

✓

# APLICAÇÃO DA MICROINDENTAÇÃO INSTRUMENTADA EM SUPERFÍCIES DE ALUMÍNIO USINADAS COM FERRAMENTA DE DIAMANTE COM PONTA ÚNICA

HUMBERTO DE OLIVEIRA LÊDO

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

DEDALUS - Acervo - EESC



31100035680

**ORIENTADOR: Prof. Ph.D. Jaime G. Duduch**

**SÃO CARLOS  
1997**



Class.	TESE-EESC
Curr.	L930
Tombo	T132/97

Área: Engenharia mecânica.

3110003560

At 0934297

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

L474a Lêdo, Humberto de Oliveira  
Aplicação da microindentação instrumentada em  
superfícies de alumínio usinadas com ferramenta  
de diamante com ponta única / Humberto de  
Oliveira Lêdo. -- São Carlos, 1997.

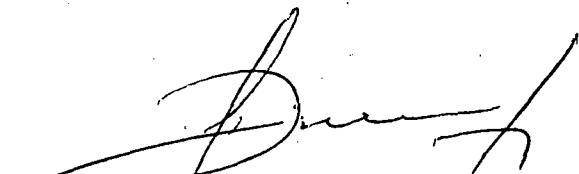
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia  
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997.  
Área: Engenharia Mecânica  
Orientador: Prof. Dr. Jaime G. Duduch

1. Ferramenta de diamante. 2. Microindentação  
instrumentada. 3. Danos subsuperficiais.  
4. Rugosidade superficial. 5. Tensões residuais.

I. Título

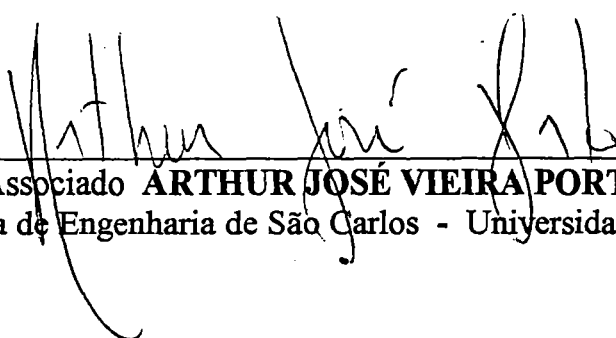
**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Dissertação defendida e aprovada em 22-5-1997  
pela Comissão Julgadora:



---

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



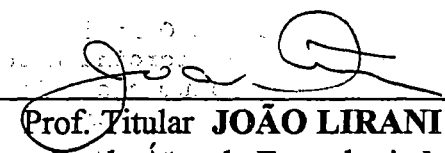
---

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



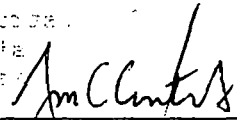
---

Prof. Doutor **CARLOS CHIEN-CHING TU**  
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Titular **JOÃO LIRANI**  
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



---

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

## **Dedicatória**

**Este trabalho é dedicado à minha família e especialmente a minha companheira Vera Lúcia Tracana Martins que sempre me apoiou e incentivou na realização deste trabalho**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho. Em particular agradeço:

Ao Prof. Ph.D. Jaime Gilberto Duduch orientador do presente trabalho, por ter acreditado no meu potencial, pelas suas sugestões, dedicação, pelo seu companheirismo e colaboração durante todas as fases de sua realização.

Ao Prof. Dr. Arthur J. V. Porto pelo apoio e sugestões quanto a definição dos objetivos a serem atingidos nos ensaios realizados.

Ao Prof. Ph.D. Reginaldo Coelho pelas sugestões apresentadas na qualificação.

Ao colega Juan Carlos Campos Rúbio pelas sugestões apresentadas durante a realização deste trabalho e pela amizade.

Ao colega Renato Goulart Jasinevicius pelas sugestões apresentadas.

A colega Daniela Lara dos Santos pela amizade e ajuda nas correções do texto.

A todos os colegas que não estiveram diariamente ao meu lado durante a realização deste trabalho mas, contribuíram esporadicamente encorajando-me para atingir o final desta atividade.

A minha companheira Vera Lúcia Tracana Martins pelo seu carinho e amor, que me deram segurança e confiança para a realização deste trabalho.

A CAPES, por ter custeado estes anos de estudos.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	ix
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv

### Capítulo 1 Usinagem de Precisão de Materiais Dúteis

1.1	Introdução.....	1
1.2	Faixas de Tolerâncias e Aplicações da Usinagemde Precisão e Ultraprecisão.....	4
1.3	Objetivos deste Trabalho.....	7
1.4	Comentários Finais.....	8

### Capítulo 2 Usinagem de Ultraprecisão - Revisão

2.1	Introdução.....	9
2.2	Materiais para Estruturas de Máquinas.....	11
2.3	Usinabilidade de Novos Materiais.....	13
2.4	Dispositivos de Posicionamento - Sensores , Trasdutores e Atuadores.....	14
2.4.1	Aplicações na Usinagem de Ultraprecisão.....	14
2.5	Sistemas Interferométricos Laser para Controle e Metrologia em Máquinas de Ultraprecisão.....	16
2.5.1	Princípios da Interferometria Laser.....	16
2.5.2	Interferômetro de Michelson .....	17
2.5.3	Aplicações da Interferometria Laser.....	20
2.6	Materiais para Fabricação de Ferramentas de Ultraprecisão.....	24
2.7	Características Técnicas do Torno ASG 2.500.....	25

2.7.1	Introdução.....	25
2.7.2	Desempenho do Torno de Ultraprecisão.....	26
2.7.3	Especificações Técnicas do Torno de Ultraprecisão ASG 2.500.....	27
2.7.4	Especificações Técnicas da Montagem do Sistema Opcional para Retificação.....	28
2.7.5	Comentários Finais.....	29

### **Capítulo 3 Processos de Usinagem de Ultraprecisão**

3.1	Introdução.....	30
3.2	Usinagem por Emissão Elástica.....	33
3.3	Usinagem Fotoquímica.....	35
3.4	Usinagem com Feixes de alta Energia.....	37
3.5	Usinagem Eletroquímica.....	40
3.6	Usinagem com Feixe de Elétrons.....	43
3.7	Retificação.....	45
3.8	Lapidação.....	48
3.9	Usinagem com Ponta Única de Diamante.....	50
3.10	Comentários Finais.....	62

### **Capítulo 4 Tensões Residuais e Métodos de Medição**

4.1	Introdução.....	64
4.2	Tensões Residuais.....	65
4.3	Difração de Raios - X.....	66
4.3.1	Introdução.....	66
4.3.2	Medida de Tensões com Raios - X.....	68
4.3.3	Difrações de Raios - X com Incidência Razante (Grazing Incidence Diffraction - GID).....	69
4.3.4	Análise de Fluorescência Total dos Raios - X (TXRF).....	72

4.4	Método Ultrassônico.....	74
4.5	Métodos Micromagnéticos.....	75
4.6	Espectroscopia de Raman.....	77
4.7	Microindentação Instrumentada.....	82
4.7.1	Indentação - Materiais Frágeis.....	86
4.7.2	Campos de Tensão na Indentação.....	86
4.7.3	Indentador com Carga Pontual - Campo Elástico de Boussinesq.....	89
4.7.4	Indentador Esférico - Campo Elástico Hertziano e suas Variantes.....	93
4.7.5	Campo Hertziano Ideal.....	93
4.7.6	Forças de Fricção Tangenciais - Combinação Elástica com Interface Estática.....	95
4.7.7	Forças de Fricção Tangenciais - Interface de Deslizamento.....	99
4.7.8	Campos de Deformações Inelásticas.....	101
4.8	Comentários Finais.....	104

## **Capítulo 5 Ensaaios**

5.1	Planejamento Experimental.....	106
I.	Material das Amostras.....	107
II.	Preparação das Amostras.....	107
III.	Método de Fixação das Amostras à Placa a Vácuo.....	107
IV.	Metodologia.....	108
V.	Relação das Condições dos Ensaios de Corte.....	111
VI.	Especificação das Ferramentas de Corte de Diamante.....	112
VII	Análise da Rugosidade.....	112
VIII	Microindentação Instrumentada.....	113
5.2	Análise dos Resultados e Conclusões.....	127
5.3	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	131
5.4	Referências Bibliográficas.....	132



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.2	- Faixas de Tolerâncias Adquiridas no Passado.....	6
Figura 2.1	- Interferômetro de Michelson.....	18
Figura 2.2	- Interferômetro de Fizeau.....	19
Figura 2.3.a	- Interferômetro de Michelson com um Circuito Eletrônico.....	22
Figura 2.3.b	- Interferômetro de Michelson com um Caminho Óptico Duplicado para Aumentar a Resolução.....	22
Figura 3.1	- Usinagem por Emissão Elástica.....	34
Figura 3.2	- Esquema referente a aceleração das partículas abrasivas à frente da peça em uma operação de usinagem por emissão elástica.....	35
Figura 3.3	- Processamento da cobertura do substrato com material fotoresistente em peças negativas e positivas.....	37
Figura 3.4	- Bombardeamento de íons em incidência normal à superfície (Partículas sombreadas).....	39
Figura 3.5	- Três tipos diferentes de colisões entre íons e átomos (partículas sombreadas) - (a massa do íon é menor que a do átomo).....	39
Figura 3.6	- Efeitos das baixas e altas energias sobre a remoção dos átomos - (a) caso de baixa energia ; (b) caso de alta energia.....	40
Figura 3.7	- Configurações para ECM - ferramenta catodo e peça anodo - (a) inicial ; (b) final.....	42
Figura 3.8	- Desenho esquemático de uma máquina industrial de usinagem eletroquímica .....	43
Figura 3.9	- Desenho esquemático de uma máquina de usinagem com feixe de elétrons.....	45
Figura 3.10	- Desenho esquemático da interação peça - rebolo e da geometria de um grão abrasivo.....	47
Figura 3.11	- Descrição esquemática de uma máquina lapidadora.....	49
Figura 3.12	- Vista esquemática da interação pratos lapidadores / compostos lapidantes / peça.....	49
Figura 3.13	- Vista lateral da placa a vácuo e do porta ferramentas.....	59

Figura 3.14	- Gerador Anesférico de Superfícies - 2500.....	60
Figura 3.15	- O gerador ASG - 2500 com o CN acoplado.....	61
Figura 3.16	- Ferramenta com ponta de diamante e duas superfícies usinadas....	61
Figura 4.1	- Difração de raios - X com com incidência razante (GID).....	70
Figura 4.2	- Difração de raios - X convencional (XRD).....	71
Figura 4.3	- Princípio físico da fluorescência total dos raios - X.....	72
Figura 4.4	- Resultados da TXRF usada sobre uma wafer de silício.....	74
Figura 4.5	- Desenho esquemático de uma montagem típica de varredura ultrassônica para detectar falhas internas do material.....	75
Figura 4.6	- Características para a transdução do ruído de Barkhausen e permeabilidade incremental.....	77
Figura 4.7	- Diagrama esquemático do experimento para a espectroscopia de Raman.....	78
Figura 4.8	- Espectro de Raman de uma wafer de silício usinada.....	79
Figura 4.9	- Tensões residuais em silício numa única operação de corte em mergulho.....	81
Figura 4.10	- Montagem de um equipamento de microindentação.....	83
Figura 4.11	- Curvas de microindentação sobre ferramentas de cerâmicas.....	84
Figura 4.12	- Curvas de fluxo de pressão delta para cerâmica.....	85
Figura 4.13	- Distribuição de pressão no contato elástico para vários sistemas de indentação: (a) carga pontual, (b) indentador afiado, (c) punção plano, (d) esférico ( ou cilíndrico). P caracteriza o carregamento aplicado e “a” a extensão do contato resultante respectivamente.....	87
Figura 4.14	- Sistema de coordenadas para o campo de tensão na indentação...	90
Figura 4.15	- Vista superior de metade da superfície indentada (topo) e vista lateral (inferior) das trajetórias das tensões no campo de Boussinesq. (Para $\nu = 0,25$ ).....	91

Figura 4.16	- Contorno das tensões normais principais, (a) $\sigma_{11}$ , (b) $\sigma_{22}$ (c) $\sigma_{33}$ , no campo de Boussinesq, mostrado no plano contendo o eixo de contato. Para $\nu = 0,25$ . A unidade de tensão é $p_0$ , o diâmetro de contato é $2a\sqrt{\alpha}$ .....	92
Figura 4.17	- Comparação entre as tensões $\sigma_{\theta\theta}(z)$ determinadas para Boussinesq e os campos Hertzianos. Para $\nu = 0,25$ .....	95
Figura 4.18	- Vista de metade da superfície indentada (superior) e vista lateral (inferior) das trajetórias em um campo de tensão Hertziano. Para $\nu = 0,33$ . (AA é o diâmetro de contato).....	96
Figura 4.19	- Contornos das tensões normais principais, (a) $\sigma_{11}$ , (b) $\sigma_{22}$ , (c) $\sigma_{33}$ , no campo Hertziano, mostrado no plano contendo o eixo de contato. Para $\nu = 0,33$ . A unidade de tensão é $p_0$ , o diâmetro de contato AA é $2a$ .....	97
Figura 4.20	- Efeito da combinação elástica entre o indentador e a peça sobre tensão radial superficial no campo Hertziano. Para $\nu = 0,25$ .....	98
Figura 4.21	- Vista de metade da superfície indentada e vista lateral dos contornos das tensões máximas principais, $\sigma_{11}$ , em peças elásticas em contato com a esfera de deslizamento (diâmetro = AA e a movimentação é da esquerda para a direita); (a) $f = 0,1$ ; (b) $f = 0,5$ . A unidade de tensão é $p_0$ . As linhas hachuradas são, $\sigma_{22}$ (vista da superfície) e $\sigma_{33}$ (vista lateral), as trajetórias desenhadas dos locais de máximas tensões de tração na peça. Para $\nu = 0,33$ .....	100
Figura 4.22	- Modelo para o problema da indentação elástico-plástica. As regiões escuras denotam o “núcleo hidrostático”, as regiões sombreadas as “zonas plásticas” e as regiões ao redor a “matriz elástica”.....	102
Figura 5.1	- Croqui do dispositivo de fixação da peça.....	108
Figura 5.2	- Croqui da superfície da amostra microindentada.....	110
Figura 5.3	- Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova - 31.....	116

Figura 5.4	- Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova - 02.....	117
Figura 5.5	- Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova - 04.....	118
Figura 5.6	- Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova - 33.....	119
Figura 5.7	- Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova - 03.....	120
Figura 5.8	- Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova - 26.....	121
Figura 5.9	- Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova - 06.....	122
Figura 5.10	- Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova - 11.....	123
Figura 5.11	- Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova - 10.....	124
Figura 5.12	- Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova - 08.....	125
Figura 5.13	- Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova - 18.....	126

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	- Faixas de Tolerâncias para os Produtos Modernos.....	5
Tabela 2.4	- Dados Técnicos Referentes à Montagem com uma Ferramenta de Ponta Única de Diamante Monocristalino.....	27
Tabela 2.5	- Dados Técnicos Referentes a Montagem do Cabeçote de Retificação no Corpo da Máquina.....	28
Tabela 5.1	- Composição química do alumínio 6061 - T6.....	107
Tabela 5.2	- Parâmetros de usinagem para a ferramenta de corte com raio de ponta de 1,52 mm.....	111
Tabela 5.3	- Parâmetros de usinagem para a ferramenta de corte com raio de ponta de 0,76 mm.....	111
Tabela 5.4	- Geometria das ferramentas de corte.....	112
Tabela 5.5	- Rugosidade das amostras usinadas com a ferramenta de raio de ponta de 1,52 mm.....	113
Tabela 5.6	- Rugosidade das amostras usinadas com a ferramenta de raio de ponta de 0,76 mm.....	113
Tabela 5.7	- Microdureza versus avanço e profundidade de corte para a ferramenta com raio de ponta de 1,52 mm.....	127
Tabela 5.8	- Microdureza versus avanço e profundidade de corte para a ferramenta com raio de ponta de 0,76 mm.....	128

## LISTA DE ABREVIACÕES E SIMBOLOS

### Capítulo 1 Usinagem de Precisão de Materiais Dúteis

Al	- Alumínio
Cu	- Cobre
KOBE	- Marca do alumínio Japonês de alta pureza
mg / m <sup>3</sup>	- Densidade do Alumínio ( miligramas por metros cúbicos)
Si	- Silício
µm	- micrometro (10 <sup>-6</sup> m)
nm	- nanometro (10 <sup>-9</sup> m)
X - Y	- sistema de cordenadas de uma mesa de ultraprecisão
CCD	- Charge Couple Device
CI	- Circuito integrado
LSI	- Integração em grande escala
VLSI	- Integração em altíssima escala
ε	- exatidão de usinagem
ε <sub>d</sub> (d)	- erro sistemático
ε <sub>s</sub> (3σ)	- erro randômico
d	- erro sistemático
σ	- desvio padrão
3σ	- erro randômico
σ <sup>2</sup>	- Variância padrão

### Capítulo 2 Usinagem de Ultraprecisão - Revisão

UP	- Usinagem de Ultraprecisão
ASG	- Gerador de Superfícies Anesféricas
LVDT	- Transdutor Diferencial Linearmente Variável
Hz	- Hertz
N / µm	- Newton por micrometro (rigidez entre eixos)

### Capítulo 3 Processos de Usinagem de Ultraprecisão

PCM	- Usinagem Fotoquímica
UV	- Ultra Violeta
keV	- kilo elétron volts
Acm <sup>-2</sup>	- Ampère por centímetro quadrado
ECM	- Usinagem Eletroquímica
V	- Volts / Tensão elétrica
NaCl	- Cloreto de sódio
$\Omega \text{ cm}^{-1}$	- Ohm por centímetro
ms <sup>-1</sup>	- metros por segundos
°C	- grau centígrado
Torr	- Torriceles
EBM	- Usinagem com feixes de alta energia
mA	- miliampère
kw cm <sup>-2</sup>	- kilo watts por centímetro quadrado
MW mm <sup>-2</sup>	- Mega watts por milímetro quadrado
Ra	- Média aritmética das alturas ( $\mu\text{m}$ )
$\alpha$	- Ângulo de folga
$\beta$	- Ângulo de cunha
$\gamma$	- Ângulo de saída
F <sub>N</sub>	- Força normal
V <sub>g (Vetorial)</sub>	- Velocidade relativa entre o prato de lapidação e a peça
V <sub>T1 (Vetorial)</sub>	- Velocidade do prato lapidador
V <sub>T2 (Vetorial)</sub>	- Velocidade da peça
(P-V)	- Peak-to-Valley
rms	- Desvio médio quadrático de rugosidade
m	- metro ( $10^3\text{mm}$ )
MOR	- Módulo de ruptura
FEM	- Método de elementos finitos
LSI	- Circuitos integrados em grande escala

