidade de penetração do apalpador em reentrâncias  
(DAGNALL, 1986).

Os parâmetros estatísticos usados para quantificar a rugosidade podem ser genericamente classificados em:

- Parâmetros de amplitude: Linha de Referência, Rugosidade Média, Rugosidade Média Quadrática, Alturas de Picos e Vales.

- Parâmetros de Espaçamento,
- Parâmetros Híbridos.

Neste trabalho o parâmetro mais usado será a Rugosidade Média; por isso, esse parâmetro será aqui definido e explicado.

A rugosidade média ( $R_a$ ) é definida como a amplitude média do perfil em relação à linha de referência, sobre um comprimento do perfil correspondente à cada comprimento amostral considerado. Matematicamente a rugosidade média é expressa por:

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} \quad (10)$$

onde  $y_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , são pontos discretos ao longo do perfil. O valor de  $R_a$  corresponde à média dos valores calculados conforme a equação (3) para todos os comprimentos amostrais contidos no comprimento de medição. Um limitante para a utilização de  $R_a$  é o fato de ele ser um valor médio das amplitudes do perfil, independente da forma geral das ondulações. Além disso, esse parâmetro não faz distinção entre picos e vales, informação essa bastante importante em aplicações tais como superfícies de deslizamento. Um outro ponto importante de ser observado é que dependendo das ondulações contidas na superfície, o valor  $R_a$  variará dependendo do comprimento amostral utilizado. A Tabela 3.4 apresenta valores típicos de rugosidade  $R_a$  em diferentes aplicações (CARPINETTI et al, 1996; THE FORM TALYSURF SERIES - OPERATOR'S HANDBOOK).

TABELA 3.4 Exemplos de aplicação de rugosidade  $R_a$  [AGOSTINHO, 1977].

Rugosidade $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Exemplos de Aplicações
0.01	blocos padrão, guias de aparelhos de alta precisão, lentes para o espectro infravermelho, espelhos de ultraprecisão.
0.02	aparelhos de precisão, superfícies de medida em micrômetros e calibres de precisão
0.03	calibradores, elementos de válvula de alta pressão hidráulica
0.04	agulhas de rolamentos, superacabamento de camisa de bloco de motor.
0.05	pistas de rolamento, peças de aparelho de controle de alta precisão
0.06	válvulas giratórias de alta pressão, camisa de bolco de motor.
0.08	agulhas de rolamentos de grandes dimensões, colos de virabrequim

### 3.4.2 Interferômetro a laser

Um interferômetro é um instrumento composto de elementos ópticos convenientemente arranjados de modo que o fenômeno de interferência pode ser usado na medição de distâncias, velocidades, formas superficiais e texturas. Normalmente, um feixe de luz é dividido em dois feixes: feixe de referência e o feixe de medição (refletido de um alvo). Os diferentes caminhos percorridos pela frente de onda (geralmente a diferença do comprimento do trajeto) e as combinações construtivas ou destrutivas, dependem da diferença do comprimento do caminho. As franjas geradas podem ser fotodetectadas e eletronicamente contadas ou interpoladas. A figura abaixo mostra um interferômetro de Fizeau. Um feixe laser de Hélio-Neônio é expandido e colimado. O feixe de luz em abertura total colimado é parcialmente refletido pela superfície externa de um plano óptico. O feixe de luz remanescente desloca-se para ser refletido pelo corpo de teste, de onde retorna ao plano óptico para ser transmitido e interferir com parte do feixe refletido pelo plano de referência. Uma forma padrão de referência resulta da parte da frente da onda deslocando-se em diferentes distâncias antes de serem refletidos, observando a forma da superfície reflexiva.

O interferômetro de Fizeau é tipicamente usado para estimar planicidades de superfícies reflexivas (ou semi-reflexivas). Essa técnica não se reduz somente à medição do deslocamento através da contagem de franjas de um interferograma; envolve uma análise completa do interferograma como um todo através de uma inspeção visual por computador. Quando a superfície sob teste for perfeitamente plana e paralela com o plano óptico, duas frentes de ondas são perfeitamente superpostas resultando em um padrão de interferência de intensidade uniforme, onde nenhuma franja pode ser observada. Se a superfície é plana, porém levemente inclinada em relação a um plano óptico de teste aparecerá um conjunto de linhas igualmente espaçadas e franjas paralelas, onde o espaçamento das franjas será proporcional à inclinação. Para outros perfis, o interferograma se apresentará como um conjunto de linhas remontando um mapa topográfico. Se a superfície rotacionar

ao redor de um eixo definido, as franjas talvez possam ou não rotacionar dependendo do seu alinhamento com relação ao eixo óptico e à normal à superfície de teste. Isso pode ser usado no arranjo e calibração de uma máquina de precisão tão bem quanto no controle do processo (figura 3.9) (LÊDO H.O., 1997).

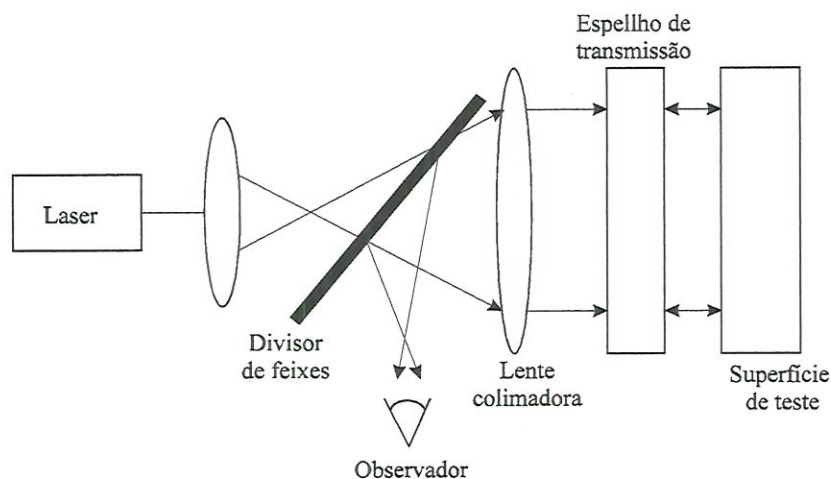


FIGURA 3.9 Interferômetro de Fizeau (DUDUCH, J.G., 1983).

Como todos os sistemas de medida de precisão, o interferômetro a laser Wiko 6000 representa uma nova geração de instrumentos para testes ópticos. Baseado em princípios de interferometria com mudança de fase, o Wiko 6000 trabalha com uma qualidade superficial e transmissão de dados de frente de onda tais, que pode ser usado com alto grau de confiança. Os interferômetros tradicionais de Fizeau, frequentemente, não produzem um bom nível de exatidão e podem danificar a amostra através do contato com a superfície de referência. Os sistemas de Fizeau com uma fonte de laser interna aumenta a exatidão e elimina a necessidade do contato. O interferômetro a laser foi desenvolvido para abastecer a crescente demanda de um critério mais rigoroso de avaliação no campo da metrologia óptica de precisão. Com o interferômetro a laser se avalia a qualidade de superfícies planas, esféricas, cilíndricas ou anesféricas quase que instantaneamente com alta exatidão e repetibilidade [ USER'S MANULA FOR THE WYKO 6000, 1988).

---

### 3.5 Integridade Superficial e Subsuperficial

Numa era de grande expansão tecnológica, os cientistas devem observar, analisar e explicar corretamente os fenômenos que ocorrem numa escala micrométrica ( $\mu\text{m}$ ) ou submicrométrica.

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

#### 3.5.1 Microscópio Eletrônico de Varredura

O Microscópio Eletrônico de Varredura (M.E.V) é um dos instrumentos mais versáteis para a avaliação e análise das características microestruturais de objetos sólidos. A principal razão para o M.E.V. ser grandemente usado é a alta resolução que se obtém quando se examinam objetos grandes; valores na ordem de 2 a 5 nm são usualmente cotados para alguns instrumentos comerciais enquanto que para instrumentos de pesquisa avançados são alcançados resoluções melhores que 1nm. Uma outra característica importante do M.E.V. é a aparência tridimensional da imagem do espécime estudado, um resultado direto da grande



---

profundidade de campo de atuação do feixe de elétrons (GOLDSTEIN J.I. et al, 1992). Todo microscópio eletrônico emprega um feixe de elétrons como princípio de funcionamento; a forma como este feixe é usado para se obter a imagem é o que diferencia o tipo de microscópio. No microscópio de varredura o feixe é empregado diretamente sobre a amostra.

O equipamento de MEV consiste basicamente de duas partes essenciais: o gabinete de comando que fornece acesso a todos os tipos de comandos e ajustes necessários ao funcionamento, e o microscópio onde encontra-se o canhão de elétrons, onde o feixe eletrônico é gerado, a câmara de amostras, os detetores e todo o sistema de vácuo (RODRIGUES, S.G., 1997).

Um dos aspectos mais surpreendentes do M.E.V. é a facilidade aparente com que as imagens podem ser interpretada por qualquer observador. Essa é uma das mais importantes razões para a utilidade e grande aceitação do instrumento.

O primeiro passo a ser feito para obtenção de imagens é localizar um pequeno defeito e focá-lo em alta magnificação. Assim como nas imagens dos microscópios ópticos, após a imagem do MEV ser focada em alta amplificação, ela está em foco para qualquer magnificação mais baixa desde que a posição das lentes objetivas não tenham mudado (RODRIGUES, S.G., 1997; GOLDSTEIN J.I. et al, 1992). Pode-se gerar imagens com dois sinais diferentes, elétrons secundários e elétrons retro espalhados. No detetor de elétrons secundários (SE), os elétrons são impulsionados em direção a um cintilador, cuja fina camada de alumínio que o recobre possui um potencial de aproximadamente 10kV. Ao se chocarem com o cintilador, os elétrons produzem luz que será amplificada a partir de uma fotomultiplicadora para criar um sinal elétrico que eventualmente irá modular a intensidade de um tubo de raios catódicos, formando uma imagem.