## Capítulo 4 Tensões Residuais e Métodos de Medição

$\text{Å}$	- Angstroms
KCl	- Cloreto de potássio
KBr	- Brometo de potássio
XRD	- Difração de raios-x
GID	- Difração em incidência razante
MPa	- Mega Pascal
$2\theta$	- Ângulo de varredura para captação do feixe difratado
$\psi$	- Ângulo de exposição - rotação vertical
TXRF	- Análise de fluorescência total dos raios - x
$K_{\alpha}$	- Radiação de molibdênio
$\theta$	- Ângulo de incidência
$\theta'$	- Ângulo de reflexão
$\lambda$	- Comprimento de onda
$\nu$	- Constante de Plank
$Z_p$	- Profundidade de penetração da radiação
Mo	- Molibdênio
Z	- Número atômico
mg	- miligrama
ppm	- Partículas por milhão
Ni	- Níquel
B(H)	- Excitação magnética
MHz	- Mega Hertz
mN	- mili Newtons
P	- Carregamento ou carga
$p_0$	- Pressão média de contato
$\alpha$	- Constatante adimensional relativa à geometria do indentador
$\sigma_{ij}$	- Campo de tensão de Boussinesq
R	- Distância radial do ponto de contato



fj	- Função angular
$\emptyset$	- Ângulo entre o eixo normal da carga e R
v	- Coeficiente de Poisson
H	- Dureza na indentação
E	- Módulo de Young
Z	- Distância de aproximação entre os corpos (indentador e peça)
P	- Carga normal aplicada
AA	- Denominação do corte na vista lateral de uma indentação
f	- Coeficiente de fricção estática
Y	- Limite de tensão do material indentado

## Capítulo 5 Ensaaios

mN	- miliNewtons
N / mm <sup>2</sup>	- Microdureza Plástica
mm / min	- Velocidade de avanço
R <sub>t</sub>	- Profundidade máxima de rugosidade
R <sub>a</sub>	-Rugosidade média aritmética
P	- Peça (amostra a ser usinada)

## RESUMO

O objetivo do presente trabalho é classificar através de um microdurômetro de medição dinâmica de microdureza, as regiões subsuperficiais danificadas ou encruadas devido ao processo de corte de ultraprecisão com ferramenta de ponta única de diamante. Tal camada deformada pode ser interpretada como uma película muito fina sobre um substrato ou “bulk” de modo que o instrumento utilizado, Microdurômetro Fisher, cuja a capacidade de carga de indentação dinâmica é de 100 gramas, é capaz de detectar variações da microdureza do material ao penetrar a superfície a cada incremento de carga. A resposta do material à carga de indentação é tratada estatisticamente por um software específico para o instrumento que reproduz graficamente o estado de microdureza subsuperficial do material versus a profundidade de indentação e carga versus profundidade de indentação. Foi verificado qualitativamente se existe alguma influência desta camada encruada sobre a forma final do componente usinado, já que forma é um dos critérios a ser considerados em componentes de ultraprecisão. Averiguar se o nível de encruamento desta camada deformada está relacionado com os parâmetros de corte e com as ferramentas de diamante monocristalino definidos para este ensaio. Adicionalmente, analisar qualitativamente a influência da camada deformada sobre o nível de tensões residuais subsuperficiais e finalmente verificar a influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade superficial. O suporte teórico necessário para a realização deste estudo apresenta as características e a viabilidade da usinagem de materiais dúteis, tal como o alumínio 6061 - T6, o qual foi utilizado neste ensaio. Os ensaios de forma e microindentação mostraram-se eficazes e atenderam aos objetivos esperados, isto é, detectar a variação da microdureza e verificar a constância de forma das superfícies da amostra para cada ferramenta utilizada nos ensaios.

Palavras chaves: Ferramenta de diamante, Microindentação instrumentada, Danos subsuperficiais, rugosidade superficial, tensões residuais

## ABSTRACT

The objective of this work is to classify and measure the thickness of the damaged layer of a ultraprecision machined (single point diamond turned) surface through microhardness techniques. The disturbed layer gradually varies from that of a severely deformed (hardened) one to that of the undisturbed bulk material. Microindentation technique is able to detect, as a function of the depth of indentation, the variations in microhardness of the material and with the aid of a piece of software, plot curves of microhardness versus depth of indentation and load versus depth of indentation. The influence of the damaged layer on the final form (profile) of the workpiece was examined since this parameter is important to ultraprecision components. The effect of cutting conditions on the level of work-hardening was studied. Additionally, the influence of the damaged layer on the subsurface residual stress was considered. Finally, the influence of cutting parameters on surface roughness was discussed. A theory based on the material and machining properties of the aluminium alloy, 6061 - T6, was formulated and applied. The profile and microindentation tests showed this theory to be adequate for the objectives of this work.

**Keywords:** Diamond Turning, Microindentation, Subsurface Damage, Surface Roughness, Residual Stress.

# CAPÍTULO

## 1

### **Usinagem de precisão de materiais dúteis**

#### **1.1 INTRODUÇÃO**

Uma operação de usinagem de precisão tem como objetivo os seguintes aspectos: alta exatidão de forma, baixa rugosidade superficial e baixos níveis de danos subsuperficiais, que ocorrem devido a interação ferramenta/peça produzindo um estado de deformação dos grão próximos à superfície e introduzindo esforços internos de tração e compressão na estrutura cristalina do metal [Duduch, J.G., 1993].

Se a aplicação for um componente óptico, tem-se ainda alta refletividade e exatidão de forma, tais características podem ser, com o passar do tempo, prejudicadas se o processo de corte introduziu tensões residuais na estrutura cristalina, as quais podem ser controladas através de estudos e trabalhos práticos [König, W, 1991 et al]. Por outro lado, o componente é o reflexo concreto da dinâmica do processo e sobre este podem ser aplicadas técnicas específicas de medição não destrutivas que caracterizem quantitativa e qualitativamente as regiões subsuperficiais danificadas ou encruadas nos componentes de ultraprecisão usinados com ferramentas de ponta única de diamante.

A demanda para a usinagem de precisão está constantemente aumentando e seus campos de aplicação estão também sendo expandidos, especialmente junto às indústrias de manufatura de dispositivos ópticos, mecânicos e eletrônicos [Moriwaki, Toshimichi, 1993; Sugimura, Nobuhiro, 1993 et al]. Novos materiais estão sendo submetidos ao processo tais como vidros, plásticos e materiais cerâmicos, entretanto ainda há um grande volume de aplicações que se utiliza de materiais dúteis como o alumínio e o cobre.

Muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas com relação a projetos de máquinas de precisão, desenvolvimento de ferramentas de diamante, desenvolvimentos de novos materiais e principalmente o estudo do que ocorre em tempo real quando uma operação de corte está se processando, seja em materiais frágeis (e.g.. vidros) ou dúteis (alumínio ou cobre) [Lucca, D.A., 1992; Seo, Y.W., 1992; Ikawa, Naoya, 1987; Shimada, Shoichi, 1987 et al].

Como material de trabalho foi utilizado a liga de alumínio 6061-T6 que após usinada será submetida a ensaios de indentação instrumentada e análise de rugosidade.

As combinações únicas fornecidas pelo alumínio e suas ligas o tornam um dos mais versáteis, econômicos e atrativos dos materiais metálicos para ser utilizado na fabricação de muitos componentes de ultraprecisão. Sua baixa densidade e alta resistência específica (razão entre peso atômico e resistência) são características muito desejadas. A densidade do alumínio está em torno de  $2,7 \text{ mg/m}^3$ , aproximadamente um terço da densidade do aço, cobre ou latão.

O alumínio tem alta resistência à corrosão em contacto com a atmosfera, em água salgada e em muitas soluções químicas. Não tem reações tóxicas, logo é altamente adequado para o processamento e manuseio. A alta condutividade elétrica e térmica do alumínio explica seu uso em muitas aplicações. O alumínio é altamente reflexivo à luz visível.

É um material não ferromagnético, uma propriedade importante para as indústrias elétrica e eletrônica. O alumínio tem características não faiscantes, as quais permitem seu uso em ferramentas a serem utilizadas próximas a materiais inflamáveis ou explosivos. O alumínio e muitas de suas ligas podem ser trabalhados facilmente para qualquer formato que se faça necessário e pode ser fundido por todos os processos de fundição [Metals Handbook, 1986].

Todas as características citadas acima posicionam o alumínio como um material de grande importância nas aplicações de engenharia. Por outro lado, quando se trata de um processo de usinagem de precisão torna-se necessário considerar o comportamento do material, fisicamente e os componentes que integram sua microestrutura, já que é preciso quantificar a importância de partículas endurecidas contidas no material e sua instabilidade microestrutural, pois apresentam-se como limitações ao acabamento superficial, à qualidade das peças e ao controle de custos de produção.

As partículas duras causam um acabamento pobre e problemas visíveis devido ao esfarelamento e excessivo desgaste abrasivo da ferramenta. Verifica-se, também, que a instabilidade microestrutural causa variações ópticas com o tempo. Deve-se salientar também que o alumínio, dependendo da sua aplicação mecânica, é considerado um material mole e pouco resistente que deve portanto ser endurecido [Polvani, S. Robert e Evans, J. Chis. 1991].

Em aplicações típicas de usinagem de precisão as ligas de alumínio que normalmente são utilizadas têm baixo nível de silício contido em sua matriz. Tais alumínios são utilizados como substratos que posteriormente receberão um recobrimento superficial especial, o qual, condicionará a aplicação à óptica, eletrônica ou à mecânica [König, W., 1991 et al].

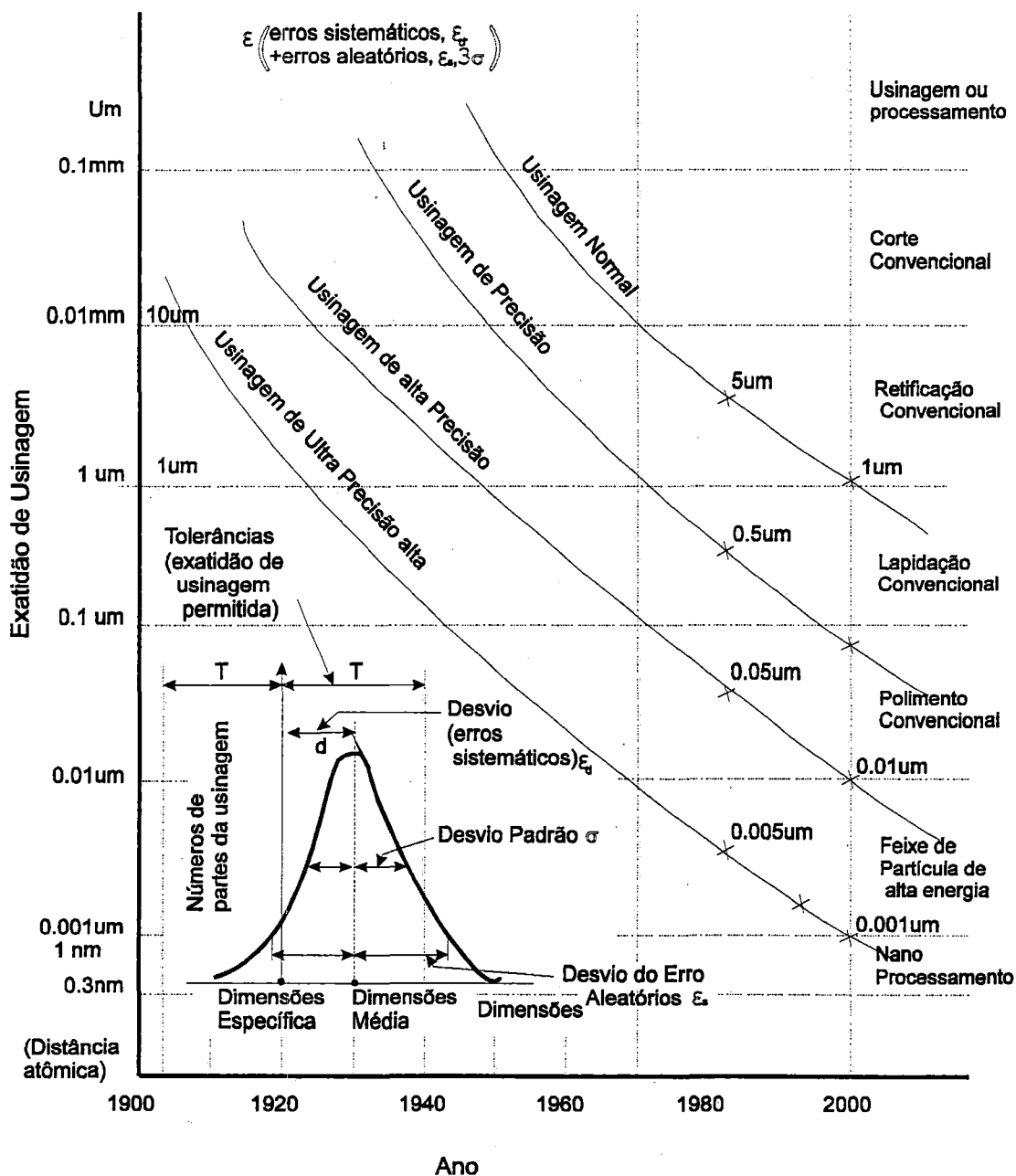
## **1.2 Faixas de tolerâncias e aplicações da usinagem de precisão e ultraprecisão**

O volume de aplicações da usinagem de precisão e ultraprecisão vem crescendo muito rapidamente com o passar dos anos, de tal forma, que é importante dimensionar o seu período de crescimento e classificar seus produtos em termos de faixas de tolerâncias quando comparada com usinagem convencional [Duduch, J.G. 1993]. A tabela 1.1 abaixo fornece as tolerâncias e os produtos usados nas indústrias mecânicas, eletrônicas e ópticas (adpatado de McKeown, 1987 - reproduzida de Taniguchi, 1983). Em seguida é apresentado um gráfico projetando o período de crescimento do processo de usinagem e estimativas futuras [Taniguchi, 1993].

Tabela 1.1 Faixas de tolerâncias para os produtos modernos

Processos	Tolerâncias	Mecânica	Eletrônica	Óptica
	200 $\mu\text{m}$	aparelhos domésticos, fixações automotivas	peças elétricas de propósito geral, motores e conectores	câmeras, telescópios e binóculos
Usinagem normal	50 $\mu\text{m}$	peças mecânicas de propósito geral para máquinas de escrever, motores	transistores, diodos, cabeças magnéticas para gravadores	diafrágmata de câmeras, suporte de lentes para câmeras e telescópios
	5 $\mu\text{m}$	peças de relógios mecânicos, mancais de máquinas ferramentas, engrenagens	transmissores elétricos, resistores, condensadores, wafers de silício, máscara para TV colorida	lentes, prismas, fibras ópticas e conectores (múltiplos modos)
Usinagem de precisão	0,5 $\mu\text{m}$	rolamentos de esferas e roletes, arames lineares de precisão, válvulas servo hidráulicas, mancais aerostáticos, bicos injetores, mancais de giro aerodinâmicos	escalas magnéticas, osciladores de quartzo CCD, bolhas de memórias magnéticas, magnetron, largura das linhas do CI, transdutores de pressão de filmes finos	lentes de precisão, escalas ópticas, máscaras de exposição de CI (foto, raio-x), espelhos poligonais de laser, espelhos de deflexão elásticas, fibras ópticas monomodos e conectores
Usinagem de ultraprecisão	0,05 $\mu\text{m}$	blocos padrões, indentador com raio de ponta de diamante, microtome com raio de ponta de diamante, mesas X-Y de ultraprecisão	memórias de CI, discos de vídeo eletrônicos, LSI	planos ópticos, lentes de Fresnel de precisão, redes de difração ópticas, discos de vídeo ópticos
	0,005 $\mu\text{m}$		VLSI, super-redes de filmes finos	redes de difração de ultraprecisão





Erro de processamento = diferença entre as dimensões específicas e processadas.  
 Exatidão de usinagem  $\epsilon = \text{erro sistemática } \epsilon_d(d) + \text{erro randômico } \epsilon_s(3\sigma)$ . Exatidão restrita = erro sistemático (d). Precisão restrita = erro randômico ou ( $3\sigma$ ). Precisão ampla = alta exatidão. Variância padrão =  $\sigma^2$

Figura 1.2 Faixa de exatidão adquirida no passado. [Taniguchi, 1993]

### 1.3 OBJETIVOS DESTE TRABALHO

O objetivo deste trabalho é estudar e quantificar, através de um microdurômetro (Fisher) de medição dinâmica de microdureza, as regiões subsuperficiais danificadas ou encruadas devido ao processo de corte de ultraprecisão com ferramenta de diamante com ponta única.

Será avaliado se o nível de encruamento da camada deformada está relacionado com os parâmetros de corte e com as ferramentas de diamante monocristalino definidos para o ensaio definido nesse trabalho.

Também será analisada qualitativamente a influência da camada deformada sobre o nível de tensões residuais subsuperficiais.

## 1.4 COMENTÁRIOS FINAIS

Os componentes fabricados pelo processo de usinagem de ultraprecisão estão submetidos a exigências tais como extensão de forma, baixa rugosidade superficial e baixo índice de danos subsuperficiais e, dependendo da aplicação, alta reflexividade é muito importante.

O campo de aplicação desses componentes está em constante expansão acompanhado por pesquisas relativas ao processo de corte, ao desenvolvimento das estruturas das máquinas, de novos materiais e ferramentas de corte.

O alumínio, dependendo da aplicação, deve ser devidamente preparado atentando para as necessidades de dureza e a presença de partículas duras que podem ocasionar acabamentos pobres e problemas de desgaste da ferramenta. Entretanto, a faixa de componentes que são construídos com o alumínio é extensa devido a uma série de características intrínsecas do material.

A evolução dos processos de remoção de material com ferramenta de diamante com ponta única culmina com a usinagem de ultraprecisão produzindo componentes mecânicos, eletrônicos e ópticos para as mais diversas aplicações.

# CAPÍTULO

## 2

### **Usinagem de Ultraprecisão - Revisão**

#### **2.1 INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos tem havido um interesse crescente pela usinagem de ultraprecisão propiciando atividades de pesquisa e investimentos financeiros [Tsuwa, H, 1979; Watanabe, J & Suzuki, J, 1981]. Esses investimentos podem ser justificados, por uma razão muito evidente a qual está relacionada à necessidade de produzir produtos de alta qualidade com baixo custo [McKeown, 1987] (componentes com alta exatidão) aliados à limitação de recursos e tempo, desenvolvimento de novos materiais tecnológicos os quais frequentemente são mais difíceis de usar que os materiais

tradicionais. As definições de usinagem de precisão e ultraprecisão não são fixas, elas se desenvolvem e variam com o tempo. Se em 1940 uma mandriladora vertical com repetibilidade de  $1\mu\text{m}$  poderia provalvemente ser considerada um equipamento de alta precisão, meio século depois, a exatidão dimensional evoluiu de uma ordem de grandeza. A expressão “ultraprecisão” assume uma grande variedade de significados e entre estes pode-se verificar a obtenção de altíssima exatidão dimensional, com o equipamento disponível [Duduch, J.G., 1993].