---

Neste trabalho o M.E.V auxilia no estudo da superfície da bolacha de silício policristalino na usinagem com ferramenta de ponta única de diamante. O Microscópio Eletrônico de Varredura mostrará com clareza as trincas remanescentes no silício, prováveis trincas e crateras ocorridas devido ao processo de usinagem, e também irá auxiliar no estudo da região do ombro não cortado para se investigar uma condição de usinabilidade para o silício policristalino. A amostra de silício policristalino foi limpa com acetona comum, tomando o cuidado de não comprometer a integridade da bolacha. Para assegurar um bom contato elétrico, passo-se um traço de tinta condutora desde a amostra de silício até o porta amostra. A ferramenta de diamante, antes de ser analisada, foi recoberta com fina camada de material condutor, neste caso, ouro. A figura 3.10 mostra o esquema de um Microscópio Eletrônico de Varredura. Na figura: 1) Canhão Eletrônico, 2) Cilindro de Wehnelt, 3) Ânodo, 4) Bobinas de alinhamento do feixe, 5) Lentes eletromagnéticas (condensadoras), 6) Lente objetiva.

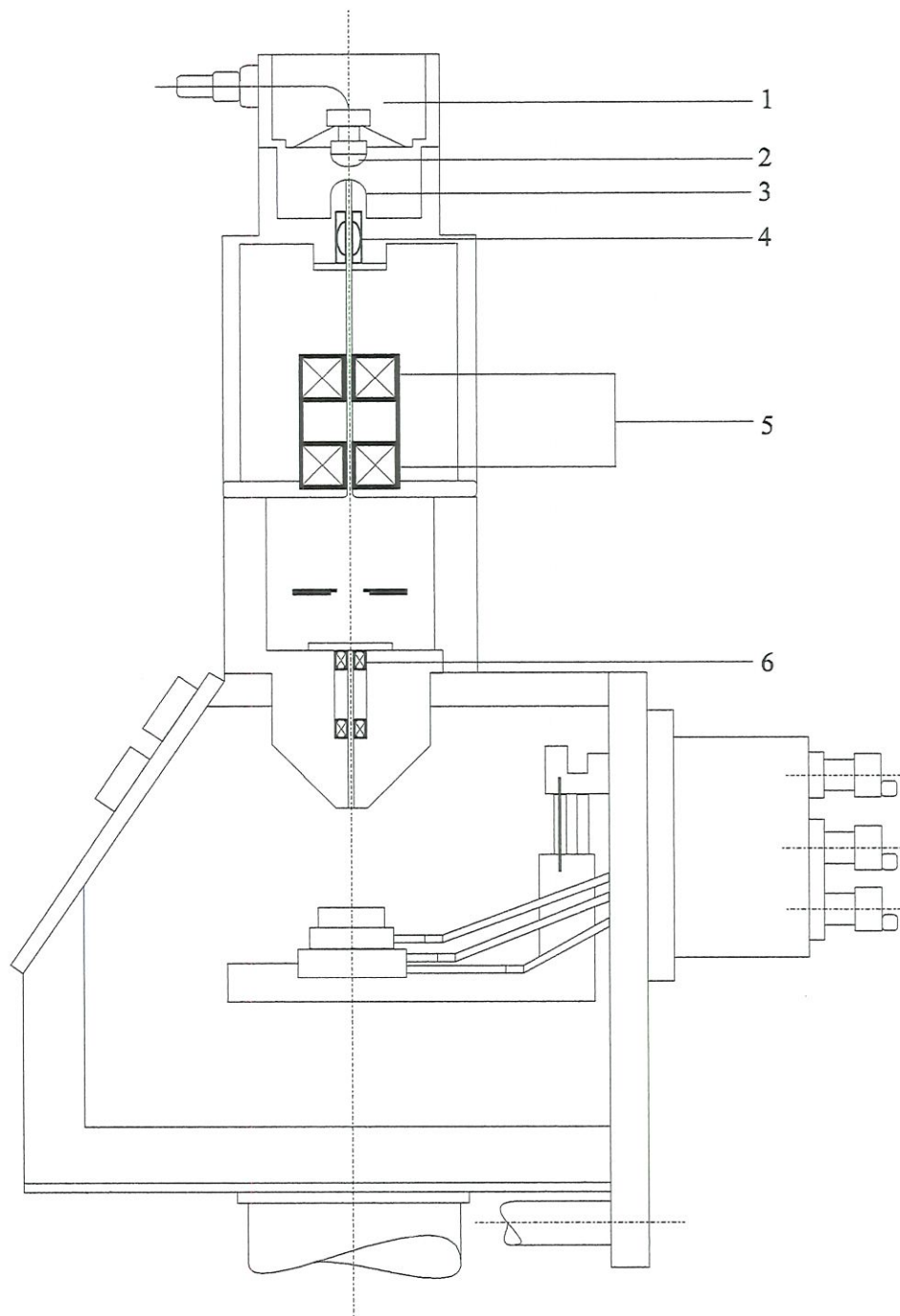


FIGURA 3.10 Esquema de um equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura  
(M.E.V.)

---

## Capítulo 4

### Resultados e Discussões

#### 4.1 Análise das crateras remanescentes

Para se fazer os ensaios de torneamento do silício policristalino usou-se as seguintes condições de corte:

ferramenta:  $R = 1,13\text{mm}$ , ângulo de saída =  $-5^\circ$ .

faceamento,  $f = 2,5\mu\text{m/rev.}$ ,  $d = 250\mu\text{m}$ .

corte interrompido,  $f = 2,5, 3,0, 3,5, 4,0, 4,5, 5,0, 7,0, 10,0\mu\text{m/rev.}$ ,  $d = 10\mu\text{m}$ .

No silício policristalino, a profundidade de corte não afetou a qualidade superficial da superfície usinada, pois não se verificou a introdução de danos. O que se verifica nas microscopias são crateras remanescentes do processo de serragem da bolacha de silício que não foram retiradas no processo de usinagem, pois estão numa profundidade muito maior do que a usada no processo.

Nas figuras abaixo, serão mostradas as crateras remanescentes de outros processos.

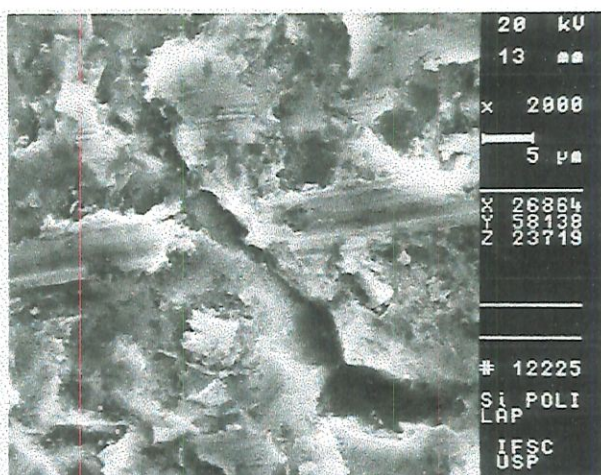


FIGURA 4.1 Microscopia eletrônica de varredura (M.E.V.) da superfície serrada da bolacha de silício policristalino. A figura mostra marcas de serra e cratera residual introduzida no processo de serragem, 2000x.

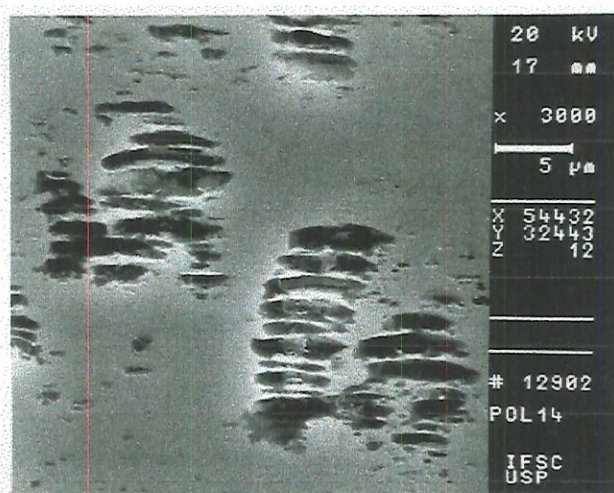


FIGURA 4.2 Microscopia da bolacha de silício policristalino onde percebe-se que as trincas residuais não foram retiradas, pois a profundidade de corte é inferior à profundidade de crateras remanescentes - 3000x,  $f = 2,5\mu\text{m}/\text{revolução}$ ,  $R = 1,13665\text{ mm}$ ,  $d = 210\mu\text{m}$ .