A usinagem de ultraprecisão pode trabalhar com peças cujas dimensões são da ordem de até  $1\mu\text{m}$  e resolução da ordem de  $1\text{nm}$ , logo **nanotecnologia**. Estas ordens de magnitude não são conseguidas por modificações ou adaptações de processos ou técnicas convencionais. Contrariamente, elas integram o desenvolvimento de novas técnicas de processamento de materiais, envolvendo:

- 2.2 Materiais para estruturas de máquinas com características estáticas e dinâmicas adequadas, já que estes afetam o desempenho da máquina;
- 2.3 Usinabilidade de novos materiais tecnológicos tais como cerâmicas, plásticos, germânio, zerodur [Ashkerov & Minaev, 1988];
- 2.4 Dispositivos de posicionamentos - sensores, transdutores e atuadores compatíveis com a repetibilidade de posicionamento e exatidão do deslocamento exigido para cada eixo[Gee & Green, 1988];
- 2.5 Sistemas Interferométricos de controle e metrologia para tornar possível a realização da metrologia dimensional com a exatidão esperada [Fornaro & Dow, 1988];
- 2.6 Materiais para fabricação de ferramentas e a interação ferramenta/peça.

A seguir, descrevem-se brevemente os cinco primeiros aspectos. No final dessa discussão é dado um exemplo de máquina de ultraprecisão (UP), o torno ASG 2500, por reunir essas características e por ser o equipamento utilizado na parte experimental desse estudo.

## **2.2 Materiais para estruturas de máquinas de ultraprecisão**

Obter exatidão de uma máquina ferramenta, seja de precisão e/ou de ultraprecisão quer dizer, entre outras coisas, ter uma estrutura apropriada para esta função, pois é a estrutura da máquina que faz a ligação entre a ferramenta e a peça. Verifica-se que defleções associadas a vibrações da máquina podem ser reproduzidas na forma de erros na peça.

As vibrações introduzidas pela ação de corte ou outras excitações (e.g., componentes desbalanceados) que produzem ondas de tensões que se propagam pela estrutura da máquina resultando em movimentos relativos entre a peça e a ponta da ferramenta. Entretanto, para se conseguir alta exatidão da peça sob a influência das forças de corte, a primeira preocupação deve estar centrada na utilização de materiais e arranjos estruturais que resultem em alta rigidez (estática e dinâmica); observando-se também que o amortecimento interno do material usado deve ser tão alto quanto possível.

Os materiais e as estruturas para máquinas de ultraprecisão devem exibir alta estabilidade dimensional, ie, manter a forma com o tempo e quando sob tensão. A estabilidade mecânica exigida para tais elementos pode ser afetada pelos seguintes fatores independentemente: propriedades físicas do material, forma do componente, método de fabricação (e.g., fundido, usinado), tratamento térmico, método de montagem na fundação, ambiente e as operações de usinagem.

A fim de aumentar a estabilidade dimensional, a relação entre a tensão aplicada mais a residual e o limite de escoamento do material deve ser minimizada. O endurecimento através de tratamento térmico, o qual tende a aumentar as tensões residuais, deve ser

evitado sempre que possível em favor do não endurecimento ou do endurecimento superficial do material [Wills-Moren, 1986]

Utilizar coeficiente de expansão térmica com baixo valor é importante para minimizar as distorções, as quais são normalmente muito difíceis de compensar. Máquinas de ultraprecisão devem operar em ambientes limpos com temperatura controlada, o comportamento térmico deve permanentemente ser considerado.

As decisões de como e qual material usar e a configuração, baseando-se no aumento da temperatura necessita de cuidadosa modelagem ou análises experimentais. É possível compensar a expansão térmica da máquina deformando-a no sentido oposto à distorção ou compensando o sistema de medição. Em muitos casos, entretanto, esses métodos são ineficientes [Wills-Moren, 1986].

Alta estabilidade dimensional, alta rigidez e baixo coeficiente térmico não são características desejáveis somente na usinagem de ultraprecisão, entretanto, com a crescente precisão dos equipamentos, maiores cuidados devem ser tomados. Exatidões a níveis nanométricos são aplicações especiais e somente conseguidas se especial atenção for dada ao projeto, à seleção de materiais adequados para estrutura da máquina ferramenta, observar os critérios de rigidez, amortecimento do material, estabilidade dimensional e as propriedades térmicas [McKeown & Morgan, 1979; Morgan et al, 1979; Falter, P.J & Dow, T. A, 1987].

Uma das inovações trazidas para o projeto de máquinas ferramentas acerca de uns dez anos atrás foi o uso de granito sintético, conhecido como ‘granito epoxy’ e licenciado com o nome de “granitan”<sup>TM</sup> para estruturas de máquinas de ultraprecisão. Este material tem o amortecimento duas vezes superior ao do ferro fundido, menor rigidez específica (um terço da rigidez do ferro fundido, logo paredes espessas são necessárias para conseguir a mesma rigidez) e alta estabilidade dimensional podendo-se eliminar o ferro fundido da ultraprecisão com baixo custo, pois este material representa metade do custo do ferro fundido numa produção em série.

## 2.3 Usinabilidade de novos materiais

A indústria manufatureira é constantemente obrigada, para melhorar o desempenho de certos produtos, a pôr em prática pesquisas em novos materiais e novos processos. Um exemplo comum disso é a indústria de componentes ópticos, a qual depende de processos de ultraprecisão, considerando que o acabamento superficial de um número considerável de seus itens pode chegar gradativamente ao nível de poucos nanômetros [Wills-Moren et al, 1982; Abe., 1991].

Normalmente, esta indústria mostra uma tendência a utilizar materiais tais como ligas de alumínio, cobre e plásticos na confecção de superfícies ópticas anesféricas. Esta tendência é essencialmente baseada no desenvolvimento que estes materiais trouxeram para fabricação de componentes ópticos adicionado à significativa redução nas dimensões e peso [Ashkerov & Minaev, 1988].

As técnicas convencionais tais como polimento para acabamento mecânico destes componentes demandavam muito tempo e recursos financeiros, constituindo obstáculo para a produção em massa [Abe., 1991]. As tolerâncias de forma e acabamento superficial adequados a redes de difração, por exemplo, podem ser obtidos pela técnica de torneamento com diamante em menor tempo comparado aos processos convencionais, reduzindo os custos e aumentando a repetibilidade e a exatidão.

A usinagem com diamante (torneamento) foi usada inicialmente em metais dúteis tais como alumínio, cobre e latão para espelhos ópticos e moldes para lentes de Fresnel. A produção de lentes anesféricas e espelhos em vidros e cerâmicas vítreas tem sido um problema constante; até o momento de alto custo, já que pequenos lapidadores fazem-se necessários porém tais componentes podem ser tão facilmente retificados ou torneados como um elemento esférico em um centro de torneamento.



Grande número de aplicações tem sido verificado que mostra o potencial e a efetividade da técnica de usinagem com diamante para manufatura de componentes de ultraprecisão [McKeown et al, 1990; Puttick et al, 1989; Schinker & Döll, 1987; Smith, 1990]. Aplicações típicas são encontradas na indústria óptica como mencionado acima, computação, eletrônica e outros setores de manufatura.

Podemos citar como exemplo os espelhos metálicos esféricos e anesféricos, componentes ópticos, moldes de lentes, discos rígidos para computadores, os espelhos poligonais usados em 'laser scanners' para impressão, copiadoras e leitoras. As pesquisas caminham no sentido da substituição da lapidação e polimento na fabricação de wafers de silício para indústria eletrônica por usinagem de UP [Abe., 1991; Tönshoff., 1990].

## **2.4 Dispositivos de posicionamento - sensores, transdutores e atuadores**

### **2.4.1 Aplicações na usinagem de ultraprecisão**

Os sistemas de controle dos movimentos e os dispositivos de posicionamento são peças vitais de uma máquina ferramenta de ultraprecisão, pois esses são responsáveis pelos deslocamentos da peça e da ferramenta os quais, no caso de uma máquina de ultraprecisão, devem operar na faixa sub-micrométrica.

Em algumas aplicações de ultraprecisão, os sistemas de controle dos movimentos das massas são solicitados a trabalhar em faixas de velocidades muito baixas, enquanto em outras, servo-atuadores muito rápidos são necessários para seguir formas específicas em tempo real [Dow et al, 1991].

Os sistemas interferométricos de laser e os sensores capacitivos são empregados para posicionamentos que necessitam de alta resolução. Sistemas interferométricos dependem da alta estabilidade do laser de, normalmente, 1 parte em  $10^9$  e 256 bits de

resolução eletrônica. O sensor capacitivo usado como padrão no Lawrence Livermore National Laboratory, por exemplo [McCue, 1983], tem 0.25nm analógicos pico-a-pico de ruído para um sensor com largura de banda de 100Hz com  $\pm 2.5\mu\text{m}$  de deslocamento máximo e resolução da ordem de 2.5nm.

[Kouno, 1984] divulgou o projeto e a construção de um atuador piezoelétrico de ultra precisão incorporando um transdutor diferencial linearmente variável (LVDT) para atenuar os efeitos da histerese e da expansão térmica. Este atuador está potencialmente disponível para o uso sobre o porta-ferramenta para servo correção de erros sistemáticos em usinagem de ultraprecisão.

As características registradas são: resolução de 10nm sobre a faixa de  $0.5\mu\text{m}$ , largura de banda de 50Hz e rigidez axial de  $300\text{N}/\mu\text{m}$ . O último trabalho apresentado por [Patterson & Magrab, 1985] mostra um atuador similar incorporando um sensor capacitivo padrão com faixa de posicionamento de  $\pm 1.27\mu\text{m}$ , resolução de 2.5nm, largura de banda de 100Hz e rigidez (todos os três eixos) de  $175\text{N}/\mu\text{m}$ . Todavia, as características destes atuadores foram obtidas de testes em condições estáticas.

Para obter resultados satisfatórios de atuadores com essas características em condições dinâmicas de corte, deve-se compreender que o controlador do atuador da ferramenta deve interagir com o controlador principal, ie, o que controla a posição do atuador da ferramenta em relação à peça. Isto significa que o controlador principal deveria ser capaz de seguir o controlador do atuador da ferramenta com a mesma velocidade.

Podemos considerar um atuador de ferramenta sendo alimentado por um sensor digital realimentando um microprocessador com uma taxa de por exemplo de 1.2 por milissegundo. Isto significa que para corrigir erros de um eixo girando, por exemplo, à velocidade de 500 rpm (requer um período de 120 ms para uma única revolução), este atuador teria de ser capaz de fornecer 100 atualizações por revolução.

Entretanto, se um controlador comercialmente padronizado (para a máquina hospedeira) tendo atualização de tempo de 10 ms for usado, como o controlador usado pela Pneumo ASG 2500 (no item 2.7 serão discutidas, detalhadamente, as características técnicas desta máquina já que será utilizada no estudo experimental de usinagem deste trabalho) máquina de torneamento com diamante [Fornaro & Dow, 1988], o número de atualizações seria limitado a somente doze por revolução, o qual é insatisfatório para a correção de erros de usinagem.

Este exemplo chama a atenção para a importância do desenvolvimento de controladores com larguras de bandas superiores para fabricação de componentes de ultra precisão de alta qualidade para em aplicações potenciais tais como fabricação de componentes ópticos não rotacionalmente simétricos como registrados por [Dow et al, 1991].

## **2.5 Sistemas Interferométricos Laser para controle e metrologia em Máquinas de Ultraprecisão**

### **2.5.1 Princípios da interferometria Laser**

Quando duas frentes de ondas com a mesma frequência ( $\omega$ ), amplitude (A) e velocidade, deslocando-se no tempo por diferentes caminhos para em seguida recombinarem-se e sobreporem-se, a frente de onda resultante terá a mesma frequência da frente de onda original, porém a sua amplitude dependerá do ângulo de fase de cada onda em função da diferença de trajetos. A intensidade da frente de onda resultante pode ser expressa como:

$$Y=2A\cos(\phi/2)\text{sen}(kx-\omega t-\phi/2)$$

onde  $k=2\pi/\lambda$

Quando a diferença do comprimento do caminho é um múltiplo par de  $\lambda/2$  o ângulo de fase será ( $\phi = 0, 2\pi, 4\pi, 6\pi, \dots$ ), resultando em uma interferência construtiva, ie, a amplitude da frente de onda combinada será duas vezes a amplitude da frente de onda original. Se, entretanto, a diferença do comprimento do caminho é um múltiplo ímpar de  $\lambda/2$  ( $\phi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$ ), ocorrerá interferência destrutiva, logo, a amplitude resultante será igual a zero.

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 recombinações construtivas ou destrutivas, dependem da diferença do comprimento do caminho. As franjas geradas podem ser foto-detectadas e eletronicamente contadas ou interpoladas.

### **2.5.2 Interferômetro de Michelson**

O físico Americano Albert A. Michelson (1852-1931) foi o primeiro a introduzir a interferometria como uma ferramenta de medida, sua idéia de dividir um feixe de luz em um de referência e um de medição é permanentemente usada nos modernos interferômetros de laser.

O interferômetro, ver figura 2.1, é composto de um divisor de feixe fixo (espelho parcialmente prateado) e um espelho plano móvel. O feixe de luz de uma fonte laser é dividido em dois feixes no divisor de feixes. Metade da amplitude do feixe original é transmitida (feixe de medição) e a outra metade é refletida em um ângulo reto (feixe de referência). O feixe de medição varia o seu ângulo de fase de  $180^\circ$  com relação ao feixe de referência, de modo que ocorre uma interferência construtiva quando a

diferença do comprimento do caminho é um múltiplo ímpar de meio comprimento de onda.

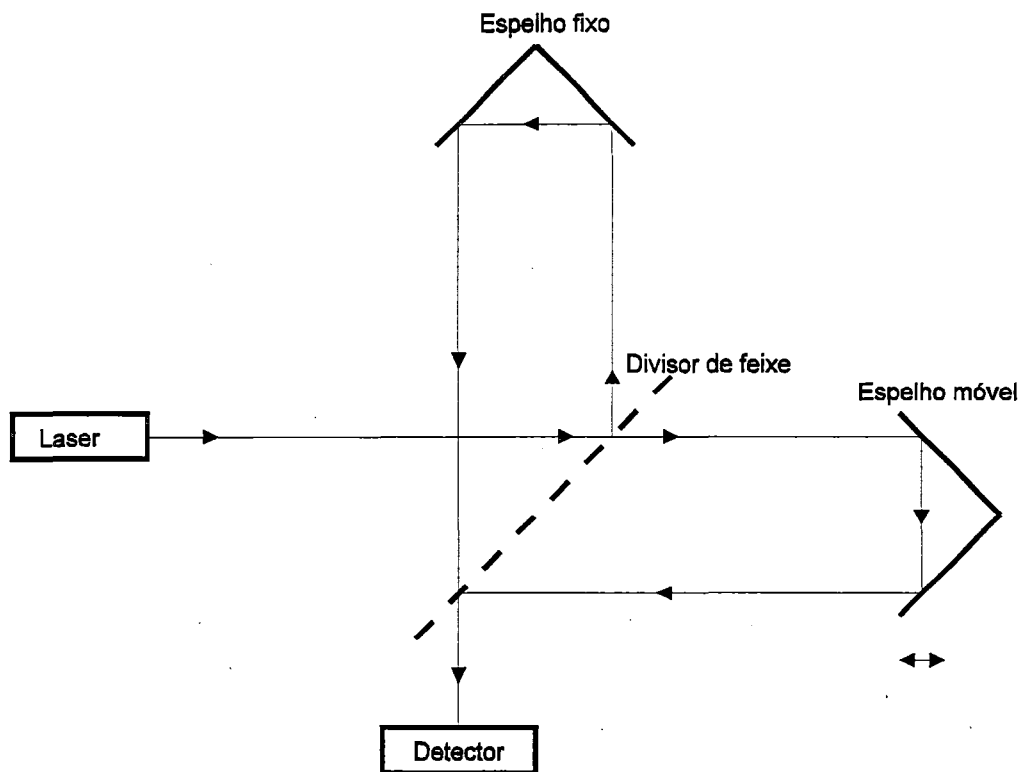


Figura 2.1 - Interferômetro de Michelson [Duduch, J.G., 1983]

O deslocamento do espelho móvel pode se medido pela contagem das franjas de interferência de  $\lambda/2$ . A distância entre duas franjas escuras é de  $\lambda/2$ , por outro lado, a resolução da franja é de  $\lambda/4$ . O comprimento do caminho óptico varia de duas vezes a distância deslocada pelo alvo, logo a movimentação do alvo pode ter uma resolução de  $\lambda/8$ . Por outro lado, com as modernas técnicas de detecção óptica, resoluções da ordem de  $(\lambda/2)^8$  podem ser facilmente conseguidas, porém para esta resolução ser satisfatória o projeto mecânico deve ser capaz de responder adequadamente e variar com o índice de refração porque as variações ambientais devem ser compensadas.

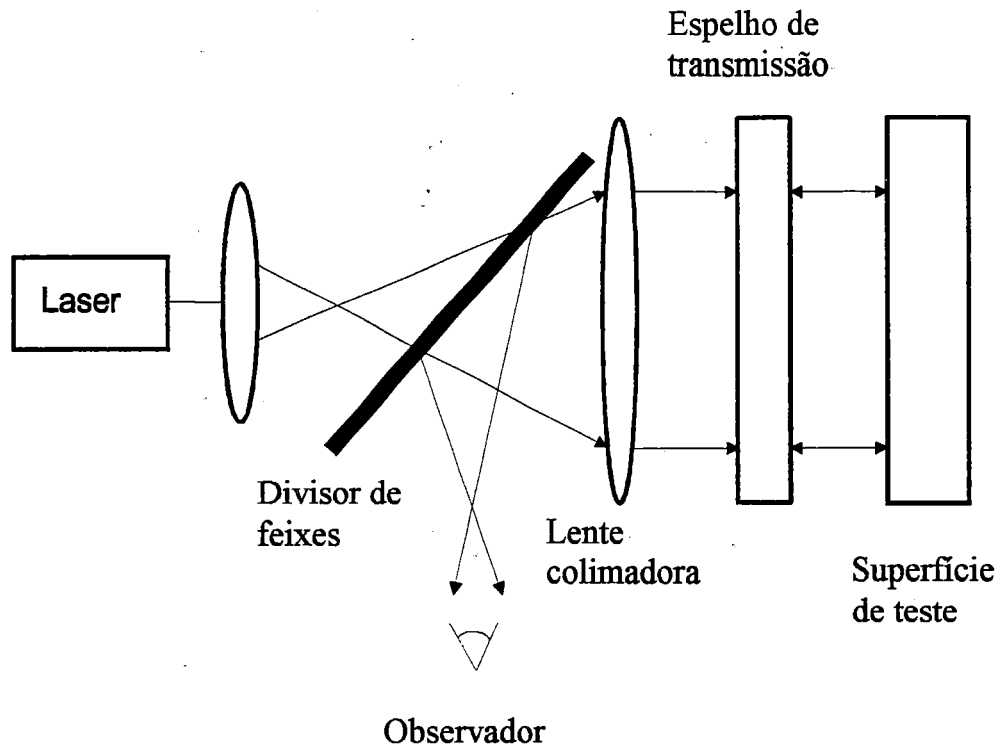


Figura 2.2 - Interferômetro de Fizeau [Duduch, J.G., 1983]

A figura 2.2 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 interferência resulta de parte da frente de 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). Esta técnica não se reduz somente à medição do deslocamento através da contagem de franjas de um interferograma. Ela envolve uma análise completa do interferograma como um todo através de uma inspeção visual ou análise 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, logo, nenhuma franja pode ser observada. Se a superfície é plana, porém levemente inclinada em relação a um plano óptico de teste, uma família de linhas igualmente espaçadas e franjas paralelas resultará, o espaçamento de franjas sendo proporcional à inclinação. Para outros perfis, o interferograma apresentar-se-á 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 a normal à superfície de teste. Isto pode ser usado no arranjo e calibração de uma máquina de precisão tão bem quanto no controle do processo.