## 4.2 Análise da superfície

Nas figuras a seguir será mostrada a usinabilidade da bolacha de silício policristalino em corte com  $d = 10\mu\text{m}$ ,  $f = 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 7,0$  e  $10\mu\text{m/revolução}$ . A figura 4.3 mostra a região do ombro não cortado mostrada através de micrografia e esquema;

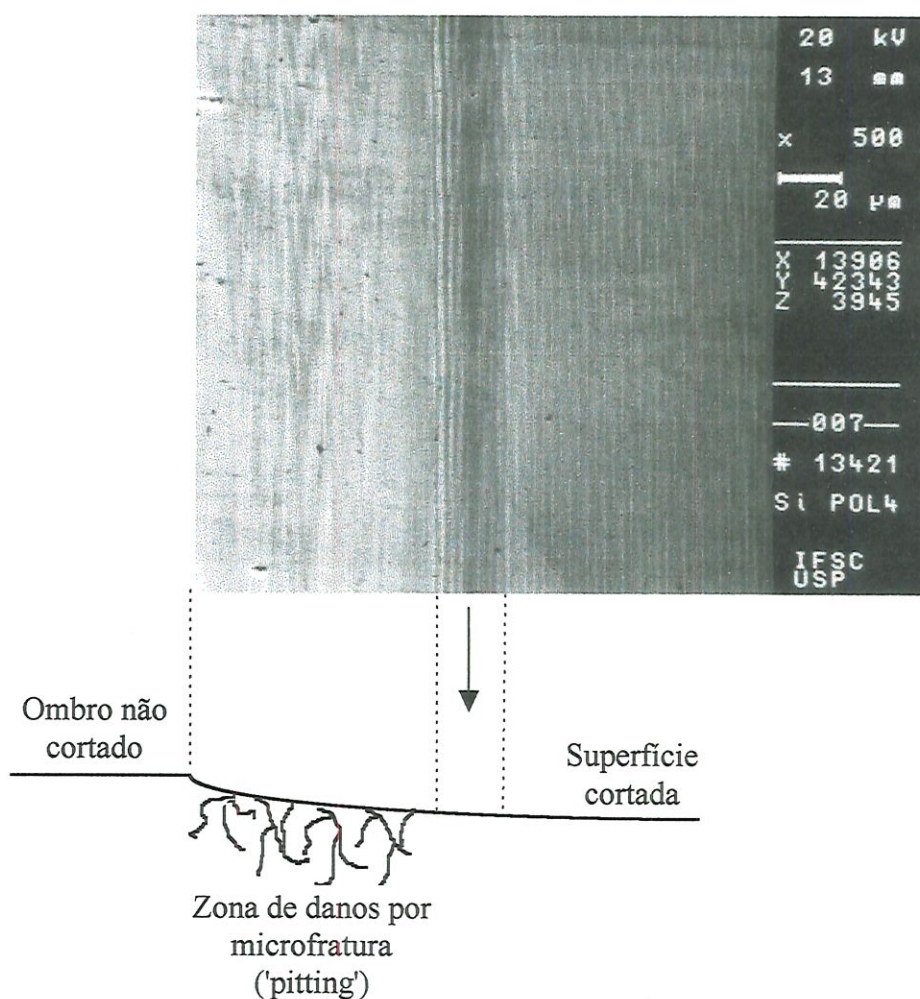


Figura 4.3 Micrografia mostrando a região do ombro produzido durante o ensaio de corte interrompido.

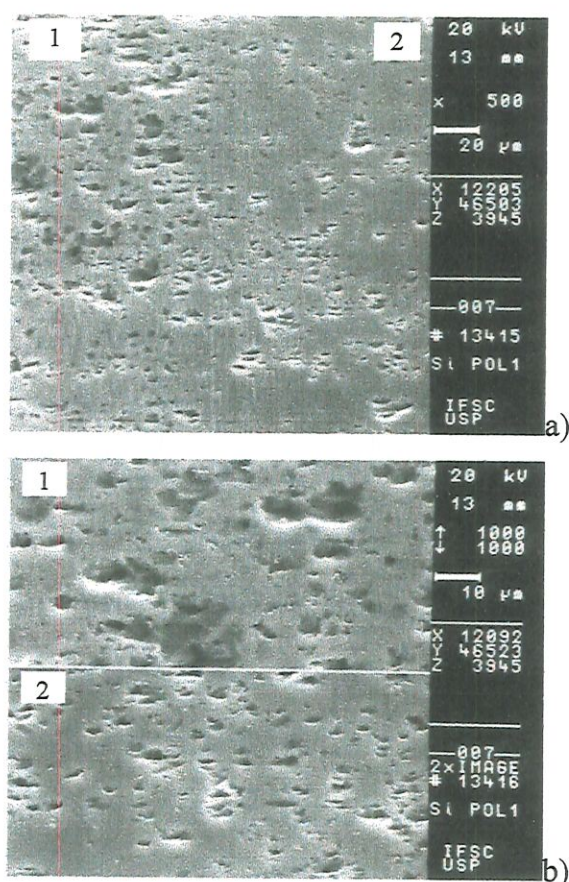


FIGURA 4.4 A figura mostra foto em duas partes: a) região do ombro não cortado, 500x e b) micrografia dupla que mostra detalhe da região não usinada (1) e da região usinada (2) 1000x;  $f = 10\mu\text{m}/\text{revolução}$ ,  $d = 10\mu\text{m}$ ,  $R = 1,13\text{mm}$ .

A figura 4.4 mostra que com um avanço de  $f = 10\mu\text{m}/\text{rev}$ . as microfaturas causadas na peça são tão grandes que quase não se nota a diferença entre as regiões cortada (figura 4.4b) 2) e não cortada (figura 4.4b)1). No torneamento do silício policristalino, o corte dúctil para este avanço não foi verificado e a superfície da peça ficou totalmente danificada.

Na figura 4.4 a) e b) notam-se severos pitting, que são danos introduzidos através de microfaturas.

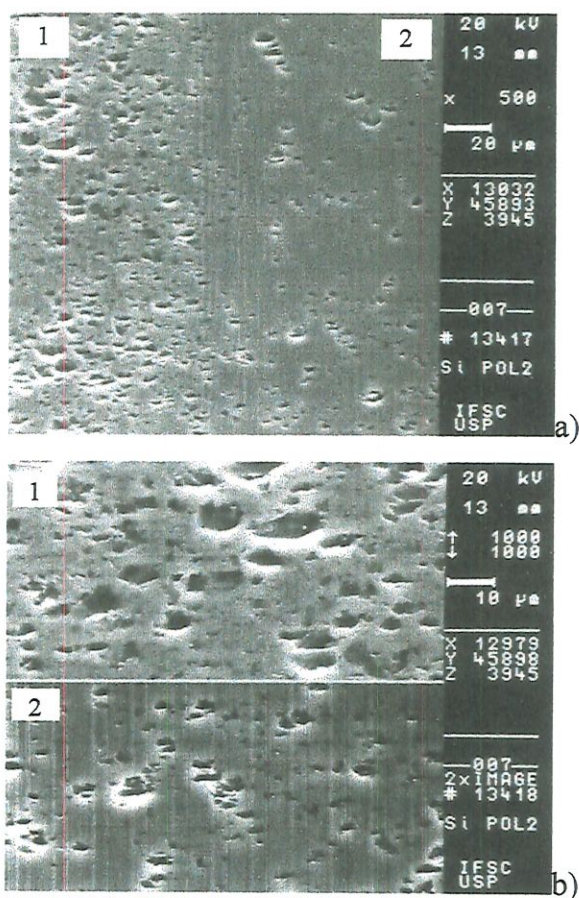


FIGURA 4.5 Usinabilidade do silício policristalino com  $f = 7,0\mu\text{m}/\text{revolução}$   $d = 10\ \mu\text{m}$   
 $R = 1,13\text{mm}$ , a) 500x e b)1000x

Na figura 4.5a) nota-se nitidamente na região usinada 2 que com um avanço de  $7,0\mu\text{m}/\text{rev}$ . não se consegue o corte dúctil pois ainda se observam severos pits na superfície da peça de silício policristalino, ainda que em menor quantidade.



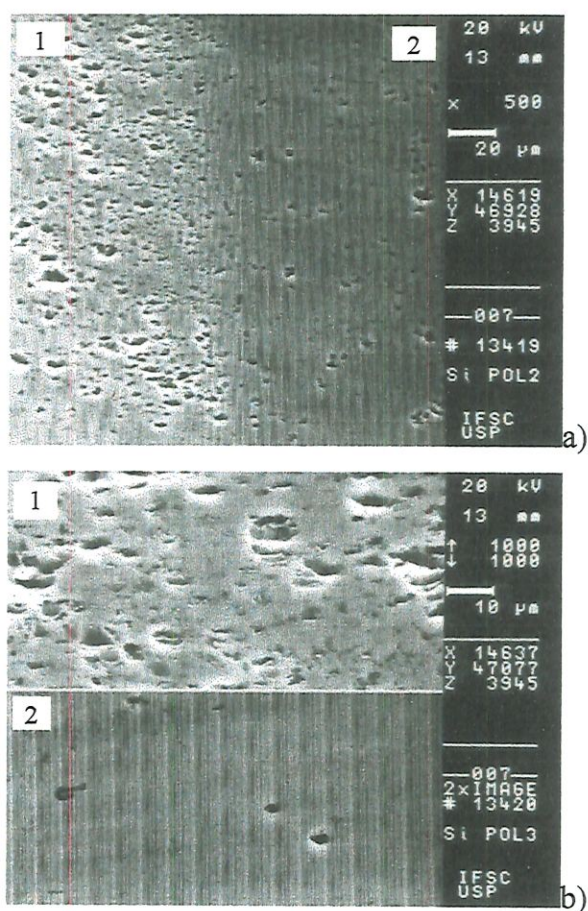


FIGURA 4.6 A figura mostra a superfície usinada do silício policristalino com  $f = 5,0\mu\text{m}/\text{revolução}$ ,  $d = 10\mu\text{m}$ ,  $R = 1,13\text{mm}$ , a) 500x e b) 1000x

Com a diminuição do avanço para  $f = 5,0\mu\text{m}/\text{rev.}$ , a quantidade de pits na superfície do silício atingida pelo feixe de elétrons do M.E.V. diminuiu consideravelmente em relação ao avanço de  $f = 7,0\mu\text{m}/\text{rev.}$ , porém ainda não se verificou a usinagem dúctil.