### **2.5.3 Aplicações da Interferometria Laser**

A incorporação de interferômetros Laser em equipamentos tais como máquinas de torneamento ou retificação com diamante é hoje essencial para a geração de componentes de precisão, já que a saída dos interferômetros ópticos pode ser interpolada eletronicamente para fornecer resoluções de deslocamentos da ordem de 2,5 nm, tornando possível tanto tolerâncias de posicionamento boas quanto permitindo a localização de uma ferramenta em relação à peça a ser usinada mais diretamente que é conseguida com muitos outros transdutores de posicionamento [Sidall & Baldwin, 1984]. Entretanto, esta resolução é afetada por variações no índice de refração do meio causadas pelas variações de temperatura, pressão e umidade, alinhamento do laser, compensação dos erros de Abbé e a distância entre o divisor de feixe e a face do prisma móvel. A fim de obter resultados exatos dos interferômetros laser é necessário que as variações ambientais sejam compensadas sem, entretanto, degradar a qualidade do sistema. Logo, o alinhamento do laser deve ser feito cuidadosamente com a finalidade de prevenir erros de paralaxe e os erros de Abbé minimizados no estágio de projeto.

Sistemas automáticos de compensação são disponíveis, os quais percebem as variações ambientais e corrigem os valores de saída, entretanto, estes sistemas talvez reduzam a exatidão dos interferômetros [Barkman, 1980]. Refratômetros especiais eletrônicos/ópticos que percebem as variações nos comprimentos dos caminhos fixados e estabelecem a compensação adequada sem degradar a exatidão do sistema são disponíveis [Barkman, 1980].

Outro importante fator que influencia os dados de saída do interferômetro laser é o gradiente de temperatura dentro do caminho do feixe. Para prevenir ou minimizar o efeito do gradiente de temperatura, o feixe laser pode ser protegido por um envólucro ou, alternativamente, o ar do caminho pode ser misturado para fornecer uma distribuição de temperatura uniforme [Siddal & Baldwin, 1984].

Um significativo aumento na resolução dos interferômetros laser é a dupla passagem e os acessórios para caminhos duplos diferenciais registrados por [Siddal & Baldwin, 1984]. Basicamente, estes consistem da duplicação de ambos os feixes de referência e de medição (ao mesmo tempo) usando os mesmos componentes ópticos. Esta técnica permite prevenir erros introduzidos pela movimentação de componentes ópticos adicionais necessários para a duplicação do caminho quando ele não é comum aos feixes de referência e medição. Este arranjo duplica a resolução sem degradar a estabilidade da medida.

A resolução de um interferômetro pode ser melhorada através de interpolação eletrônica entre as franjas de interferência. Entretanto, se, por exemplo, a resolução é duplicada por este meio, a estabilidade decresce pela mesma quantidade já que alguns deslocamentos dos componentes ópticos, causados, por exemplo, por expansão térmica, são também duplicados pelo interpolador eletrônico e o contador [Tanimura, 1983]. No entanto, para fazer o método de interpolação eletrônica excelente seria necessário que os elementos ópticos fossem criticamente montados e posicionados com a temperatura ao redor sendo controlada.



Duplicar o feixe laser para aumentar o caminho óptico talvez resulte em comparativamente melhor estabilidade térmica. A influência da expansão térmica na estabilidade do interferômetro pode ser demonstrada comparando os arranjos mostrados na figura 2.3 [Tanimuta, 1983]. A figura 2.3-a mostra o interferômetro usual de Michelson com um circuito eletrônico conectado capaz de interpolar a resolução do deslocamento por um fator de dez.

A figura 2.3-b, por outra lado, mostra um interferômetro similar cuja resolução é aumentada pelo mesmo fator (dez vezes), sem o circuito eletrônico, porém por meio da multiplicação do caminho óptico com um par de prismas especialmente projetados e arranjados a fim de que o feixe atravesse o espaço entre os prismas retrorefletor e dianteiro 10 vezes e finalmente retorne ao interferômetro. Se a temperatura da base do suporte aumenta, a expansão térmica será multiplicada por 10 para o interferômetro da figura 2.3-a, enquanto para o interferômetro da figura 2.3-b este valor é reduzido para 2 [Tanimura, 1983].

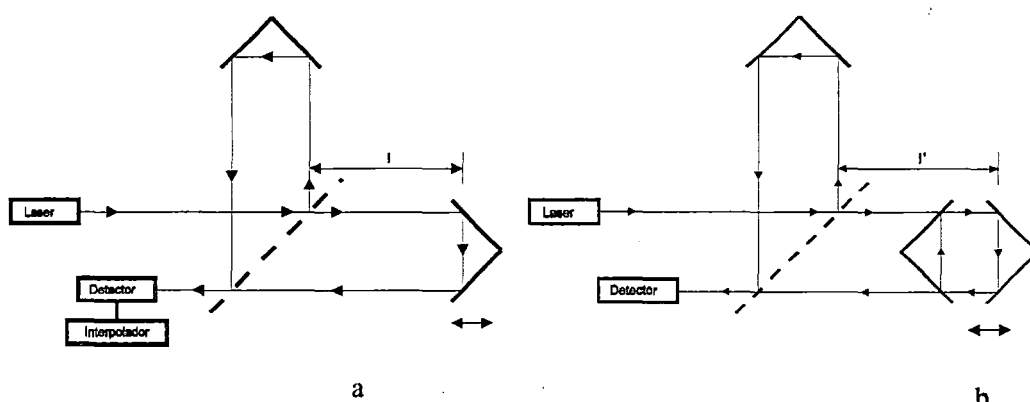


Figura 2.3-a) Interferômetro de Michelson com um Circuito Eletrônico Acoplado [Duduch, J. G., 1993].

Figura 2.3-b) Interferômetro de Michelson com o Caminho Óptico Duplicado para aumentar a resolução [Duduch, J. G., 1993].

Como a distância entre divisor de feixes e a face do prisma móvel dos interferômetros é aproximadamente a mesma ( $l=l'$ ) os dois feixes são similarmente afetados pelas variações no índice de refração do ar fazendo o interferômetro mostrado na figura 2.3-b 10 vezes mais estável neste sentido. Embora a duplicação do caminho óptico para aumentar a resolução de um interferômetro mostre vantagens comparadas a métodos eletrônicos com respeito a estabilidade, duplicar os feixes de medição e os de referência simultaneamente trazem vantagens sobre ambos os métodos, já que o movimento relativo entre o interferômetro e os componentes ópticos para duplicar os feixes não afetam o valor de saída, virtualmente eliminando o efeito de expansão térmica [Siddall & Baldwin, 1984,].

A interferometria é largamente usada para fornecer informações de posicionamento em máquinas ferramentas de ultraprecisão, tais como a localização relativa da peça e o deslocamento produzido. Esta informação do deslocamento realizado do conjunto laser é interfaceada por uma unidade de controle [Barkman, 1980] resultando em um sistema de controle de realimentação da posição. A unidade de controle interpola o programa gerando um sinal de comando relativo à posição (dentro do CNC) o qual é comparado com o dado da posição de realimentação do interferômetro para fechar o ciclo e corrigir o caminho da ferramenta adequadamente.

O uso de um interferômetro laser em ciclo fechado é uma aquisição muito importante em aplicações de medida de formas, particularmente quando os erros não ocorrem dentro da posição medida pelo servo-ciclo que controla a posição dos carros. Fechando o ciclo com a informação da posição realimentada de um interferômetro capacita o sistema a manter o caminho da ferramenta continuamente corrigido atuando em cada um dos eixos da máquina. O interferômetro pode ser usado como um sensor de posição ( para os eixos de uma máquina ferramenta) e a qualidade de uma superfície usinada pode ser aumentada devido a habilidade de o sistema de controle compensar os possíveis erros ( em subseqüentes passes, quando eles são repetitivos) modificando programa (CNC e aplicações de CN) ou corrigindo em tempo real.

## 2.6 Materiais para Fabricação de Ferramentas de Ultraprecisão

O material utilizado para a fabricação de ferramentas empregadas na usinagem de ultraprecisão deve atender a exigências específicas para que, após produzida, a aresta de corte da ferramenta possa ser reproduzida ou refletida dentro da melhor qualidade possível na superfície do componente a ser usinado.

A ferramenta deve ser construída observando-se características do material tais como:

- ◆ dureza
- ◆ módulo de elasticidade
- ◆ resistência ao esmagamento
- ◆ resistência ao cisalhamento
- ◆ calor específico
- ◆ comportamento térmico adequado
- ◆ composição química adequada
- ◆ não afinidade química com o material a ser usinado

O único material encontrado na natureza que fornece estas características, porém restrito a usinar materiais não ferrosos já que reage quimicamente com os ferrosos, é o diamante monocristalino. Este material quando encontrado puro contém somente átomos de carbono ligados quimicamente de forma covalente (muito fortes) em uma estrutura cúbica e octaedral que permite ao diamante uma grande resistência, diferenciando-o dos outros materiais para ferramentas.

A aresta de corte do diamante utilizada como ferramenta e o material da peça têm de atender a particulares exigências para adquirir altíssimas características de qualidade. A aresta de corte deve ter alta qualidade, isto é, a intersecção dos planos que a compõem devem ter um acabamento extremamente bom adquirido por processos tais como feixe de elétrons, usinagem química, polimento e usinagem por emissão elástica, de modo a reduzir as forças de corte pois a fricção entre a ferramenta e a peça é minimizada.

Tal especificação é feita para que a remoção do cavaco esteja dentro da faixa micrométrica e a aresta esteja totalmente isenta de entalhes já que estas pequenas irregularidades são refletidas no material a ser usinado, logo, tornando o componente inadequado para a aplicação [König, W; Weck, M; Spenrath, N; Luderich, J, 1991].

Tais ferramentas estão fora da faixa de componentes produzidos pelas operações mecânicas convencionais, já que isto as levaria a um processo de trincamento profundo, e então na sua grande maioria estão submetidas a uma gama de processos conhecidos como de Ultra Precisão não Convencionais [Miyamoto, I, 1987].

## **2.7 Características técnicas do torno ASG 2500**

### **2.7.1 Introdução**

O Torno ASG 2500 é o mais avançado sistema de multi-eixos com um CNC acoplado para torneamento com ferramentas de diamante monocristalino e retificação, já que a máquina é projetada e fabricada condicionada às duas montagens: com uma ferramenta de diamante monocristalino e com o cabeçote de retificação.

Adicionalmente, o ASG 2500 fornece a rigidez mecânica necessária para o uso com nitreto de boro cúbico, cerâmicas ou ferramentas de corte de carbetos para produzir componentes mecânicos de precisão em titânio, aço inoxidável e muitos metais ferrosos. Para cada versão da máquina ASG 2500 verificar-se a produção de uma faixa de componentes acabados em uma grande variedade de materiais.

O equipamento está habilitado a produzir, quando montado com uma ferramenta de diamante monocristalino, componentes tais como:

- ◆ lentes infravermelho complexas e calotas em germânio, silício, sulfatos de zinco, seleneto de zinco e outros cristais
- ◆ 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

Quando ao torno ASG 2500 é acoplado seu sistema opcional para retificação, este transforma-se em uma máquina retificadora de Ultra Precisão com um CNC. Esta montagem permite a produção de componentes de Ultra Precisão como por exemplo:

- ◆ lentes anesféricas em vários tipos de vidros e safira
- ◆ superfícies complexas com exatidão na faixa de submicrons em cerâmicas estruturais
- ◆ moldes de ultra precisão em aços endurecidos

Logo, o equipamento é perfeitamente adequado às suas aplicações. Na configuração para retificação é inigualável na produção de superfícies anesféricas em lentes de vidro, após a usinagem tais superfícies precisarão de pouco ou nenhum polimento. Fusos de mancais aerostáticos com um nível extremamente baixo de vibrações são usados para rotacionar o rebolo e a peça sob retificação. Esta performance não paralela reduz substancialmente os danos subsuperficiais que normalmente resultam quando da retificação.

### **2.7.2 Desempenho do Torno de Ultraprecisão**

O sistema de resolução do torno ASG 2500 está na faixa dos 10nm, portanto, habilitando-o a usinar diretamente formas complexas com exatidão dimensional de submicrons. A planicidade e a repetibilidade dos carros com mancais hidrostáticos a óleo e aerostáticos do fuso possibilitam o torno a produzir acabamentos superficiais de alta qualidade da ordem de 75 Angstrons Ra em muitos materiais.

Para obter resoluções desta ordem e acabamentos superficiais como especificado 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

meticulosamente combinada com os carros hidrostáticos e o fuso de mancais aerostáticos para produzir o mais exato sistema de usinagem de Ultra Precisão disponível no país [Catálogo Técnico da Rank Pneumo Inc, 1988].

### 2.7.3 Especificações técnicas do torno de Ultraprecisão ASG 2500

Tabela-2.4 Dados técnicos referentes a montagem com uma ferramenta de ponta única de diamante monocristalino [Catálogo Técnico da Rank Pneumo Inc, 1988]

Descrição	Máquina Básica de Torneamento	
Sistema de controle	CNC Allen Bradley série 8200	
Sistema de realimentação (Closed-Loop)	Interferômetro Laser Modelo 5518 HP	
Sistema de Isolamento	Isolamento Passivo 3 pontos	
	Projeto	Mancal hidrostático à óleo
	Deslocamento em X	254mm
Guias	Deslocamento em Z	152mm
	Velocidade	0,25 à 760mm/min
	Projeto	Mancal aerostático
Fuso da peça	Faixa de velocidade	100 à 2400 RPM
	Capacidade de carga	45Kg
Dimensões	Diâmetro	304mm
Máximas	Comprimento (Convexo)	152mm
usináveis das peça	Comprimento (Concavo)	152mm
Estação de ajuste da ferramenta com LVDT		Opcional
Utilitários	Potência elétrica	230V AC / 10/3KVA
	Suprimento de ar	100PSI (7bar) / 15 CFM
Área necessária para instalação		1830mm x 2740mm

## 2.7.4 Especificações técnicas da montagem do sistema opcional para retificação

Tabela-2.5 Dados técnicos referentes a montagem do cabeçote de retificação no corpo da máquina ASG 2500 [Catálogo Técnico da Rank Pneumo Inc, 1988]

Descrição	Montagem para grandes retificações (opcional)		Montagem para pequenas retificações (duplo fuso)(opcional)
Dimensões	Diâmetro	152mm	38mm
máximas	comprimento(convexo)	76mm	25mm
usináveis	comprimento(côncavo)	38mm	4,8mm
	Projeto	Mancal aerostático	Mancal de esferas (ar/óleo misturado com lubrificante)
Fuso de	Faixa de velocidade	3000 à 10.000 RPM	40.000 à 100.000 RPM
retificação	Sistema de acionamento	Motor AC integral	Motor AC integral
	Diâmetro do rebolo retificador	25 à 100mm	3 à 13mm
Estação de ajuste do rebolo retificador com LVDT		Incluído	Incluído
Utilitários	Potência elétrica	230V AC/10/6KVA	230V AC/10/6KVA
	Suprimento de ar	100 PSI (7bar) / 25 CFM	100 PSI (7bar) / 15 CFM
Área necessária para instalação		1830mm x 1520mm	1830mm x 1520mm
			Nota: O segundo fuso é usado para retificação de diâmetros de referência e localização de rebaixos sobre o molde

### **2.7.5. COMENTÁRIOS FINAIS**

Uma máquina de ultraprecisão é construída respeitando critérios estáticos e dinâmicos adequados para a estrutura, tem sistemas de dispositivos de posicionamento altamente desenvolvidos para o controle dos movimentos de cada eixo e um sistema interferométrico agregado altamente sofisticado.

O material utilizado para a fabricação da ferramenta, também, obedece critérios específicos já que o desempenho da operação e as características finais do componente estão interrelacionadas. O material normalmente utilizado para a ferramenta de ponta única é o diamante monocristalino e as operações de corte geralmente são realizadas em materiais não ferrosos tais como alumínio e cobre. Por outro lado, a usinabilidade de novos materiais, tais como cerâmicas, plásticos e zerodur, está sendo estudada ampliando a faixa de aplicações da técnica de usinagem com ponta única de diamante.



# CAPÍTULO

## 3

### **Processos de Usinagem de Ultraprecisão**

#### **3.1 Introdução**

O desenvolvimento tecnológico impõe a criação de novos materiais, os quais são difíceis de usar, como por exemplo matrizes metálicas feitas de compósitos, cerâmicas compostas e monolíticas, aluminados e polímeros de alto desempenho. A dificuldade em usar estes e outros novos materiais resultam de sua alta dureza e fragilidade, alta refractividade, pobres propriedades térmicas, reatividade química com a ferramenta de corte e não homogeneidade da microestrutura. Nestes e em muitos outros casos, o caminho que se mostra mais efetivo para usar tais materiais é o dos

métodos não tradicionais. Definir precisamente os processos de usinagem não convencionais é algo extremamente difícil devido a enorme quantidade de operações que se inserem nesta categoria. Normalmente, os processos não convencionais são considerados atividades de fabricação que se utilizam de formas comuns de energias em novos caminhos ou que aplicam formas de energias nunca antes usadas.

Os processos não convencionais são divididos de acordo com a forma de energia empregada. Como parte de um grande conjunto de atividades de fabricação nesta área podem-se citar os seguintes processos normalmente aceitos e empregados atualmente:

- ◆ mecânicos
- ◆ elétricos
- ◆ térmicos
- ◆ químicos

O grupo de processos mecânicos não tradicionais está intimamente ligado à aplicação direta de abrasivos para a remoção de material, por exemplo, de uma peça sob operação. Os processos não convencionais elétricos restringem-se a aplicações em que o material da peça seja condutor de eletricidade

Os processos térmicos são empregados em materiais extremamente duros ou de baixa usinabilidade, não são afetados pelas propriedades físicas do material da peça e dependendo da aplicação do componente há a necessidade de remoção das zonas termicamente afetadas. Nesta categoria encaixam-se, por exemplo, feixes de elétrons, fótons e feixes de íons.

O método de usinagem química cresceu rapidamente. A remoção de material ocorre por ação química sem a aplicação de forças sobre a peça, permitindo a fabricação do componente sem distorções ou danos. Adicionalmente, devido à usinagem ocorrer sobre toda a superfície da peça simultaneamente, a qualidade efetiva da superfície é extremamente alta [Metals Handbook, 1986].

Em seguida alguns processos que fazem parte de alguma das áreas de usinagem acima citadas serão descritos e na medida em que forem discutidos serão apresentadas características de cada operação, seja mecânica, elétrica, térmica ou química. Quando estas características são comparadas ao processo de usinagem de ultraprecisão com ferramenta de ponta única de diamante pode-se, então, verificar a simplicidade, o desempenho e a qualidade da operação de corte utilizando-se o diamante como ferramenta de corte.