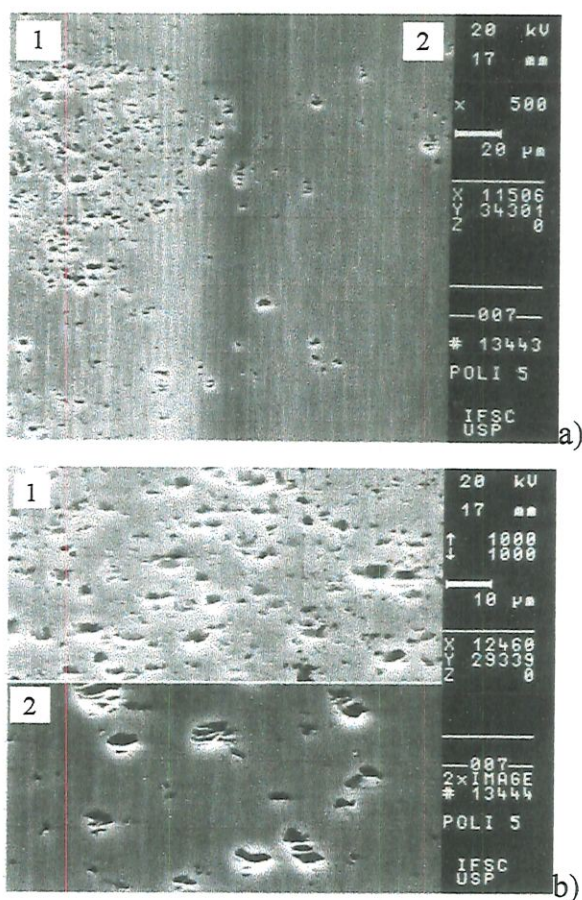


FIGURA 4.7 Usinabilidade do silício policristalino com  $f = 4,5\mu\text{m}/\text{rev}$ ,  $d = 10\mu\text{m}$ ,  $R = 1,13\text{mm}$ , a) 500x e b) 1000x.

Na figura acima verifica-se uma diminuição ainda maior na quantidade de pits causados por fratura frágil na superfície da peça. Porém, numa inspeção visual para este avanço de  $f = 4,5\mu\text{m}/\text{rev}$ ., percebeu-se que a superfície da peça já apresenta uma textura especular (usinagem dúctil) sem a ocorrência de danos superficiais consideráveis.

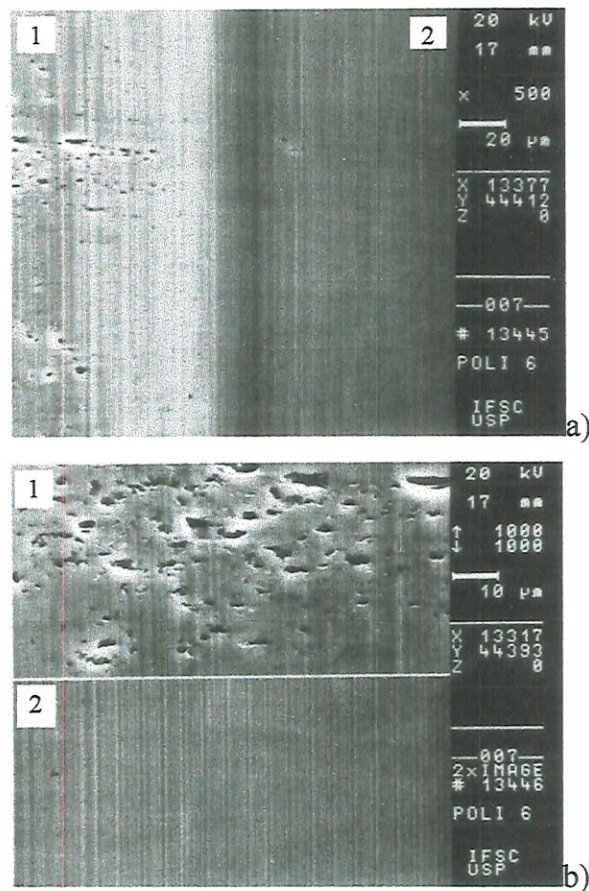


FIGURA 4.8 Superfície do silício policristalino com  $f = 4,0 \mu\text{m}/\text{rev}$ ,  $d = 10 \mu\text{m}$ ,  $R = 1,13\text{mm}$ , a) 500x e b) 1000x.

Observando-se a figura 4.8b) verifica-se que na superfície da peça na parte usinada existem ranhuras equidistantes umas das outras sem a ocorrência de pits. Portanto, com o avanço de  $f = 4,0 \mu\text{m}/\text{rev}$ . verifica-se a usinagem totalmente dúctil do silício policristalino.

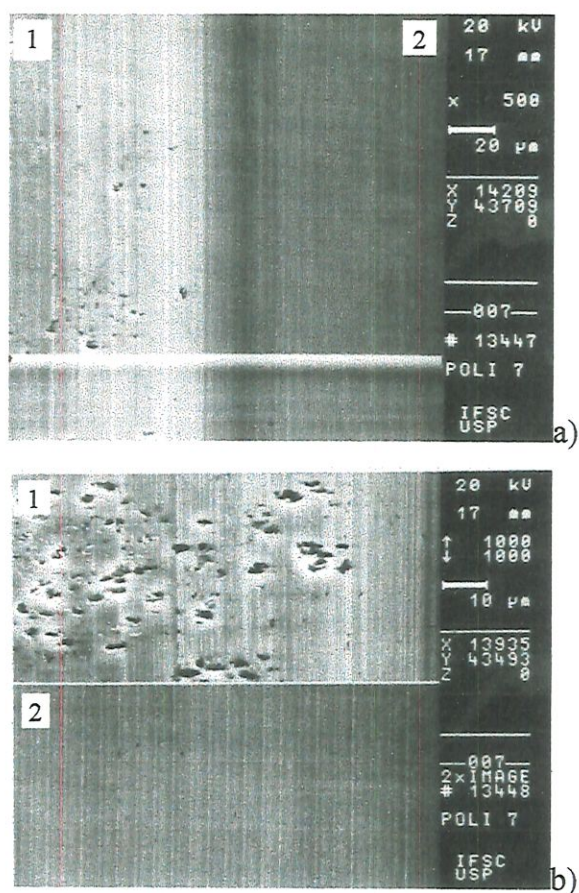


FIGURA 4.9 Superfície do silício policristalino com  $f = 3,5\mu\text{m}/\text{rev}$ ,  $d = 10\mu\text{m}$ ,  $R = 1,13\text{mm}$ , a) 500x e b) 1000x

Com  $f = 3,5\mu\text{m}/\text{rev}$ , a usinagem dúctil se confirma. Na figura 4.9a) na região do ombro não cortado o número de pitting diminui, verificando-se uma linha de transição de danos bem definida. Na figuras seguintes 4.10 e 4.11 esse resultado se confirma, apenas se verificando visualmente uma melhora na qualidade especular à medida que se diminui o avanço.

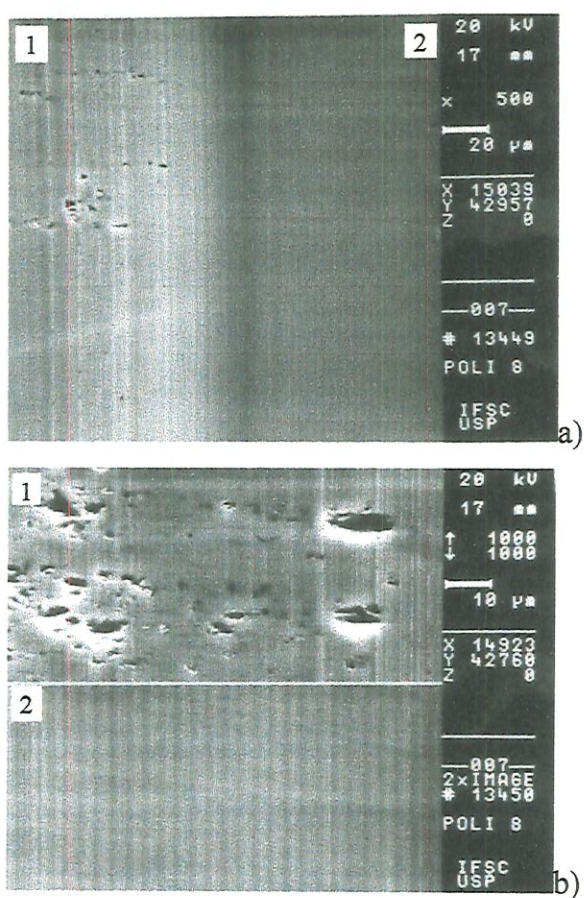


FIGURA 4.10 Superfície do silício policristalino com  $f = 3,0\mu\text{m}/\text{rev}$ ,  $d = 10\mu\text{m}$ ,  
 $R = 1,13\text{mm}$ , a) 500x e b) 1000x.