A usinagem de ultraprecisão necessita de ferramentas sólidas que possam produzir cavacos com finas espessuras. Quando a espessura torna-se menor que  $1\mu\text{m}$  a tensão de corte no material da peça e na ferramenta aumenta drasticamente, resultando em rápido desgaste da ferramenta.

Em operações de usinagem com profundidade de corte inferior a  $1\mu\text{m}$ , verifica-se que a distribuição das deslocamentos móveis em metais cristalinos aproxima-se de zero e as forças de corte têm de vencer as forças interatômicas dentro do cristal, que são consideravelmente grandes.

Diante de tal dificuldade muitas vezes opta-se pela retificação com rebolo diamantado em vez da utilização de ferramenta com ponta única de diamante, a qual usa finos grãos abrasivos para remover inicialmente grande quantidade de material e gradativamente até o acabamento final retirar quantidades extremamente pequenas ou finos cavacos. As arestas de corte dos grãos (de uma extremidade à outra) estão sujeitas a grandes valores de pressão e temperatura. Em função disso liberam altas densidades de energia. Os grãos abrasivos são desgastados rapidamente.

Todavia, em retificação, usinagens consecutivas são possíveis porque quando os grãos abrasivos são cisalhados sob altas tensões novas arestas de corte são formadas aleatoriamente. Logo a superfície exibe uma distribuição aleatória de picos e vales [McKeown, 1986]. Podemos verificar então que, mesmo a retificação sendo um

processo de ultraprecisão, torna-se inviável para a fabricação de superfícies espelhadas ou que tenham um acabamento verdadeiramente especular.

É importante, neste momento, ressaltar que este tipo de acabamento superficial pode somente ser alcançado através do uso de ferramentas com ponta única de diamante, as quais têm suas arestas de corte com raios da aresta de corte da ordem de 10 nm. Outros processos de ultraprecisão intimamente ligados a remoção de material através de partículas abrasivas livres em fluidos, ataque químico, eletroquímico e a incidência de feixes de alta energia sobre a superfície, serão discutidos. A usinagem através de ferramenta de ponta única de diamante (item 3.9) será tratada em mais profundidade por estar relacionada com o objetivo deste trabalho.

### **3.2 Usinagem por Emissão Elástica**

Ferramentas sólidas exibem grandes quantidades de energia específicas de remoção, altas tensões e temperaturas na aresta de corte que causam rápido desgaste da ferramenta e não previnem os danos subsuperficiais do material da peça se não houver cuidados especiais na seleção do material da ferramenta e condições de corte. Entretanto, para metais duros, os processos de lapidação e polimento que usam abrasivos livres são largamente empregados, apesar de o primeiro introduzir microtrincas em materiais frágeis e o segundo ser de difícil automação dificultando a fabricação em massa. Uma técnica particularmente importante é aquela conhecida como Usinagem por Emissão Elástica, na qual o processo de remoção do cavaco pode ser tão pequeno como molecular ou do tamanho de um bit atômico.

Uma esfera de poliuretano ou um cilindro é rotacionado em um líquido carregando uma fina suspensão de grãos abrasivos com dimensões menores que 10 nm os quais são acelerados para atacar o material da peça tangencialmente e remover partículas muito pequenas (Figura 3.1). Normalmente, superfícies com planicidades de 0.1-0.05  $\mu\text{m}$  ou melhores, associadas a camadas danificadas de cerca de alguns nanômetros de profundidade são conseguidas. A técnica é muito apropriada para o polimento livre de

danos de superfícies super planas, por exemplo, superfícies de cerâmica dura [McKeon, 1986]

Por outro lado, alguns dos componentes de ultraprecisão fabricados atualmente têm formas complexas as quais somente podem ser produzidas através de arestas de corte com raios da ordem de nanômetros, já que a exatidão de forma devida ao microposicionamento dos carros da máquina pode ser controlada.

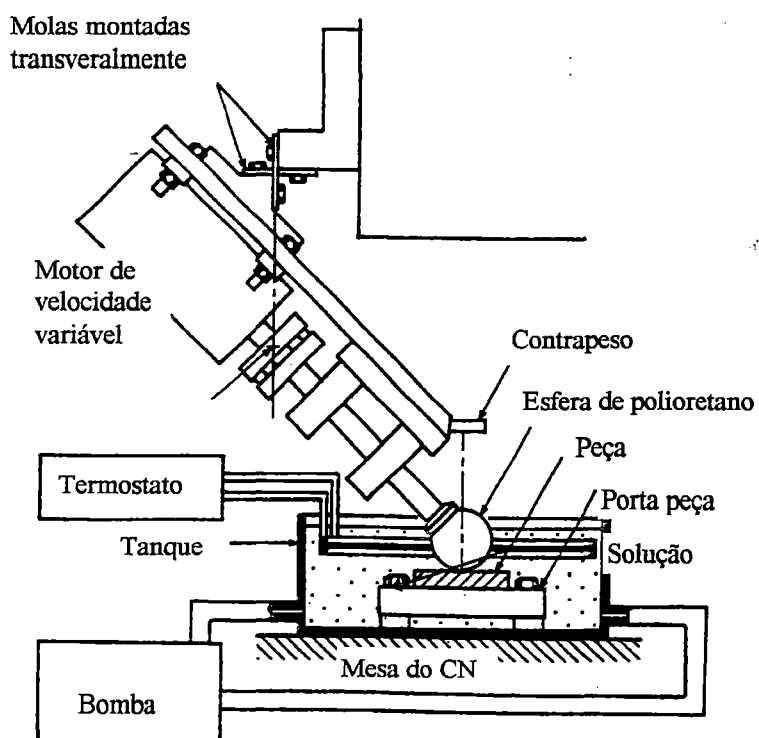


Figura 3.1 Desenho esquemático de uma máquina para usinagem por emissão elástica [Mc Geough, J.A., 1988].

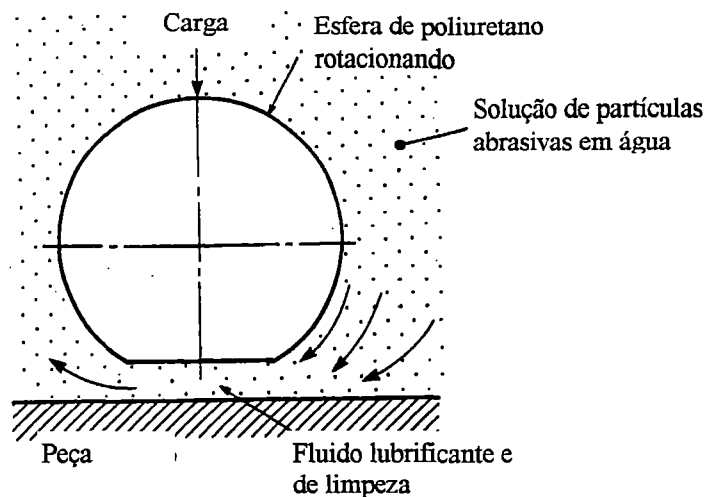


Figura 3.2 Esquema referente a aceleração das partículas abrasivas à frente da peça em uma operação de usinagem por emissão elástica [Mc Geough, J.A., 1988].

### 3.3 Usinagem Fotoquímica

O processo é usado como alternativa na remoção de pequenas quantidades de material da peça que não podem ser usinadas através de técnicas e ferramentas convencionais, por serem duras ou de padrão complexo. É usada para fazer peças com pequenas dimensões ou difíceis de serem estampadas, para gerar trilhas sobre circuitos impressos, alguns discos de encoders e gerar os padrões para circuitos integrados sobre wafers de silício. É efetiva para peças de micro-engenharia tais como aberturas para injeção de tinta e sensores de pressão em miniatura.

A tecnologia de fabricação de circuitos impressos depende fortemente das características anisotrópicas do silício depois do ataque químico. As regiões que não serão usinadas no componente são protegidas por uma máscara em seguida o elemento é submetido a um banho em uma solução química que o atacará. A usinagem fotoquímica (PCM), algumas vezes conhecida como ataque foto químico,

utiliza-se das técnicas fotográficas e da fotoresistência (ou resistência à radiação luminosa) associadas a um banho químico jateado para remover material de áreas específicas de uma peça substrato. É especialmente atrativa quando as peças são complexas e devem ser produzidas em folhas metálicas relativamente finas. O processo envolve os seguintes passos, sumariados na Figura 3.3.

- 1ª - O padrão necessário é produzido sobre um filme fotográfico ou uma placa de vidro, denominada foto-ferramenta.
- 2ª - A folha metálica é quimicamente limpa e coberta com um filme fotoresistente sensível à luz.

O material fotoresistente é normalmente o negativo da peça; isto é, torna-se insolúvel quando atacado quimicamente para desenvolver o perfil projetado da peça depois de ter sido irradiado com luz ultravioleta. A fotoresistência é normalmente desenvolvida em ambas as formas: líquida ou filme seco.

Quando o primeiro tipo é usado, o substrato deve ser imerso em um banho e logo em seguida seco. Se o último tipo for usado, o filme seco deve ser laminado sobre uma folha metálica através de uma combinação de temperatura e pressão.

O próximo estágio envolve a impressão por contato da imagem da foto-ferramenta sobre o material fotoresistente, com a luz ultravioleta usada como fonte da exposição. A fotoresistência do material é, então, desenvolvida produzindo uma película de material fotoresistente sobre o metal.

Através do banho químico faz-se aberturas na camada fotoresistente, normalmente com soluções aquosas férricas ou cloreto de cobre às quais adiciona-se ácido hidrocloreídrico em quantidades cuidadosamente controladas e, então, os componentes são finalmente produzidos [McGeough, J. A., 1988; Weck, Manfred, 1937; McKeown, 1986].

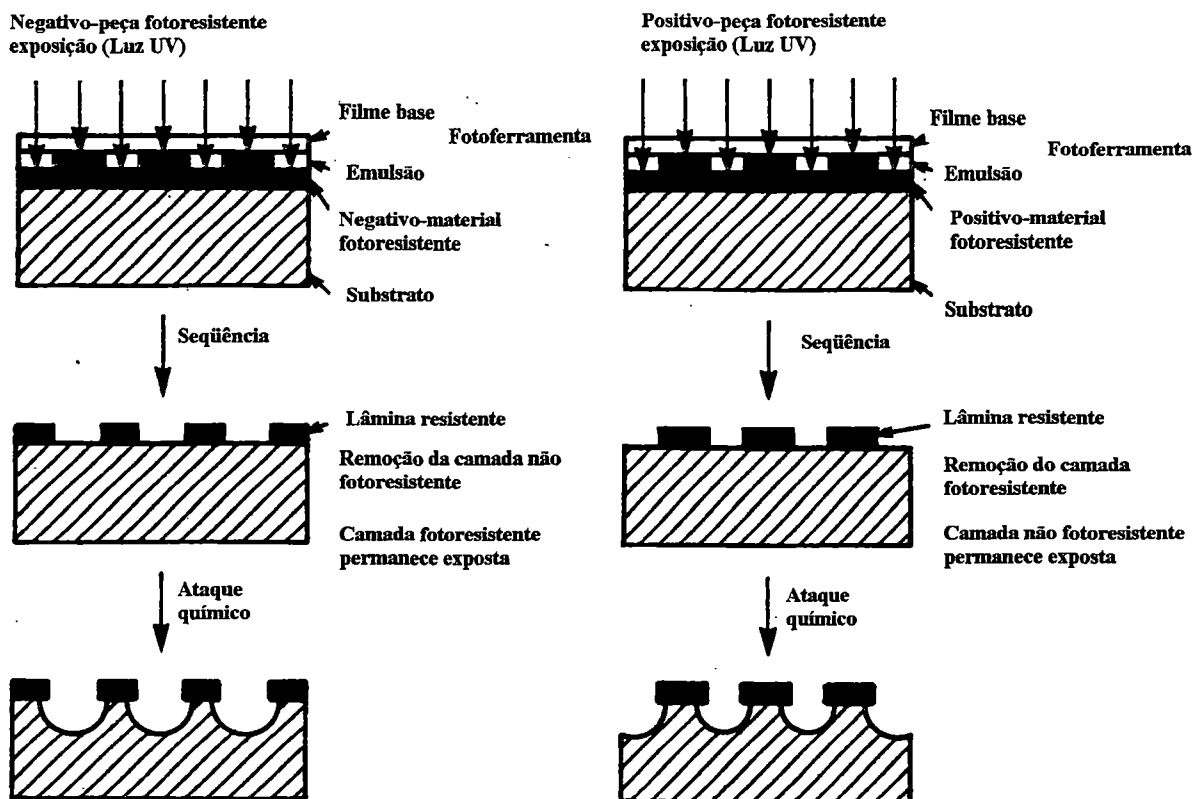


Figura 3.3 Processamento da cobertura do substrato com material fotoresistente em peças negativas e positivas [Mc Geough, J.A., 1988].

### 3.4 Usinagem com Feixes de Alta Energia

Para muitos processos de usinagem de ultraprecisão, a nível de nanotecnologia, a técnica do feixe de alta energia pode ser usada para remover ou acrescentar material.

Uma técnica particularmente interessante é a usinagem com feixe de íons a qual é um processo de bit-atômico, normalmente chamado de polimento iônico. Os íons de argônio ou outros gases inertes, a altos níveis de energia cinemática da ordem de 1 a 20 keV, bombardeiam a superfície da peça pela injeção de átomos por colisão e emissão. Este fenômeno é chamado de “batida iônica” (ion sputter). A profundidade de penetração de um íon em 1 keV é estimada do padrão de difração de elétrons ser cerca de 5  $\mu\text{m}$ . O método não gera calor a níveis intoleráveis, nem causa danos por



deformação mecânica na camada superficial usinada em larga extensão. Alguns dos íons de argônio são retidos, substituindo átomos deslocados da peça. Este processo fornece uma resolução de usinagem de cerca de 10 nm e normalmente é usado em usinagem de ultraprecisão para:

- ◆ reduzir a aspereza de lentes de vidro e moldes de metal duro para moldagem a quente de lentes de vidro;
- ◆ a afiação de indentadores de diamante;
- ◆ a afiação da aresta de ferramentas de corte;
- ◆ fabricação de piezoatuadores em miniatura;
- ◆ fabricação de pivôs micro-elásticos;
- ◆ fabricação de redes de difração ópticas;
- ◆ fabricação de padrão de circuito integrado atacado quimicamente;

Nas duas últimas aplicações, máscaras-padrão apropriadas têm de ser localizadas sobre a peça através da qual um padrão ultra-fino pode ser conseguido. Há expectativas que os micro-feixes de íons de 1  $\mu\text{m}$  de diâmetro tornem-se rapidamente disponíveis e com os recentes desenvolvimentos no controle de posição será possível especificar micro-padrões, bidimensional e tridimensionalmente, diretamente em peças muito pequenas.

Existem provavelmente cerca de trinta processos de usinagem não convencionais na engenharia de fabricação em uso hoje. Muitos removem o material por meio térmico, elétrico ou químico. A usinabilidade em processos convencionais depende fortemente do material a ser cortado, por outro lado, na usinagem não convencional não é um parâmetro muito importante já que a força mecânica não é dependente do material removido. Em tais processos não há a produção de forças com grandes intensidades que distorçam partes finas e frágeis. Normalmente, não geram altas temperaturas como no processo de corte, as quais danificam as camadas superficiais causando instabilidade e ultimamente diminuindo o tempo de vida da peça por fadiga [McKeown, 1986; Miyamoto, I, 1987].

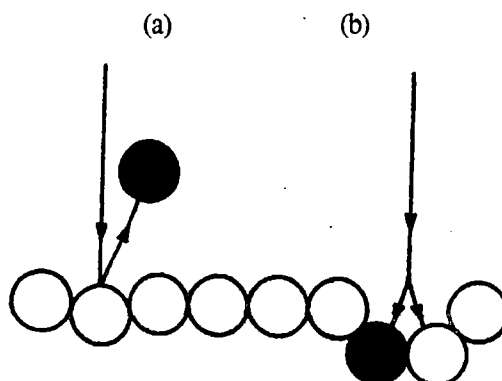


Figura 3.4 Bombardeamento de íons em incidência normal à superfície (partículas sombreadas) [Mc Geough, J.A., 1988].

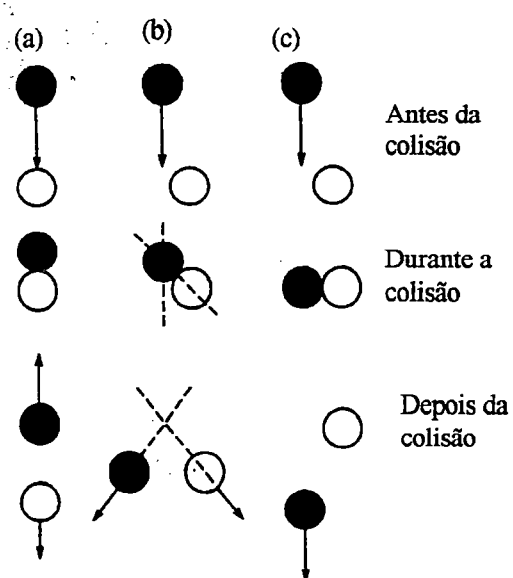


Figura 3.5 Três tipos diferentes de colisões entre íons e átomos (partículas sombreadas) - (a massa do íon é menor que a do átomo) [Mc Geough, J.A., 1988].

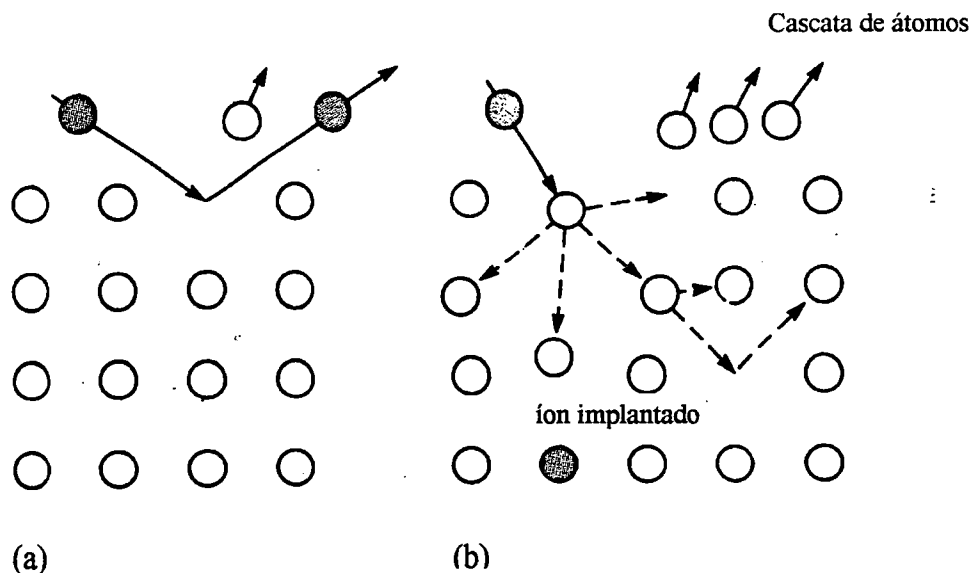


Figura 3.6 Efeitos das baixas e altas energias sobre a remoção dos átomos - (a) caso de baixa energia ; (b) caso de alta energia [Mc Geough, J.A., 1988].

### 3.5 Usinagem Eletroquímica

A eletrólise é o nome dado ao processo químico que ocorre, por exemplo, quando uma corrente elétrica é feita passar através de dois materiais condutores imersos em uma solução líquida. Uma aplicação popular da eletrólise é o processo de eletrodeposição de metais onde uma camada metálica é deposita sobre a superfície de um metal polarizado catodicamente. Correntes com densidades (corrente por unidade de área atacada) da ordem de  $2 \times 10^{-2} \text{ A cm}^{-2}$  são usadas, a espessura das camadas depositadas são pouco maiores que cerca de  $10 \mu\text{m}$ .

Pode-se citar como exemplo de operação e também analisar o seu potencial de remoção de material, a operação de dissolução anódica denominada eletropolimento onde o objeto a ser polido é o anodo em uma célula eletrolítica. As irregularidades sobre a superfície são dissolvidas, preferencialmente, e removidas tornando a superfície plana e polida.

O ECM é similar ao eletropolimento já que este é também um processo de dissolução anódica. Entretanto, as taxas de remoção oferecidas pelo processo de eletropolimento são consideravelmente menores que aquelas necessárias nas práticas de usinagem.

Na usinagem eletroquímica, como citado acima, a peça e a ferramenta são feitas catodo e anodo, respectivamente, de uma célula eletrolítica por onde uma diferença de potencial normalmente fixada em cerca de 10 V é aplicada entre a ferramenta e a peça.

Uma solução eletrolítica adequada (i.e. solução aquosa de NaCl) foi escolhida para que a forma do catodo permaneça invariável durante a eletrólise. A solução eletrolítica cuja condutividade total é de  $0,2 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  é também bombeada em taxa de, aproximadamente,  $3 \text{ a } 30 \text{ ms}^{-1}$  através do espaço entre os eletrodos (width gap tool-workpiece) para remover os produtos da usinagem e diminuir os efeitos indesejados, tal como aqueles que aumentam com a geração de gás catódico e aquecimento elétrico.

A taxa de remoção do metal é inversamente proporcional à distância entre os eletrodos, i.e. aproximadamente. Como procedimento de usinagem e com os simultâneos movimentos do catodo à taxa típica da ordem de  $0,02 \text{ mm}^{-1}$  em direção ao anodo, a distância entre o catodo e o anodo (width gap) tenderá gradualmente a um valor de estado constante ao longo de todo o comprimento da peça (anodo).

O valor normalmente empregado para dimensionar a distância (width gap) entre o catodo e o anodo é da ordem de  $0,4\text{mm}$  com densidade média de corrente de 50 a  $150 \text{ Acm}^{-1}$ . Se houver a necessidade de usinar formas complexas em materiais duros, uma matriz complementar pode primeiro ser produzida sobre um catodo de material mole e depois o eletrodo é então usado para usinar eletroquimicamente a peça.

Algumas vantagens podem ser verificadas nesta técnica:

- ◆ A taxa de usinagem do metal não depende da sua dureza
- ◆ Formas complicadas podem ser usinadas sobre metais duros
- ◆ Não existe desgaste da ferramenta [McGeough. J. A., 1988; Weck, Manfred, 1937; Slocum, Alexander . H, 1992], talvez por não haver a interação ferramenta peça como ocorre normalmente em processos convencionais de corte.

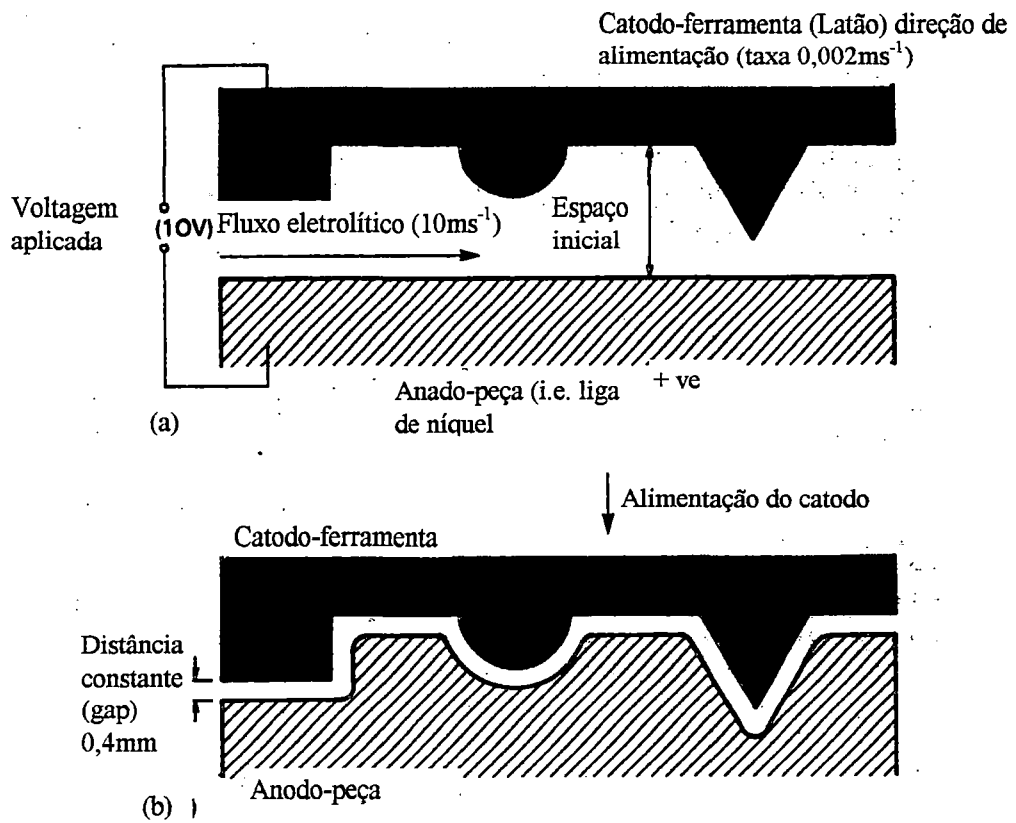


Figura 3.7 Configurações para a ECM - ferramenta catodo e peça anodo-(a) inicial ; (b) final [Mc Geough, J.A., 1988].

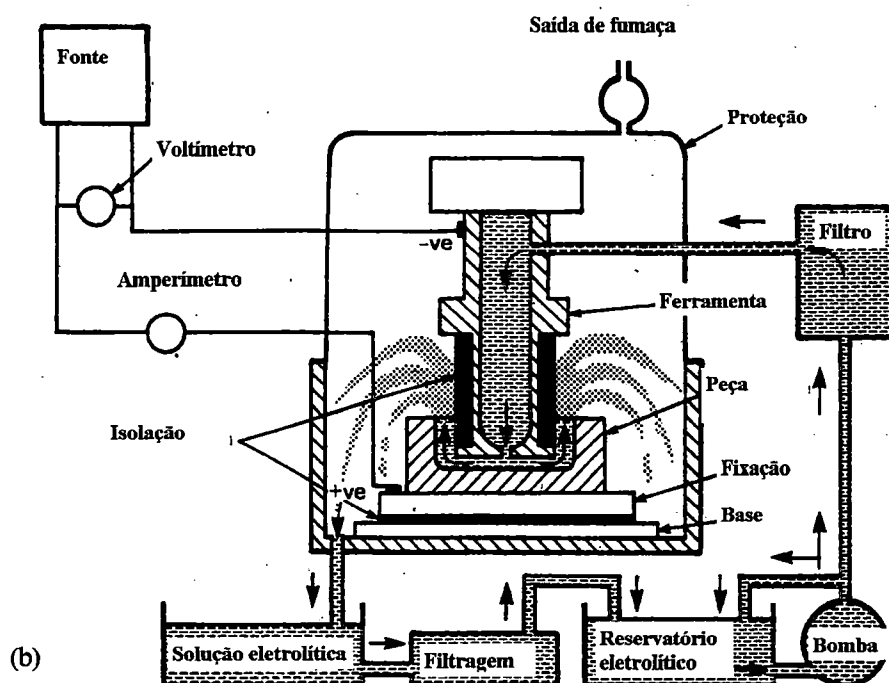


Figura 3.8 Desenho esquemático de uma máquina industrial de usinagem eletroquímica [McGeough, J.A., 1988].

### 3.6 Usinagem com Feixe de Elétrons

Uma máquina de EBM constitui-se em uma grande câmara de vácuo da ordem de  $10^{-4}$  torr, onde estão dispostos os componentes eletromecânicos, eletrônicos, magnéticos e ópticos que produzem e orientam o caminho do feixe de elétrons até o objeto a ser usinado. A fonte de elétrons é um “canhão de elétrons”, o qual é basicamente um triodo consistindo de um catodo, uma tela copo inversamente inclinada com relação ao catodo e um anodo em um potencial zero.

O catodo é normalmente feito de um filamento de tungstênio, o qual é aquecido entre 2500 e 3000°C afim de emitir os elétrons. Uma medida deste efeito é a corrente de emissão cuja a magnitude varia entre 25 e 100 mA. Correspondentes densidades de correntes permanecem entre  $5$  e  $15 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Esta quantidade é determinada por uma série de fatores, incluindo o tipo do material do catodo e sua temperatura.

A dimensão da corrente de emissão é também influenciada pela alta voltagem, normalmente de cerca de 150 kV, a qual é aplicada entre o catodo e o anodo afim de acelerar os elétrons na direção da peça. Depois de acelerados, os elétrons são focalizados através de um campo formado pela tela copo, logo, os elétrons deslocam-se através de um furo no anodo. Depois de atravessarem a cavidade do anodo, o feixe de elétrons é refocalizado através de um sistema de lentes magnéticas.

Por este meio, o feixe tem sua direção à frente da peça constantemente controlada. A velocidade dos elétrons se mantém conhecida através do percurso de aceleração da voltagem, até eles chocarem-se com a peça, sobre uma área bem definida com um diâmetro tipicamente da ordem de 0.025mm.

O diâmetro mínimo é da ordem de 2  $\mu\text{m}$  para densidades de potência de  $10^6 \text{ Kw.cm}^{-2}$  [Weck, Manfred, 1937]. Então a energia cinemática dos elétrons é rapidamente transformada em calor, causando um correspondente alto aumento na temperatura da peça, muito acima do ponto de fusão.

A remoção de material através da evaporação então ocorre, densidades de potência da ordem de  $1.55 \text{ MWmm}^{-2}$  estão envolvidas no EBM, virtualmente todos os materiais de engenharia podem ser usinados através desta técnica [McGeough, J.A., 1988].

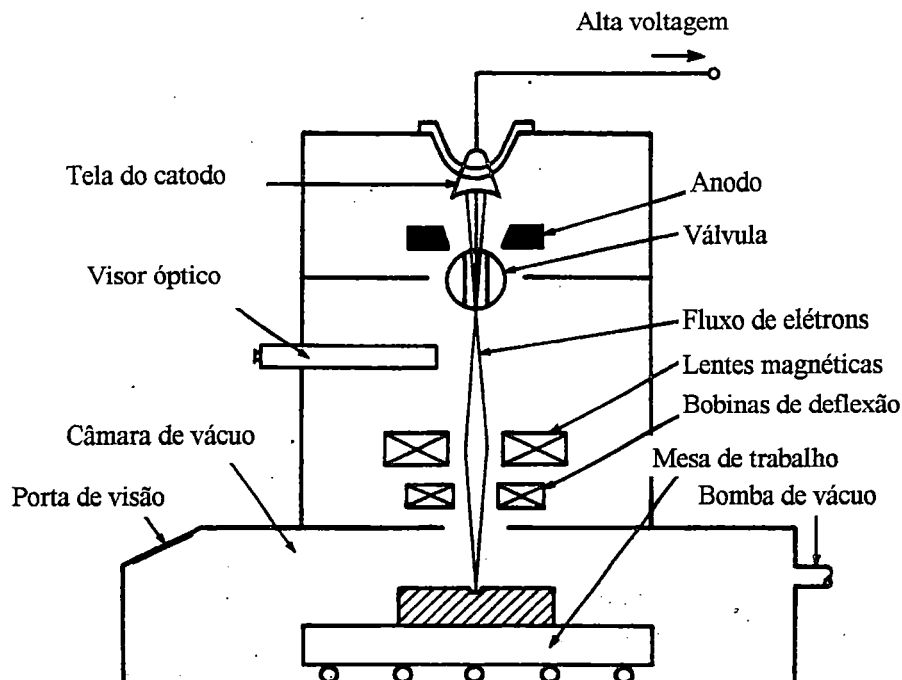


Figura 3.9 Desenho esquemático de uma máquina de usinagem com feixe de elétrons [McGeough, J.A., 1988].

### 3.7 Retificação

A retificação talvez seja um dos processos mecânicos de remoção que fornece melhor exatidão dentre as operações de fabricação e uma das mais usadas na fabricação de componentes de precisão. A retificação não é utilizada, como normalmente acredita-se, somente para gerar superfícies planas ou objetos circulares, mas muito freqüentemente para criar contornos de precisão em muitos tipos diferentes de peças, incluindo pistas para rolamentos de esferas e fusos.

Muitas outras máquinas de corte de metal usam um número discreto de superfícies de corte, entretanto em retificação milhares de pequenas superfícies de corte sobre o rebolo retificador produzem um efeito médio de corte quando a superfície do metal é tocada. Os materiais usados para fazer os rebolos podem ter uma magnitude de dureza maior que os utilizados para as ferramentas de corte convencional, logo o efeito do desgaste da ferramenta sobre a exatidão pode ser grandemente reduzido.



Também é possível a dressagem, assim o tempo de parada da máquina para a mudança de ferramenta pode ser minimizado. Inicialmente algumas peças podem ser retificadas com tolerâncias de precisão e freqüentemente em altos volumes a uma taxa muito econômica.

Existem duas grandes categorias de retificação, a retificação convencional e a retificação com alta taxa de remoção de material. A primeira é melhor conhecida e usada como uma operação de limpeza, removendo somente pequenas camadas metálicas (0,1  $\mu\text{m}$  para uns poucos milímetros no máximo). Em cada passada, o rebolo é indexado na peça uns poucos micrometros ou mais. Existem outros tipos de processos de retificação que também indexam o rebolo na superfície da peça para imprimir-lhe alguma forma (retificação cilíndrica interna e retificação de pistas de rolamento externa) e variações nas formas complexas a serem retificadas em blocos metálicos.

É importante verificar que com o uso da ferramenta de diamante para dressar o rebolo de retificação, normalmente alguns perfis podem ser desenvolvidos. Em retificação com alimentação por arraste, técnicas contínuas de dressagem do rebolo permitem formas completas a ser cortadas em um 'blank' com profundidades de corte que talvez sejam da ordem de centenas de milímetros. Em processos de retificação com profundas retiradas de materiais torna-se necessário contínuas dressagens do rebolo, grandes quantidades de fluido refrigerante e altas forças de atuação no eixo são necessárias.

A exatidão do processo de retificação é função de muitos fatores, incluindo a precisão da máquina, o dressador do rebolo, o controle da temperatura do fluido refrigerante, o método de fixação e a taxa de alimentação. Quando estes fatores são apropriadamente controlados obtêm-se exatidões da ordem de 1 parte em  $10^4$  a  $10^5$ . Acabamentos superficiais produzidos por retificação de precisão são tipicamente  $1/4\mu\text{m Ra}$  e podem ser tão bons quanto  $1/20 Ra$ . Os vales são normalmente da ordem

de 0 a  $0.8\mu\text{m}$ . O melhor acabamento superficial é produzido quando o rebolo retraça seu caminho sobre a peça, não produzindo grandes centelhas.

A superfície produzida por retificação tem muitas formas microscópicas de picos e vales, causadas pela forma das partículas abrasivas do rebolo. Peças de aço rapidamente oxidam se não forem protegidas, e serão muito suscetíveis ao microdesgaste durante o contato com outras superfícies de aço se elas não forem bem lubrificadas. Adicionalmente, devemos verificar que, quando projetamos uma máquina de ultra precisão, os picos e vales formados na superfície por retificação produzem micromovimentos que podem ser comparados aos de um automóvel sendo dirigido em uma rua com o solo coberto por pedras cuja forma é semelhante a de um paralelepípedo, logo alguns rolamentos fazem contato com a superfície em presença desta características.

Nos dois tipos de retificação citados é necessário um efeito médio elástico ou outros processos tais como alargamento e superacabamento, são necessários para nivelar os picos e vales [Smith, S.T. 1989; Slocum. H. Alexander, 1992]

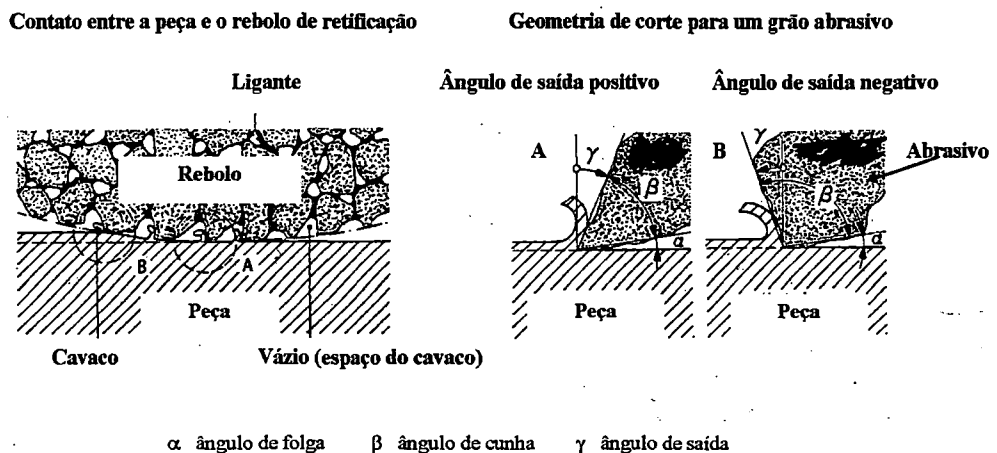


Figura 3.10 Desenho esquemático da interação peça-rebolo e da geometria de um grão abrasivo [Weck, 1937].

### 3.8 Lapidação

A lapidação é um tipo de processo mecânico para remoção de material ou desgaste por abrasão da superfície da peça, onde a ferramenta e a peça movimentam-se em relação ao outro com um composto abrasivo aplicado livremente na interface peça-ferramenta.

O composto consiste de finos grãos abrasivos suspensos em um fluido que os desloca de um ponto a outro sobre a superfície da peça à base de óleo mineral. Durante a lapidação os grãos quebram-se devido às cargas mecânicas. Isso resulta em decréscimo da taxa de remoção do metal, mas constante melhora do acabamento superficial, já que a quebra dos grãos implica em menor granulometria.

Com este processo, somente cerca de 10  $\mu\text{m}$  do material são tipicamente removidos, entretanto melhor exatidão é obtida. A lapidação é normalmente utilizada para remover finos riscos deixados pela retificação ou brunimento e/ou fazer finas correções para aumentar a exatidão dimensional (retilidade, planicidade e circularidade).