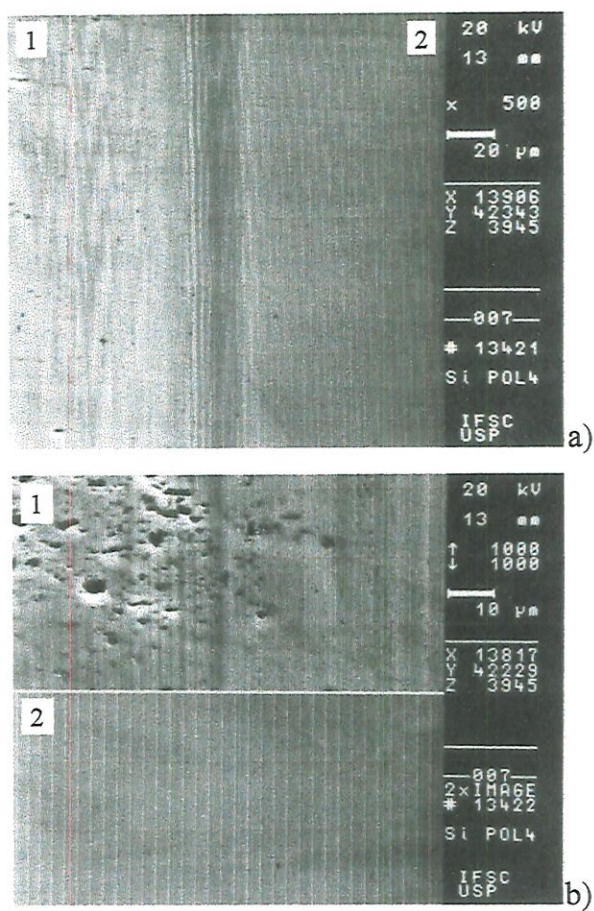


FIGURA 4.11 A figura mostra a usinagem na bolacha de silício policristalino com  $f = 2,5 \mu\text{m}/\text{revolução}$ ,  $d = 10 \mu\text{m}$ ,  $R = 1,13\text{mm}$ , a) 500x e b) 1000x.

### 4.3 Análise da Rugosidade

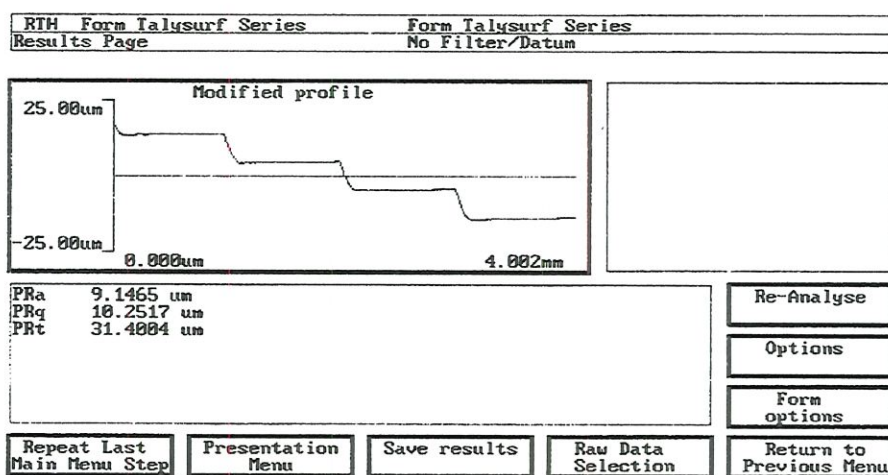


FIGURA 4.12 Figura que mostra a escada feita na formação dos ombros. Cada degrau apresenta  $10\mu\text{m}$  que é o valor da profundidade de corte usada nos ensaios.

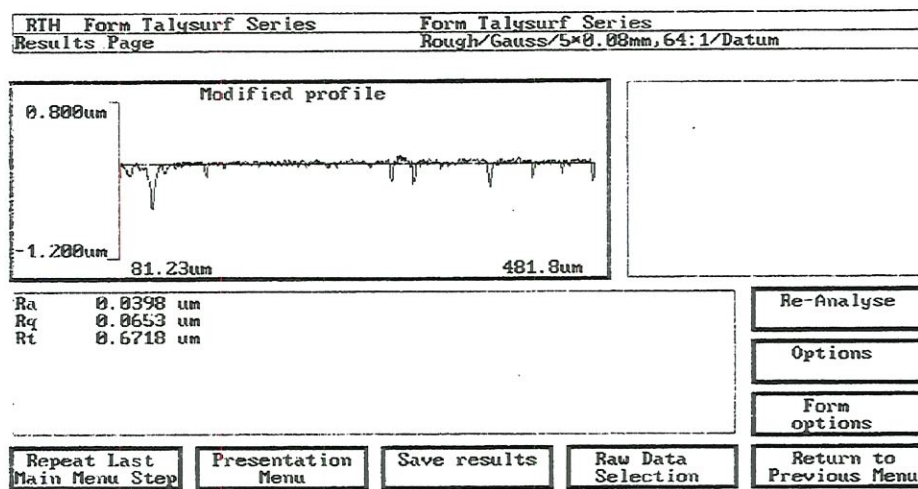


FIGURA 4.13 Perfil da rugosidade do silício policristalino;  $f = 10 \mu\text{m}/\text{revolução}$ ,  $d = 10 \mu\text{m}$ ,  $R = 1,13\text{mm}$ ,  $R_a = 39,8\text{nm}$ .

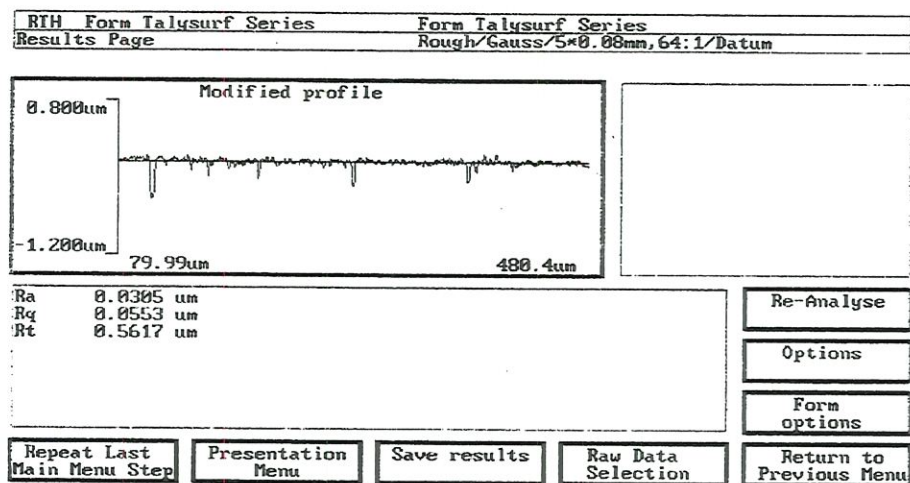


FIGURA 4.14 Perfil da rugosidade do silício policristalino;  $f = 7,0 \mu\text{m}/\text{revolução}$ ,  $d = 10 \mu\text{m}$ ,  $R = 1,13\text{mm}$ ,  $R_a = 30,5\text{nm}$ .



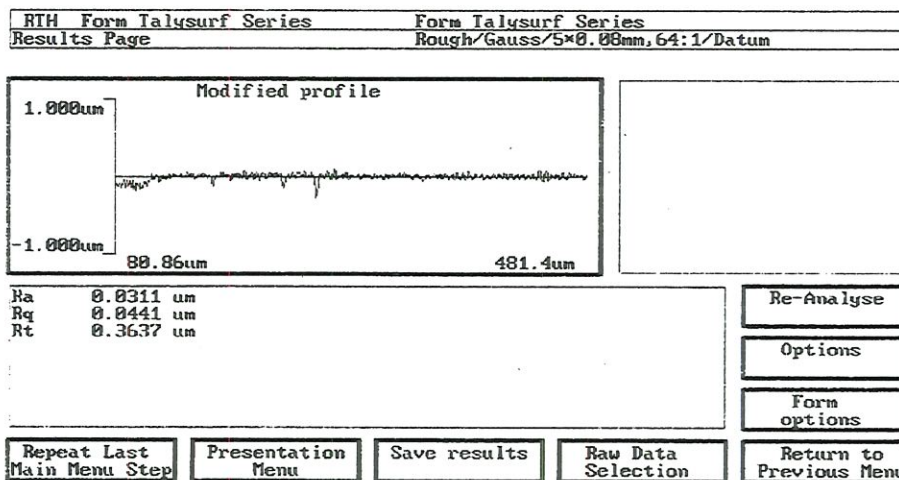


FIGURA 4.15 Perfil da rugosidade no silício policristalino;  $f = 5,0\mu\text{m}/\text{revolu\c{c}\tilde{a}o}$ ,  $d = 10\mu\text{m}$ ,  $R = 1,13\text{mm}$ ,  $R_a = 31,1\text{nm}$ .

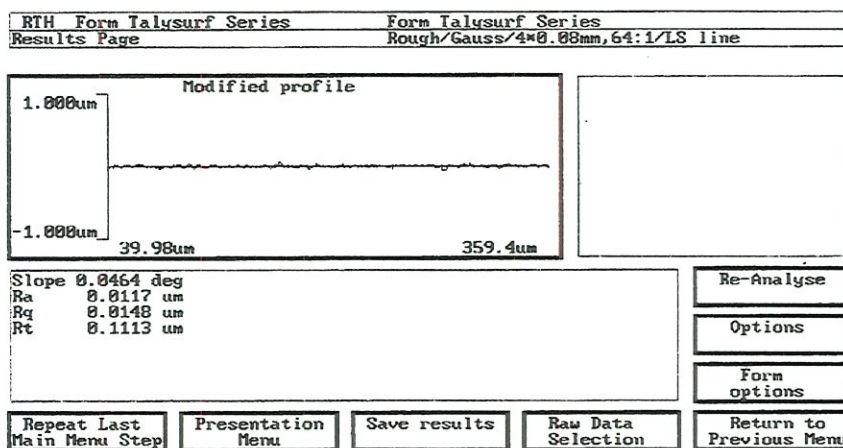


FIGURA 4.16 Perfil da rugosidade para o silício policristalino;  $f = 4,5\mu\text{m}/\text{rev}$ ,  $d = 10\mu\text{m}$ ,  $R = 1,13\text{mm}$ ,  $R_a = 11,7\text{nm}$ .