Materiais frágeis (cerâmicas) tendem a lapidar melhor que os materiais dúcteis (aço) porque a lapidação composta parece cortar o material sem causar nenhuma deformação plástica. O perfil pode ser acabado manualmente para a forma desejada (espelhos planos) e então usado para corrigir a geometria de outras superfícies (pista dos rolamentos de aço endurecidos).

Adicionalmente, pequenos perfis manuais (hand laps) podem ser usados para corrigir irregularidades locais. Utilizando-se estes perfis trabalhados à mão e com um sistema de medição de boa qualidade pode-se adquirir normalmente a exatidão e planidade desejada [Slocum, Alexander, 1992; Une, A et al, 1982].

O processo de lapidação, entretanto, oferece como desvantagem a produção de numerosas microindentações sobre superfícies metálicas, em toda a área de atuação do grão abrasivo já que este está livre e imerso em uma solução líquida, produzindo trincas detectáveis e deslizamentos ocasionais que crescem numericamente com a dureza [Spur, G.; Simpfendörfer, D.; Sabotka, I. 1987]

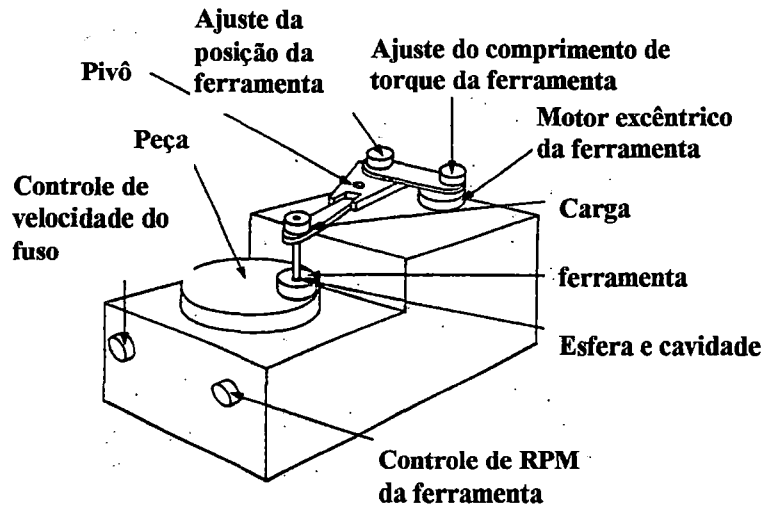


Figura 3.11 Descrição esquemática de uma máquina lapidadora [Frause, J. L., 1990].

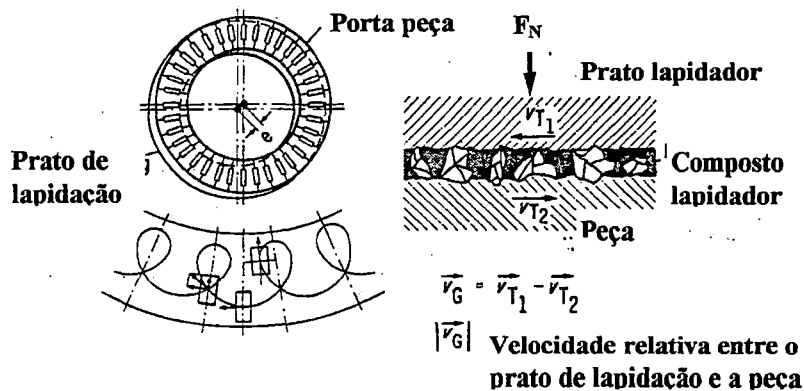


Figura 3.12 Vista esquemática da interação prato lapidadores, compostos lapidantes e a peça [Spur, G., et al, 1938]

### 3.9 Usinagem com Ponta Única de Diamante

Historicamente, o corte de ultra precisão dos metais, dentro dos conceitos atuais, começou a ser investigado nos anos 60 com o advento da demanda da ciência e tecnologia para energia, computador, eletrônica e aplicações de defesa.

Deve-se notar que o trabalho pioneiro deixado por J.B. Bryan era específico no Lawrence Livermore National Laboratory. Nos anos 70, o trabalho experimental era específico em suas aplicações para componentes ópticos de formas complexas.

Nos anos 80, estes extensivos esforços resultaram no desenvolvimento de uma máquina ferramenta altamente avançada com uma metrologia e controle muito sofisticados e uma ferramenta de diamante de boa qualidade.

O corte de ultraprecisão dos metais atualmente é uma técnica chave para a fabricação de componentes utilizados em sistemas em uma variedade de ciências avançadas e aplicações tecnológicas.

Nos anos 60, utilizando uma máquina ferramenta disponível naquele momento, iniciara-se seu desenvolvimento como um método promissor de fabricação mecânica dedicada ou de peças ópticas de alta qualidade, essenciais para sistemas particulares avançados.

Entretanto nos anos 70, a técnica foi aplicada para a produção de uma variedade de componentes ópticos por sua alta precisão, versatilidade e seu baixo custo total de fabricação.

Exemplos são vistos nos espelhos dos reatores de fusão para confinamento inercial, i.e., espelhos com imagens de formas não convencionais e assim por diante. Nos anos 80 a técnica resultou num extenso uso industrial para a fabricação de espelhos de varredura de alumínio (aluminium scanner mirrors), tambores de substratos de

alumínio (aluminium substrate drums) em máquinas fotocopiadoras, substrato de alumínio para discos rígidos de computadores, os quais necessitam de um acabamento superficial muito fino, rugosidade de algumas dezenas de nanômetros (P-V) e exatidão de forma micrométrica a submicrométrica. Adicionalmente a estas aplicações industriais, as mais recentes aplicações do corte de ultraprecisão dos metais são a fabricação de componentes ópticos com formas sofisticadas e extremamente alta qualidade superficial e geométrica.

O uso de substrato de alumínio para espelhos de incidência raze para telescópios de raio-x é particularmente um exemplo da demanda de componentes ópticos não convencionais com exatidão de forma axial ( $0,2\mu\text{m}$  P-V);  $2\mu\text{m}$  de exatidão de circularidade sobre um diâmetro superior a  $1,5\text{m}$ ;  $5\text{nm}$  (Rms) de rugosidade [Wills - Moren et al., 1982; McKeown et al., 1987].

Outro exemplo é o processo de “fly cutting” para produzir espelhos cilíndricos elípticos usado para radiação orbital em sincrotron (SOR), na qual  $0,13\mu\text{m}$  (P-V) com  $0,043\mu\text{m}$  (Rms) de exatidão de forma e  $22,4\text{nm}$  (P-V) com  $3\text{nm}$  (Rms) de rugosidade são obtidos sobre algumas dezenas a centenas do comprimento em mm em cobre OFHC [Moriyama et al., 1987; Uchida et al., 1991]. Outro exemplo de capacidade única é visto no corte com diamante na produção de microcanais sobre um disco coberto com uma fina camada de cobre o qual é usado como “mestre” na produção de novos discos ópticos de memória com altíssima resolução [Nagashima et al, 1990].

O acabamento espelhado de materiais frágeis é um novo e importante tópico de pesquisa no torneamento com diamante. A mecânica das fraturas prevê que igualmente em sólidos frágeis, o material pode ser removido pela ação do fluxo plástico, como no caso dos metais, deixando a superfície livre de trincas quando o processo de remoção ocorre em uma profundidade de corte menor que a profundidade crítica [Puttick et al., 1988].

Cuidadosamente [Saito, 1978; Benjamin, 1978] tem mostrado uma variedade de materiais infravermelhos de natureza frágil que são usináveis pelo torneamento com diamante.

Desde então significantes trabalhos experimentais têm sido registrados [Decker et al., 1979; Koderá et al., 1987; Blake et al., 1988, 1990; Syn et al 1988; Shore, 1989] sobre acabamento de materiais frágeis para componentes ópticos através da usinagem com ponta única e obviamente pelo processo mais econômico que é o corte com multi pontas, i.e., na retificação de regime dútil.

Vários pesquisadores mostraram que o Si e o Ge podem ser acabados com rugosidade superficial de algumas dezenas nm (P-V) quando corretamente especificadas as condições de corte utilizando uma máquina ferramenta suficientemente rígida e precisa.

Afim de superar os problemas de desgaste das ferramentas de ponta única, o corte com multi-pontas é obviamente o processo mais econômico quando a usinagem no regime dútil é realizada através do desenvolvimento das condições adequadas de máquina ferramenta e aresta de corte.

Um interessante registro mostrou que o Módulo de Ruptura (MOR) de uma amostra de nitreto de silício é aumentado por um fator de 2 a 3 vezes quando retificado no regime dútil, comparado a retificação tradicional os materiais frágeis são dominados por fraturas [McKeown, Shore et al., 1991]. Verifica-se que os fatores críticos para operações sucessivas no regime dútil para materiais frágeis são a exatidão do sistema da máquina e uma rigidez dinâmica suficientemente alta entre o rebolo e a peça.

A usinagem com ponta única de diamante é resultado do rápido crescimento da engenharia de precisão e ou ultraprecisão mesmo os fatores que as diferencia sendo extremamente simples, produzem efeitos altamente significativos que têm como resultado componentes de altíssima qualidade. Estes componentes podem ser

empregados pelas indústrias óptica, eletrônica e mecânica as quais exigem exatidão de forma micrométrica e rugosidade superficial na faixa nanométrica.

Claramente, estas singularidades do processo somente podem ser obtidas se a ferramenta, que é uma parte de um grande sistema, o centro de usinagem de ultraprecisão, puder transferir a altíssima qualidade a qual está submetida integralmente à superfície da peça somando-se a isto toda e qualquer influência que a máquina, o meio ambiente e / ou erros de operação que possam ser efetivamente produzidas no momento do corte, e é óbvio, devem ser atenuadas e eliminadas para que o componente seja fiel à geometria da ferramenta [Franje, J., 1990]

Tendo em vista que as ferramentas normalmente utilizadas em operações de usinagem de precisão e ou ultraprecisão necessitam, essencialmente, refletir qualidades geométricas com faixas de exatidão submicrométricas, os movimentos que os realizam também devem obedecer a estas ordens de magnitudes de exatidão.

Muito do apresentado acima já foi discutido anteriormente, entretanto, é necessário salientar o que talvez seja o ponto mais importante de toda a discussão, a necessidade de conhecer o comportamento da ferramenta, da peça e da interação ferramenta/peça com o objetivo de explorar o sistema da melhor maneira possível ou obter condições de usinagens experimentalmente testadas e altamente confiáveis para produzir bons componentes.

A ferramenta de corte numa operação de usinagem de precisão deve ter a capacidade de realizar um corte estável na região submicrométrica/nanométrica, onde algumas vezes um cavaco contínuo pode ser removido, e.g. no torneamento com ferramenta de ponta única de diamante de substratos de alumínio para telescópios ópticos. Tais ferramentas, que na verdade são diamantes monocristalinos, são usadas exclusivamente com suas arestas afiadas na faixa nanométrica para produzir repetibilidade de forma e resistir ao desgaste.



Pode-se com relativa facilidade verificar que materiais como ligas de cobre, prata, ouro, níquel eletrolítico e os plásticos PMMA podem ser usinados sempre tomando muito cuidado com os métodos de fixação para não haver distorções induzidas pela fixação [Ikawa, N. , 1991; Donaldson, R.R.,1991 et al]. A interação ferramenta peça, o corte propriamente dito, é a parte do processo de usinagem que tem tomado muito tempo dos cientistas, em geral, na tentativa de compreender o que realmente ocorre e quais parâmetros estão envolvidos.

Muitos modelos estão sendo desenvolvidos e propostos tais como: O modelo de forças no processo de torneamento tridimensional o qual tenta explicar quantitativamente a origem e a natureza das forças cujas implicações são extremamente importantes para a manufatura automatizada, onde o desgaste estimado em tempo real é necessário [Dow, T.A. e Drescher, J.D., 1990].

As forças de corte sobre uma aresta de diamante em microusinagem são normalmente a nível do sub-Newton ou menor. A princípio, estas são equivalentes àquelas sobre um único grão abrasivo numa retificação. Normalmente as forças de corte em microusinagem são muito difíceis de medir exatamente devido a sua pequena magnitude comparadas ao ruídos (mecânicos ou eletrônicos). Entretanto, como é sabido, as forças de corte refletem claramente o processo de remoção do cavaco e são um importante parâmetro físico para a compreensão do fenômeno de corte.

Várias investigações tem sido registradas sobre as características das forças de corte na microusinagem [Sugano et al., 1987; Furukawa, 1981; Moriwaki, 1989; Lucca, 1991]; as forças são muito pequenas e também caracterizadas pelo efeito tamanho, o alto coeficiente da componente normal em relação a tangencial na força de corte, especialmente em pequenas profundidades de corte. Muitos dados já foram coletados e sumariados em trabalhos referentes a forças de corte em processos de microusinagem de cobre e alumínio.

Os dados de simulação molecular podem ser vistos em trabalhos específicos (específico para força de corte) [Backer et al., 1952; Armarego et al., 1962; Nakayama et al., 1968]. Entretanto informações quantitativas semelhantes a estas estão sendo constantemente compiladas, modelos físicos de forças de corte na microusinagem, especialmente em profundidades de corte nanométricas, devem ser analisados em maiores detalhes em conjunto com a estrutura submicrométrica das arestas de corte, as quais em termos nanométricos, podiam ter um grande ângulo de folga negativo [Komanduri, 1971]. Este tipo de análise levará a uma melhor compreensão da qualidade superficial a qual, acima de tudo, é um dos objetivos chaves da usinagem de ultraprecisão.

Um outro modelo proposto utiliza a ferramenta de simulação para verificar o processo de geração e a microestrutura da superfície da peça na tentativa de melhor compreendê-lo do ponto de vista atômico; uma superfície livre de tensões residuais pode então ser obtida e rugosidades superficiais na faixa de um nanometro ou menos são estimadas no corte de metais monocristalinos [Shimada, Shaichi; Ikawa, Naoya., 1994]

A aplicação do método de elementos finitos também trouxe grandes avanços para a análise teórica e experimental da microusinagem ortogonal para a compreensão do processo de corte de ultraprecisão dos metais. O FEM é utilizado para analisar o mecanismo de estado constante rígido-plástico do processo de microusinagem ortogonal atentando para rugosidade da aresta da ferramenta. O modelo também analisa o fluxo de calor e a distribuição da temperatura na peça e ferramenta baseado no fluxo de tensão do material.

O experimento ocorre com o equipamento de microusinagem instalado dentro do microscópio eletrônico de varredura. Os resultados são analisados e comparados com FEM (Moriwaki, Toshimichi.; Sugimura, Nobuhiro., 1993 et al). Todos os modelos apresentados obtiveram uma série de dados sobre o processo de usinagem de ultraprecisão os quais são de extrema importância e somam-se às numerosas

pesquisas que estão sendo feitas a cada dia que buscam definir o que realmente ocorre no instante em se dá o processo de corte.

O controle ambiental é de fundamental importância, já que o perfil da superfície usinada em um processo de ultraprecisão é quase que exclusivamente resultado da movimentação relativa da aresta de corte da ferramenta e da peça sobre a máquina ferramenta, de modo que, controlar as vibrações e os ruídos acústicos, que podem induzir vibrações no sistema, é de vital importância.

Existem alguns arranjos físicos, limitados, para o problema de vibrações sísmicas. As imperfeições dos acoplamentos dos componentes da máquina, e.g., os fusos e seus motores de potência, excentricidades, erros de manufatura nos componentes juntamente com as flutuações dos fenômenos físicos acarretam problemas ao conjunto.

A deformação térmica exerce, durante um longo período em uma operação específica de usinagem, grandes influências sobre a exatidão do componente fabricado. Por esse motivo, intensos esforços têm sido feitos para estabilizar as deformações térmicas dentro de valores submicrométricos durante várias horas (D.B., Debra et al, 1986). A temperatura de corte na microusinagem é baixa em comparação com aquela do corte convencional, devido a baixa energia de corte e a alta condutividade térmica do diamante e dos materiais da peça tais como alumínio e cobre [Iwata et al., 1987].

Entretanto, um pequeno aumento de temperatura da ordem de 10K em uma ferramenta pode causar uma expansão no cabo da ferramenta com consequente deterioração da exatidão de usinagem [Moriwaki et al., 1990].

A temperatura de corte é considerada como o fator que governa a taxa de desgaste da ferramenta de diamante na qual danos de microdimensões podem ser fatais para o acabamento superficial. Existem consideráveis evidências que para os danos químicos sobre o diamante a temperatura mostra-se como um significativo componente. Muitas

pesquisas são necessárias urgentemente sobre a temperatura de corte e seus efeitos sobre o desgaste da ferramenta de diamante.

Partículas de sujeiras de dimensões apreciáveis talvez causem a deterioração da superfície acabada por riscamento, especialmente, sobre materiais moles. Os equipamentos necessários à usinagem de ultraprecisão devem ser instalados em condições de sala limpa, semelhantes àquelas para a produção de circuitos integrados de alta densidade (LSI). Os finos cavacos removidos da superfície devem ser retirados, quando produzidos, por métodos adequados. Tal como vácuo sem introduzir efeitos de vibração.

É essencial desenvolver e implementar estratégias adequadas, incluindo software para controlar todas as técnicas de subsistemas, com isso, eficiente e sistematicamente atingir os objetivos específicos da ultraprecisão. A física do processo de usinagem pode ser a base para software de usinagem em muitos casos.

Para estabelecê-lo torna-se necessário desenvolver a microsensibilidade do processo durante sua realização e o processamento dos sinais dos parâmetros físicos tais como força de corte, temperatura de corte, vibrações, desgaste da ferramenta e rugosidade superficial onde cada um destes parâmetros é duas a três ordens de magnitude melhor comparado com o corte convencional.

A topografia da superfície ou rugosidade é produzida como resultado da transferência do perfil da ferramenta para a superfície da peça. Entretanto, o nível de rugosidade é governado pelo controle exercido sobre os movimentos da máquina ferramenta ( ou movimentação relativa entre a peça e ferramenta) e da transferência do perfil característico da ferramenta (ou fidelidade) para a peça.

Perfis superficiais com 6nm P-V, sobre peças de latão monocristalino acabada sobre torneamento experimental com o arranjo equipado com um mancal aerostático e um dispositivo de alimentação elástica, podem ser obtidos [Ikawa et al., 1986]. No perfil, uma rugosidade de 2nm e ondulações de 4nm são sucessivamente identificadas como

devidas a marcas da alimentação e dos erros de movimentação assíncronas (erros de repetibilidade) do fuso respectivamente.

Em muitos arranjos práticos de usinagem de ultraprecisão, uma rugosidade com alguns décimos de nanômetros talvez seja um limite prático alcançável devido aos efeitos combinados de uma variedade de fontes de erros.

O mecanismo de geração de superfícies na microusinagem é delicadamente afetado por muito pequenas vibrações relativas, e.g., a nível nanométrico [Takasu et al., 1985] tanto quanto como pela microgeometria do processo de remoção de cavaco [Nishiguchi et al., 1988; Masuda et al., 1989]. Além dos erros de movimentação em um arranjo de usinagem, as propriedades do material da peça fortemente influenciarão a microestrutura da superfície usinada.