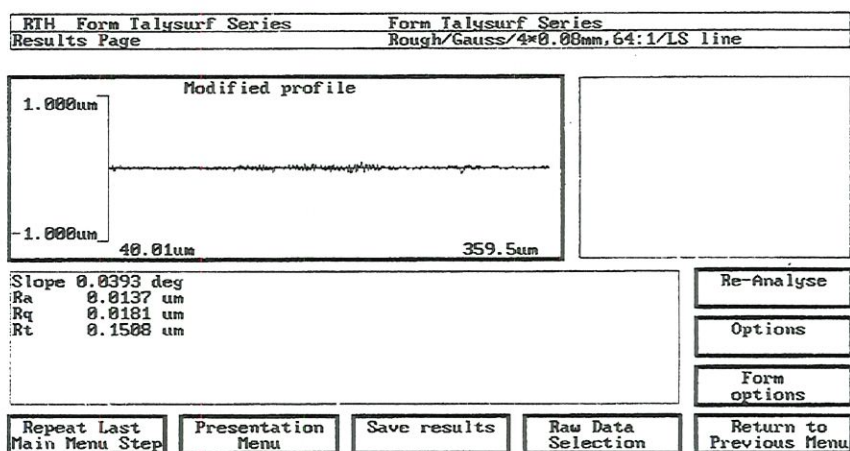


FIGURA 4.17 Perfil da rugosidade para o silício policristalino;  $f = 4,0\mu\text{m}/\text{rev}$ ,  $d = 10\mu\text{m}$ ,  $R = 1,13\text{mm}$ ,  $R_a = 13,7\mu\text{m}$ .

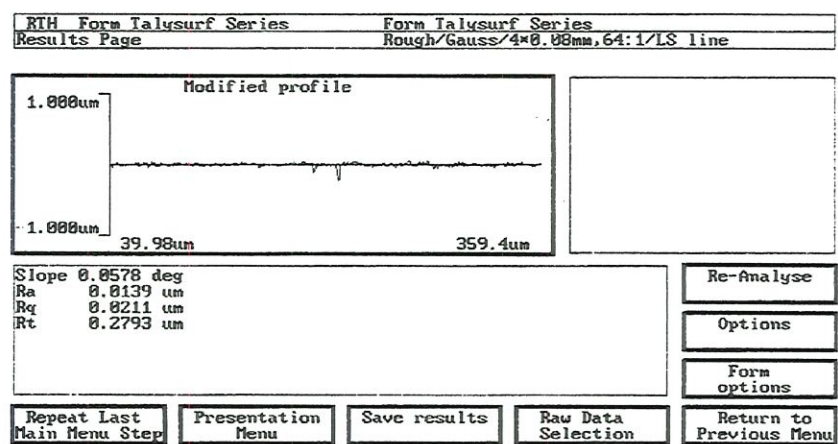


Figura 4.18 Perfil da rugosidade para o silício policristalino;  $f = 3,5\mu\text{m}/\text{rev}$ ,  $d = 10\mu\text{m}$ ,  $R = 1,13\text{mm}$ ,  $R_a = 13,9\text{nm}$ .

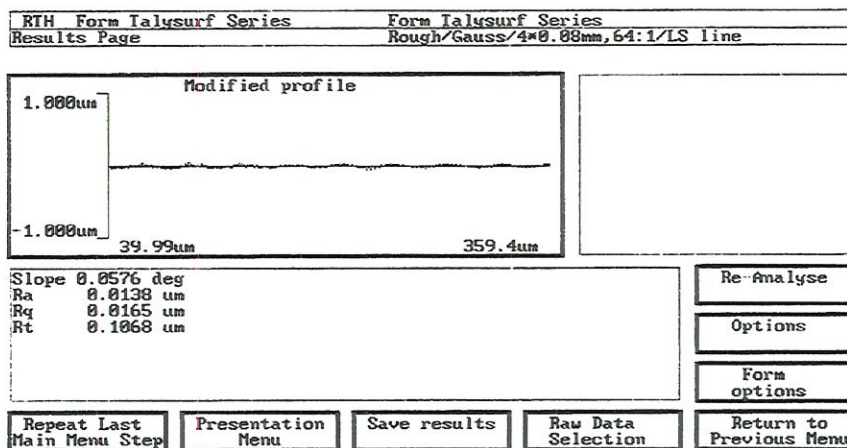


FIGURA 4.19 Perfil da rugosidade para o silício policristalino;  $f = 3,0\mu\text{m}/\text{rev}$ ,  $d = 10\mu\text{m}$ ,  $R = 1,13\text{mm}$ ,  $R_a = 13,8\text{nm}$ .

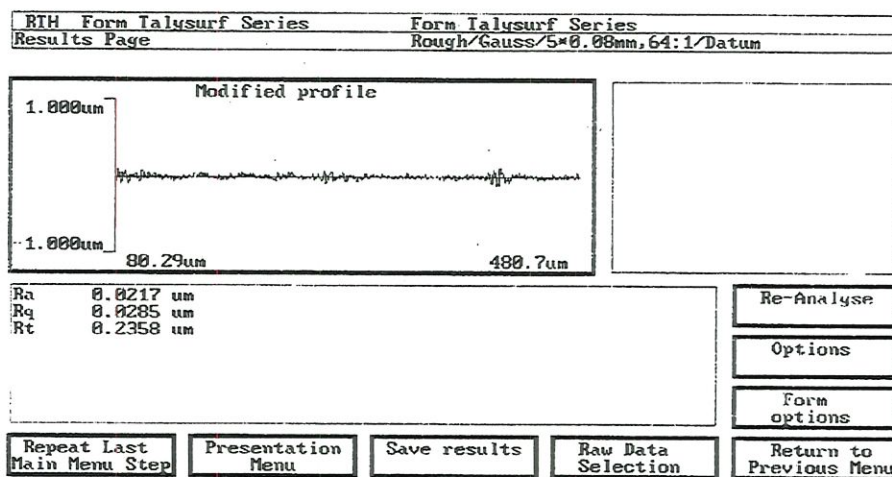


FIGURA 4.20 Perfil da rugosidade do silício policristalino;  $f = 2,5\mu\text{m}/\text{revolução}$ ,  $d = 10\mu\text{m}$ ,  $R = 1,13\text{mm}$ ,  $R_a = 21,7\text{nm}$ .

## 4.4 Discussões

Observando-se as micrografias do Microscópio Eletrônico de Varredura mostrados no item acima, verifica-se a diminuição do número de "pittings" que são os danos introduzidos através de microfraturas devido à diminuição do avanço.

Vale ressaltar que para cada um dos avanços usados se estudou a região do ombro não cortado e a diferença entre regiões dúcteis e frágeis.

Neste trabalho feito com o silício policristalino o comportamento verificado na análise do torneamento com ferramenta de diamante foi o mesmo que é conhecido na literatura para o silício monocristalino. Ou seja, quando a usinagem dúctil acontece são verificadas ranhuras na superfície da peça sem a ocorrência de "pitting". À medida que se diminui o avanço os "pits" também diminuem em quantidade e tamanho já que a espessura crítica de corte ( $t_c$ ) é tal que as microfraturas não ultrapassam a linha de corte sendo retiradas em cortes subseqüentes (modelo de Blake).

Na figura 4.4 onde o avanço usado foi  $f = 10\mu\text{m}/\text{revolução}$ , não se verificou a usinagem dúctil; a figura mostra severos "pitting" ocorridos devido à formação de microfraturas.

A partir de  $f = 4,0\mu\text{m}/\text{revolução}$  (figura 4.8) a usinagem dúctil, que se caracteriza pela formação de ranhuras, é visível e verificada. Nesta figura, a transição dúctil para frágil na região do ombro está bem definida.

A figura 4.12 mostra o valor da altura dos degraus, medidas na Form Talysurf; cada degrau tem uma altura de  $10\mu\text{m}$ , que é o valor da profundidade de corte usada para cada teste de corte interrompido. Porém, a profundidade de corte não afeta a usinabilidade do silício policristalino. No início dos testes a bolacha foi desbastada com uma profundidade de corte de  $250\mu\text{m}$  e  $f = 2,5\mu\text{m}$ , onde se verificou o acabamento espelhado na superfície da peça.

Nos testes de rugosidade na peça serrada  $R_a = 0,6609\mu\text{m}$  e  $R_q = 0,8273\mu\text{m}$ . Na região usinada as rugosidades verificadas são bem menores já que a superfície da peça

apresenta uma excelente integridade. Na região usinada as rugosidades podem variar com a diminuição do avanço, porém se conservam na ordem de nanômetros bem abaixo dos valores apresentados acima para o caso da superfície serrada. Com o avanço  $f = 10\mu\text{m}/\text{revolução}$ ,  $R_a = 39,8\text{nm}$  e  $R_q = 65,3\text{nm}$ . Com a diminuição do avanço, a rugosidade também diminui chegando a níveis aceitáveis com o avanço de  $f = 4,5\mu\text{m}/\text{revolução}$ . Em avanços menores que  $4,5\mu\text{m}/\text{revolução}$  as rugosidades permaneceram constantes e em níveis aceitáveis.

No torneamento com ferramenta de diamante do silício policristalino verificou-se que para avanços abaixo de  $4,0\mu\text{m}/\text{revolução}$  a superfície da peça torna-se especular independente da profundidade de corte usada com excelente qualidade superficial e subsuperficial. Para avanços acima de  $4,5\mu\text{m}/\text{revolução}$ , é verificada uma superfície sem qualidade especular, pois nesta região não se verificou a usinagem dúctil. A qualidade especular é essencial a aplicações futuras, já que o silício policristalino é usado na fabricação de lentes.

Portanto para se ter uma bolacha de silício policristalino com excelente qualidade superficial e subsuperficial livre de trincas e microfraturas para uma posterior aplicação óptica recomenda-se fazer o torneamento deste material com avanços que não ultrapassem  $4,5\mu\text{m}/\text{revolução}$ , com ferramenta de diamante nova e ângulo de saída negativo

Neste caso o avanço crítico à formação de trincas verificado foi  $4,5\mu\text{m}/\text{revolução}$ . Neste avanço  $t_{ef} = t_c$ , que define a condição de transição da fratura.

Segundo alguns pesquisadores como BLAKE (1990), existe um processo limite para a usinagem no regime dúctil de silício monocristalino e germânio. Para dadas condições o valor do avanço crítico  $f_0$  corresponde ao início da formação de "pitting" na superfície acabada. Esse valor varia de  $f_0 = 3,8\mu\text{m}/\text{rev}$  a  $f_0 = 6,6\mu\text{m}/\text{rev}$  dependendo da geometria da ferramenta usada. Esses valores foram confirmada pela observação da iniciação de "pitting" em testes de torneamento com corte interrompido. No caso estudado por Blake, para se conseguir uma alta qualidade superficial na tecnologia de

manufatura do silício monocristalino, o avanço usado não deve ultrapassar o valor crítico  $f_0$ .

Apesar do silício policristalino ter sido testado com a variação de apenas um parâmetro de corte, verificou-se que este valor de  $f_0$  está na ordem de  $4,5\mu\text{m/rev}$ .

---

## Capítulo 5

### Conclusão

Com o objetivo de estudar a usinabilidade do silício policristalino e determinar experimentalmente a transição frágil-dúctil para o torneamento de ultraprecisão deste material, esse trabalho mostrou as várias aplicações do silício policristalino para o uso no espectro infravermelho.

Os anos 90 são caracterizados pelo domínio da tecnologia de usinagem de elementos ópticos transmissivos em materiais de comportamento frágil, a fabricação de elementos ópticos para pequenos comprimentos de onda e a produção de micropeças.

O torneamento com ferramenta de diamante do silício policristalino foi considerado uma opção viável à produção de superfícies com alta qualidade óptica (esféricas e anesféricas) como uma alternativa ao uso dos processos tradicionais como a lapidação, o polimento e a retificação.

A lapidação oferece vantagem econômica em processos de grande volume quando são usados abrasivos baratos, além disso é feita quando são exigidos requisitos rigorosos em relação à planicidade e dimensões da peça. A rugosidade superficial na lapidação de materiais frágeis é da ordem de  $R_a = 14\mu\text{m}$  com baixa taxa de remoção de material, sendo necessário um polimento posterior para se conseguir acabamento espelhado com rugosidade na ordem de nanômetros.

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

A técnica de polimento mecânico química é a mais eficiente em termos de taxa de remoção de material. Apesar disso, existem algumas desvantagens relacionadas a esta técnica tais como: alto custo, produtividade limitada, etc.

Para se fazer uma retificação no regime dúctil de material frágil é necessário se fazer um estudo da correlação entre os parâmetros de exatidão superficial final e o desempenho óptico, uma análise das condições superficiais, redução e isolamento de calor e vibrações, seleção do material de trabalho e fixação da peça.

Por causa da natureza bem caracterizada da ferramenta de ponta única de diamante comparado com a retificação, o processo de torneamento do silício policristalino com ferramenta de ponta única de diamante foi estudado em detalhes neste trabalho.

Foram apresentados dois modelos de corte do processo de torneamento em regime dúctil estudados por Blake e Blackley através de observações da transição dos danos por microfraturas em ensaio de corte interrompido na região do ombro não cortado.

Na parte experimental do trabalho foram feitos ensaios com corte interrompido em silício policristalino, já que os materiais policristalinos são mais fáceis de serem encontrados e são mais baratos que os monocristais.

Para se fazer o torneamento com ferramenta de diamante usou-se uma bolacha de silício policristalino com diâmetro de 50mm, serrado com uma espessura de 5mm. A ferramenta usada tem  $R = 1,13665\text{mm}$ , ângulo de saída =  $-5^\circ$  e ângulo de folga =  $12^\circ$ ; a máquina-ferramenta utilizada foi o torno de ultraprecisão ASG 2500 Rank Pneumo.

Para se fazer a análise da integridade superficial do silício usou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura que é um dos instrumentos mais versáteis para a avaliação e análise das características microestruturais dos objetos sólidos.

Para se analisar a topografia da peça usou-se o Form Talysurf para a medição de rugosidades. Com esses equipamentos se consegue fazer de forma correta a análise da superfície da bolacha de silício policristalino para se verificar a usinabilidade desse material.



Usando-se vários avanços em testes de corte interrompido, verificou-se que para avanços abaixo de  $4,0\mu\text{m}/\text{rev}$ . a superfície torna-se especular independente da profundidade de corte usada e desgaste da ferramenta com excelente qualidade superficial e subsuperficial. A qualidade especular é essencial na fabricação de lentes.

Portanto verificou-se neste trabalho que para se ter uma superfície de silício policristalino com excelente qualidade sem danos internos o avanço crítico à iniciação de fraturas usado é  $f_0 = 4,5\mu\text{m}/\text{rev}$ ., com ferramenta nova, ângulo de saída negativo de  $-5^\circ$  e uma máquina-ferramenta de altíssima precisão.

Para se fazer o cálculo de  $t_c$  usou-se a equação (3) com  $f = 4,5\mu\text{m}/\text{rev}$ ,  $R = 1,13665\text{mm}$ ,  $z \cong 30\mu\text{m}$ .

Nestas condições  $t_c = 137\text{nm}$ .

Quando  $t_{ef} < 137\text{nm}$  a resposta dúctil ocorre ao longo da ponta da ferramenta.

Quando  $t_{ef} > 137\text{nm}$  há a ocorrência de fratura, resultando numa zona danificada.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Fazer o trabalho de torneamento do silício policristalino para a obtenção de superfícies ópticas anesféricas para aplicações no espectro infravermelho.

Estudo do ombro não cortado através de Microscopia de Força Atômica.

---

## Referências bibliográficas

AGOSTINHO, O.L., RODRIGUES, A.C., LIRANI, J., *Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões*, São Paulo, Editora Edgard Blücher e EDUSP, 1977.

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

BLAKE, P.N., *Ductile regime turning of germanium e silicon*, Ph.D. Thesis, North Carolina State University, 1988.

BLAKE, P.N., SCATTERGOOD, R.O., Ductile regime turning of germanium and silicon, *ASME*, V.12, pp. 249-265, 1990.

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

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

CARPINETTI, L.C.R. et al. *Rugosidade Superficial - Conceitos e Princípios*, Seção de Publicações da EESC - USP, 1996.

CHAO, C.L., *Investigations of the machining of glasses and other normally brittle materials in the ductile regime*, Ph.D. Thesis, Cranfield Institute of Technology, Cranfield, Bedford, UK, 1991.

DAGNALL, H., *Exploring Surface Texture*, Rank Taylor Hobson, 1986.

DALLAS, D.B., *Tool manufacturing engineers handbook*, 3ª edição, pp.1-5, pp. 95-97, Mc Graw Hill, 1976.

---

DU, J., CHOI, M.S., Stochastic approach to experimental analysis of cylindrical lapping process, *Wear*, 170, pp. 131-136, 1993.

DUDUCH, J.G., *Some critical aspects of machine desing and performance for the machining of brittle materials*, Ph.D. Thesis, Cranfield Institute of Technology, Cranfield, Bedford, UK, 1993.

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

HAISMA, J. et al., Aspherics, *Philips Technical Review*, v.41, n 10, pp. 285-303, 1983/84.

HUDSON R.D.Jr., *Infrared system engineering, cap. 5 - Optics*, John Wiley and sons, New York, 1969.

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

LAWN, B., WILSHAW, R., Review indentation fracture:principles and applications, *Journal of Materials Science*, V.10, pp.1049-1081, 1975.

LAWN, B.R., EVANS A .G., A model for crack initiation in plastic/elastic indentation fieds, *Journal of Materials Science*, V.12, pp. 2195-?, 1977.

LAWN, B.R., WIEDERHORN, S.M., Contact fracture in Britlle Materials, *Proceedings of International Symposium on Contact Mechanics and Wear of rail/wheel systems*, University oh Waterloo Press, pp. 133-147, 1983

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

LUCCA, D.A ., SEO, Y.M., Effect of tool edge geometry on energy dissipation in ultraprecision machining, *Annals of the Cirp*, V.42(1), pp. 83-86, 1993.

---

NOVASKI, O. *Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica*, São Paulo, Editora Edgard Blücher, 1994.

PAGOTTO, C.R., DUDUCH, J.G., PORTO, A .J.V., JASINEVICIUS, R.G., RUBIO, J.C.C, Otimização do processo de usinagem de materiais frágeis com ferramenta de diamante, *Anais COBEM*, 1997.

PAUL, E., EVANS, C., MANGAMELLI, A ., McGLAUFEN, M.L., Chemical aspects of toll wear in single point diamond turning, *Precision Engineering*, V.18(1), pp. 4-19, 1996.

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

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

RANK TAYLOR HOBSON LIMITED, *The Form Talysurf Series - Operator's Handbook*, Leicester, England.

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

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

TANIGUSHI, N., Current status in, and future trends of ultraprecision machining and ultrafine materials processing, *Annals of the Cirp*, Vol. 32(2), pp.573-582, 1983.

TANIGUSHI, N., The state of the art of nanotechnology for processing of ultraprecision and ultrafine products, *Precision Engineering*, vol.16, n(1), pp. 5-24, 1993.

---

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

USER'S MANUAL FOR THE WYKO 6000 - VERSION 4.15, Third Edition, Tucson, Arizona, October, 1998.

VENKATESHI, V.C., INASAKI I., TOENSHOF, H.K., NAKAGAWA T., MARINESCU I.D., Observations on polishing and ultraprecision machining of semiconductor substrate materials, *Annals of the Cirp*, V. 44(2), pp. 611-618, 1995.

WASSERMAN, G.D., WOLF, E. On the theory of aplanatic aspheric systems, *Proc. Phys. Soc.*, v.62, pp. 2-8, 1949.

YOSHIDAS., ITO, H., The present and future of ductile regime grinding of optical parts, *J.S.P.E.*, V.24(2), pp. 239-243, December, 1990.

ZANOTTO, E.D., MIGLIORE, A.R.Jr., Propriedades Mecânicas dos Materiais - Uma Introdução, *Cerâmica*, V.37 n.247, pp. 7-16, Jan./Fev., 1996.

---

## APÊNDICE

### Vantagens Ópticas de Superfícies Anesféricas

No projeto de um sistema de lentes os erros são inevitáveis; porém, para cada componente são dados valores e sinais de erros positivos ou negativos e esses valores, calculados sobre todos os componentes, têm de ser tão pequenos quanto possível. Quando isso é feito, o sistema é capaz de fornecer uma imagem com o mínimo de aberrações e este balanceamento de erros individuais pode ser consideravelmente simplificado pela inclusão de superfícies anesféricas no projeto

Até recentemente, o estado da tecnologia não permitia a introdução de superfícies anesféricas em sistemas ópticos de alta exatidão por uma quantidade de razões. A única exceção é o telescópio astronômico, no qual técnicos treinados têm condições de produzir superfícies anesféricas pelo difícil e demorado método de vários polimentos até se conseguir a superfície desejada (HAISMA, J. et al, 1983/84).

Teorias da óptica predizem sete tipos de aberrações; duas destas são chamadas de aberrações cromáticas e são causadas pela variação no índice de refração do material das lentes com o comprimento de onda. As aberrações monocromáticas ocorrem quando um único comprimento de onda está envolvido.

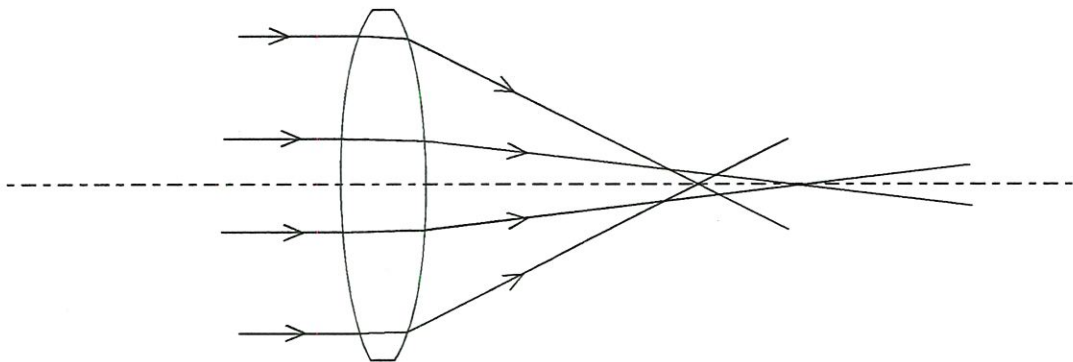
As aberrações **Monocromáticas** são: esféricas, curvatura de campo, coma, astigmatismo e distorção. As aberrações cromáticas são: longitudinal e lateral.

As aberrações dependem do arranjo geométrico das superfícies ópticas e da dispersão dos materiais ópticos. No caso de sistemas infravermelhos, as aberrações ocorridas no eixo óptico ou próximo a ele são de extrema importância

---

pois esses sistemas são usualmente designados para cobrir um campo de visão pequeno.

A aberração esférica de uma lente simples é mostrada na figura 2.2. Os raios paralelos ao eixo óptico não são trazidos para o mesmo foco.



Aberração esférica em lente (HUDSON Jr, R.D., 1969).

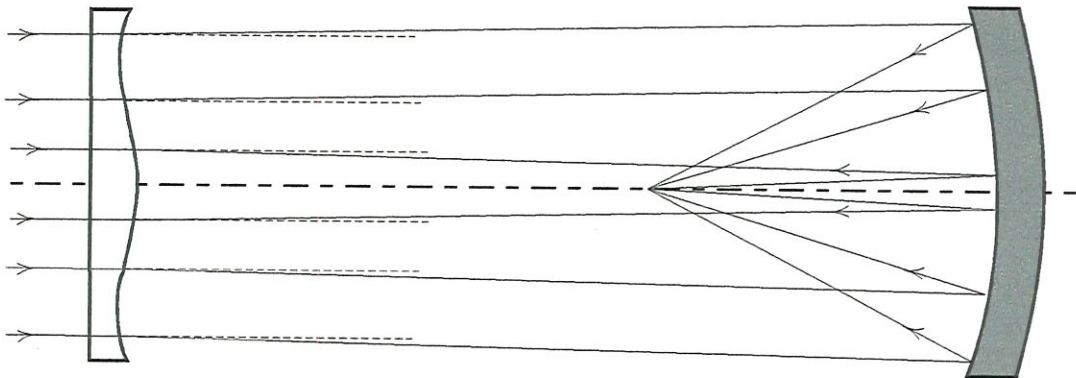
As aberrações esféricas não podem ser eliminadas pelo uso de um único espelho esférico; podem, entretanto, se virtualmente eliminadas pela adição de um elemento de correção. O parabolóide de revolução, por exemplo, uma superfície refletora anesférica, está livre de aberração esférica e as imagens formadas no eixo óptico são limitadas somente à difração. A combinação de vários tipos de lentes anesféricas reduzem a aberração esférica abaixo do limite de difração (HUDSON Jr., R.D., 1969).

A consequência direta do uso de superfícies anesféricas é a retirada de, no mínimo, uma das aberrações ou até mais. O balanceamento das aberrações restantes requerem a presença de poucos componentes anesféricos em comparação ao caso clássico de superfícies esféricas simples. Portanto, as

---

dificuldades encontradas ao se usar uma superfície anesférica estão diretamente relacionadas à fabricação.

Quando é necessário se conseguir boa qualidade de imagem, a melhor escolha que se faz é uma combinação de um espelho primário com uma lente corretora. O mais famoso desses sistemas foi o proposto por Schmidt (figura 2.3). Esse pesquisador usa um espelho esférico primário com uma lente corretiva anesférica colocada no seu centro de curvatura. A forma do corretor foi escolhida para eliminar a aberração esférica do espelho primário. Note na figura 2.3 que os vários raios são desviados pelo corretor, sendo dirigidos a um foco comum pelo espelho.

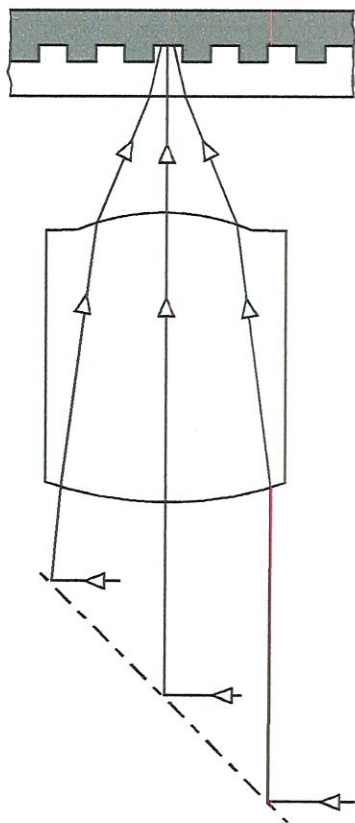


Sistema de Schimidt para a correção de aberrações (HUDSON., R. D., 1969).

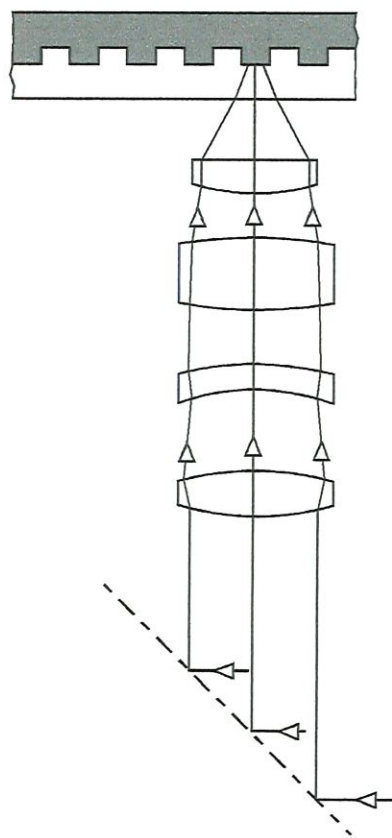
Vários sistemas de lentes anesféricas corretoras foram desenvolvidos por pesquisadores como WASSERMANN & WOLF (1948), pelo astrônomo von Seidel em 1856, etc. O projeto de lentes para visão a Laser e sistemas de CD players são bons exemplos de resultados práticos do método de trabalho originado



do trabalho de WASSERMANN e WOLF (1948). A figura 2.4 a) e b) mostra o resultado desse trabalho (HUDSON Jr., R.D., 1969, HAISMA, J. et al, 1983/84).



a) Lente Anisférica



b) Várias Lentes Esféricas

Sistema Óptico para CD ( HAISMA, J. et al, 1983/84).