Na microusinagem de policristais os quais são consideravelmente mais usuais que os monocristais, existirão inevitavelmente imperfeições em geral de rugosidade devido a anisotropia em termos de usinabilidade, sobre cada grão cristalino os quais constituem a superfície a ser usinada [Ohmori et al., 1982; Stadler et al., 1987; König et al., 1988, 1991]. Igualmente, em termos de pequenas variações locais na usinabilidade, materiais amorfos e os materiais com fina estrutura granular obtidos de trabalhos a frio adequados, em princípio, resultam em acabamento superficial bem melhor.

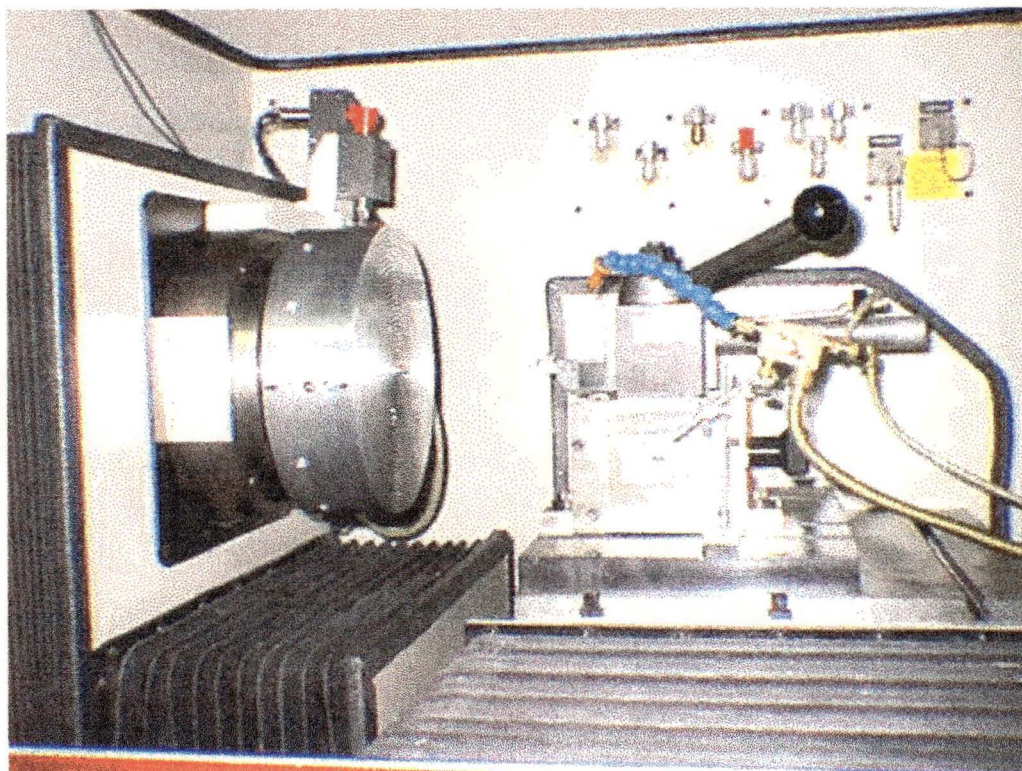


Figura 3.13 Vista lateral da placa a vácuo e do porta ferramentas

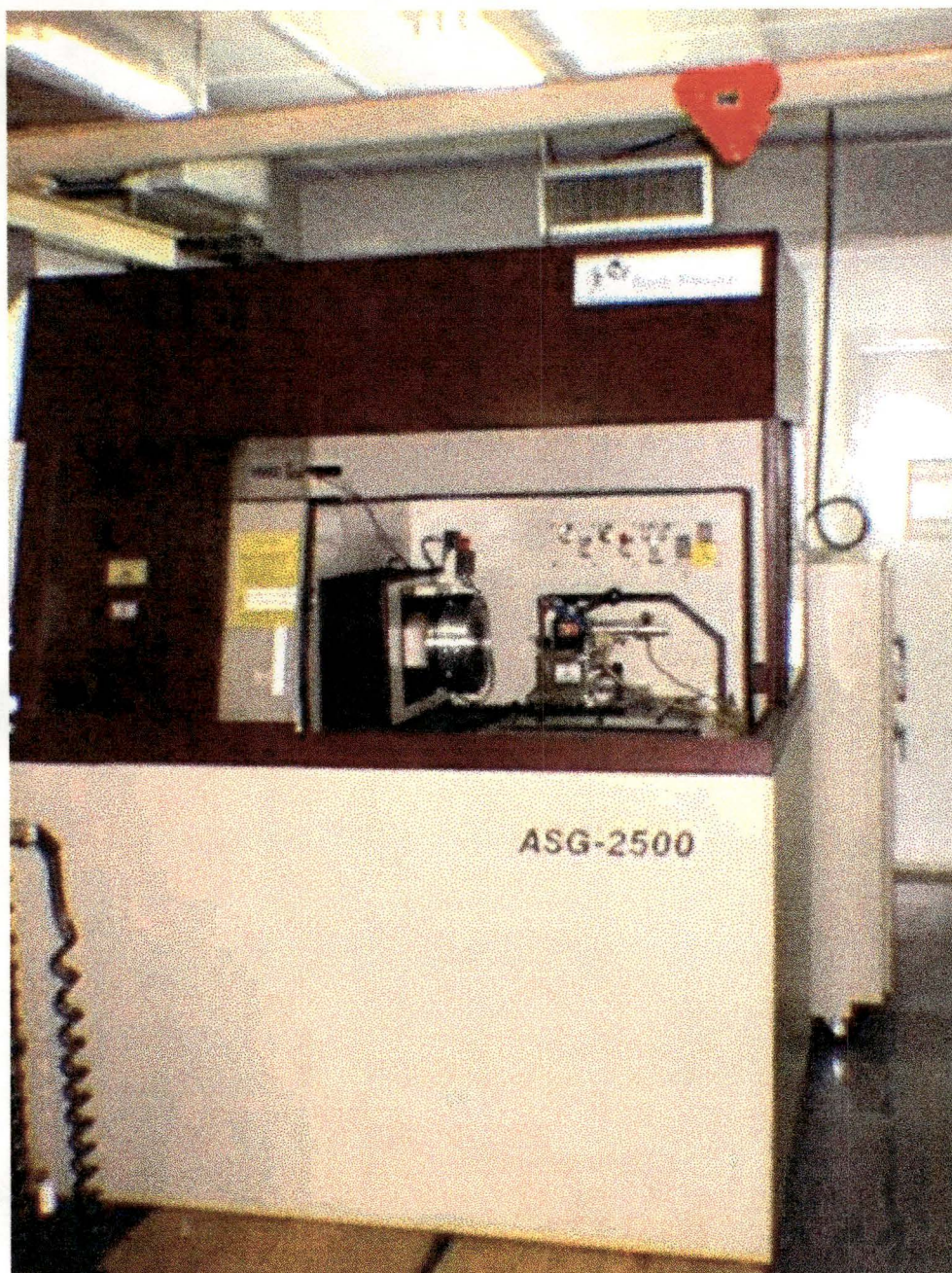


Figura 3.14 Gerador Anesférico de superficies - ASG 2500

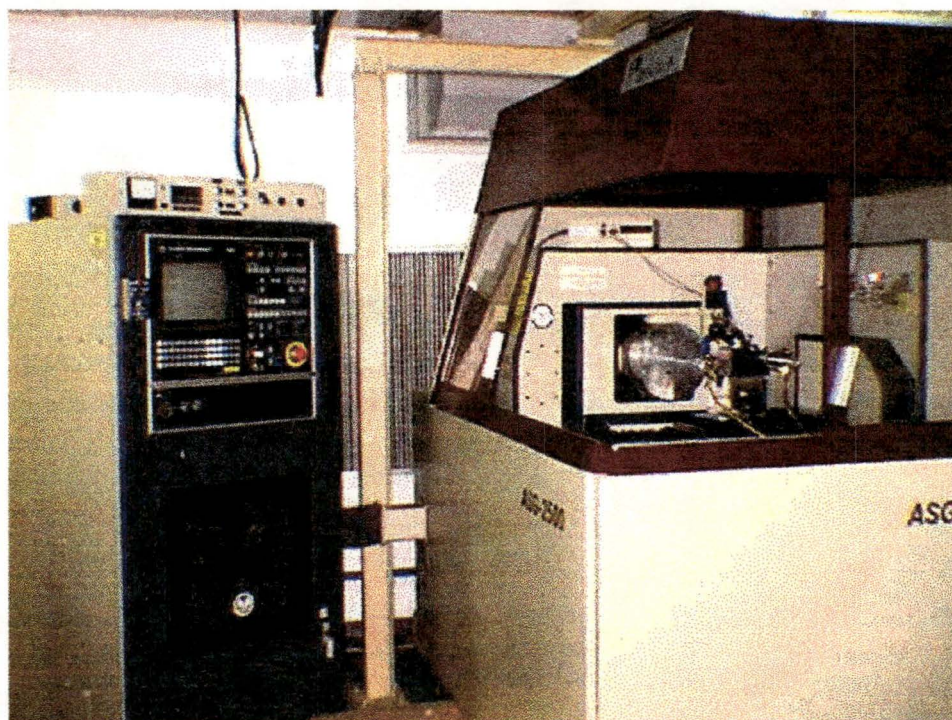


Figura 3.15 O gerador ASG -2500 com o CN acoplado

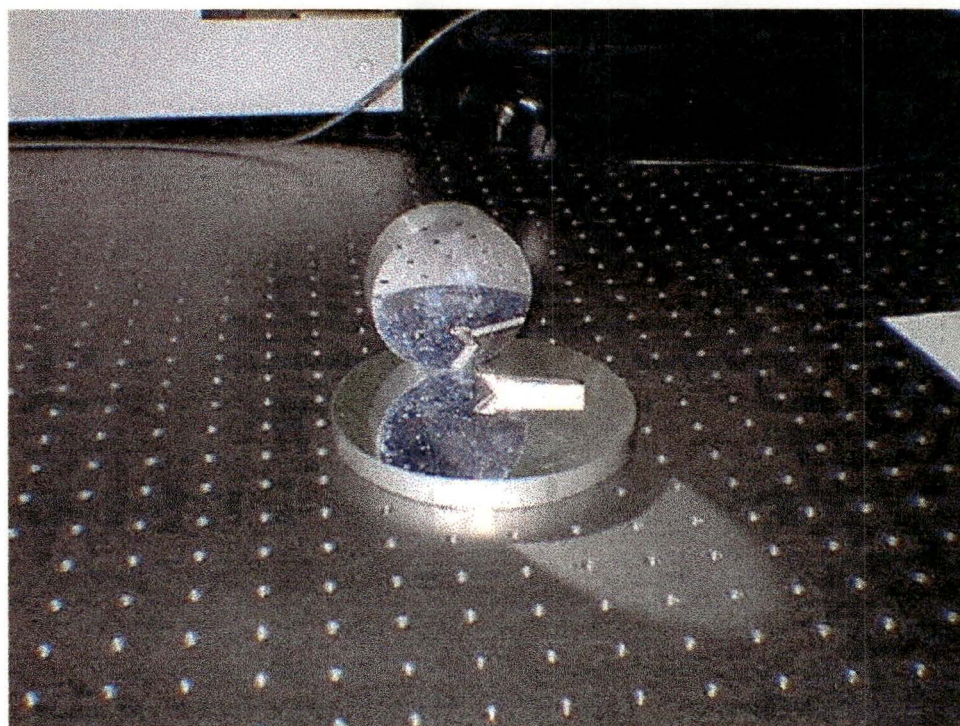


Figura 3.16 Ferramenta com ponta de diamante e duas superfícies usinadas



### 3.10 COMENTÁRIOS FINAIS

Os processos de usinagem não convencionais estão distribuídos como processos mecânicos, elétricos, térmicos e químicos. Eles apresentam, quando em aplicação, características particulares. Cada um desses processos discutidos apresenta possibilitando uma série de vantagens e, também, restrições. O processo de emissão elástica produz planicidades superficiais da ordem de 0,1 a 0,05  $\mu\text{m}$ , entretanto, componentes com formas complexas só podem ser fabricados com ferramentas de ponta única de diamante já que a exatidão de forma devido ao microposicionamento dos carros da máquina pode ser controlada.

O processo fotoquímico é uma alternativa para a remoção de material de peças que não podem ser usinadas com ferramentas convencionais. Geralmente empregada na fabricação de peças de pequenas dimensões na mecânica e na eletrônica. É muito empregada na fabricação de formas complexas. A técnica que utiliza feixes com alta energia pode ser usada para remover ou adicionar material. A usinagem com feixe de íons é um bom exemplo, normalmente chamado de polimento iônico. O método não gera altos gradientes de calor, nem causa danos por deformação mecânica na camada superficial. O processo fornece resolução de usinagem de cerca de 10 nm e é normalmente usado na usinagem de ultraprecisão. A usinagem eletroquímica é interessante para ser aplicada na geração de formas complexas em materiais duros pois a taxa de usinagem do metal não depende da dureza e talvez por não haver contato direto entre peça e ferramenta, como nos processos convencionais, não existe desgaste da ferramenta. A usinagem com feixe de elétrons ocorre amparada por um aparato mecânico, eletrônico, óptico e magnético que sobre vácuo produzem variações térmicas da ordem de 2.500 a 3.000°C a fim de emitir elétrons. As correntes têm suas magnitudes variando entre 25 e 100 mA com densidades de 5 e 15 A  $\text{cm}^{-2}$ . A área de incidência do feixe tem o diâmetro da ordem de 0.025mm com o diâmetro mínimo em torno de 2 $\mu\text{m}$ . a remoção de material se dá por evaporação com densidades de potência da ordem de 1,55 MW $\text{mm}^{-2}$ . Virtualmente todos os materiais de engenharia podem ser usinados através do EBM.

O processo de usinagem utilizando rebolos diamantados é uma ótima solução para retirada de altos volumes de material a uma taxa econômica. As dificuldades de remoção do material devido a forças interatômicas também constitui-se em outro problema para o qual um rebolo diamantado talvez seja a solução. Finos grãos abrasivos são inicialmente usados para a remoção de grandes quantidades de material até, gradativamente, obter no acabamento final pequenas retiradas de material ou finos cavacos. Estando as arestas dos grãos sujeitas a grandes valores de pressão e temperatura liberando, em função disto, altas densidades de energia e em consequência os grãos abrasivos são desgastados rapidamente. Por outro lado, consecutivas usinagens são possíveis pois os grãos cisalhados formam novas arestas de corte aleatoriamente e consequentemente produzindo superfícies com distribuição de picos e vales aleatoriamente, inviabilizando a produção de superfícies espelhadas ou com acabamento verdadeiramente especular.

O processo de lapidação produz a remoção de material ou desgaste por abrasão da superfície da peça, onde a ferramenta e a peça movimentam-se relativamente com um composto abrasivo imerso em um fluido aplicado livremente na interface peça ferramenta. A lapidação é normalmente aplicada para remover irregularidades de operações anteriores tais como retificação ou brunimento e / ou fazer finas correções, produzindo melhores resultados sobre materiais frágeis já que o regime de corte não causa deformações plásticas. Por outro lado, as superfícies metálicas são submetidas a numerosas microindentações, já que os grãos abrasivos estão dispersos sobre toda a superfície da peça, que produzem trincas detectáveis e deslizamentos ocasionais que crescem numericamente com a dureza. Todos os processos apresentados produzem componentes de precisão/ultraprecisão utilizando-se dos princípios mecânicos, elétricos, químicos e térmicos tendo suas ferramentas formas próprias e adequadas à fonte de energia. Comparados ao processo de usinagem com ponta única de diamante, um processo determinístico, pode-se verificar a simplicidade e a efetiva produção de um torno de ultraprecisão na fabricação de componentes para as indústrias mecânicas, eletrônicas e óptica, conforme descrito anteriormente.

# CAPÍTULO

## 4

### Tensões residuais e métodos de medição

#### **4.1 Introdução**

A determinação e medição de tensões residuais é um fator muito importante para a engenharia de ultraprecisão devido às exigências extremamente grandes de qualidade de forma, a presença de trincas indesejadas e a prevenção de falha por fadiga [Cohen, J.B., 1987].

Existe uma série de processos de medição utilizados na detecção e quantificação das tensões residuais, tais como difração de raios-x, difração de raios-x em incidência razante, análise de fluorescência total dos raios-x, método ultrasônico, método micromagnético, espectroscopia de Raman, microindentação instrumentada e indentação, os quais foram selecionados e serão abaixo descritos detalhadamente. Todas as técnicas apresentadas têm como característica comum investigar/mapear o comportamento das microestruturas do material e relacioná-las aos níveis de tensões residuais, em regiões muito próximas à superfície, após terem sido submetidas a alguma operação mecânica. A técnica de difração de raios-x com incidência razante cuja finalidade é detectar níveis de tensões residuais em regiões muito próximas à superfície (0 a 1 $\mu$ m), dentre as apresentadas, pode fornecer dados qualitativos de grande importância, entretanto, em função da facilidade e viabilidade econômica serão realizados ensaios de microindentação a fim de averiguar a existência de tensões residuais e prováveis camadas danificadas em função da profundidade de corte fixada em cada operação de torneamento através de ensaios de microindentação.

## 4.2 Tensões Residuais

A estrutura cristalina dos metais e das ligas metálicas trabalhadas a frio apresentam vários tipos de imperfeições, como por exemplo, a deformação não uniforme dos grãos. Pode-se verificar com clareza este processo, quando um pedaço policristalino de metal é deformado plasticamente por laminação, ocorrendo deslocamentos e variações na forma dos grãos, tornando-os planos e alongados na direção da operação.

A variação na forma de alguns grãos é determinada, não somente pelas forças aplicadas à peça como um todo, mas também pela força aplicada em cada grão já que estes mantêm seus contornos em contacto com os grãos adjacentes.

Devido a essa interação, em uma massa policristalina, um único grão não se deforma livremente como um cristal isolado se deformaria se submetido à mesma tensão. Um

grão deformado e restrito pelos seus vizinhos em um agregado sólido, normalmente tem regiões de sua rede submetidas a deformações elásticas oblíquas ou, mais raramente, a um estado de compressão ou tração uniforme [Cullitty, B.D. 1959].

Verificadas tais características pode-se considerar o metal contendo um estado de *tensões residuais* ou tensões internas como são normalmente chamadas.

Por outro lado, o termo utilizado para expressar o estado de existência de tensões internas não é muito informativo e portanto questionável, já que todas as tensões sejam residuais ou impostas externamente são internas. Fica claro, entretanto, que existe um estado de tensões internas ou residuais após todas as cargas externas serem removidas[Cullity, B.D, 1959].

A seguir, descrevem-se os vários métodos de medida de tensões residuais.

## **4.3 Difração de raios X**

### **4.3.1 Introdução**

Durante muitos anos, mineralogistas e cristalografistas acumularam conhecimentos sobre cristais, principalmente através do ângulo interfacial, análise química e determinação das propriedades físicas. Existia pouco conhecimento sobre o interior da estrutura cristalina. Entretanto, através de investigações precisas chegou-se à conclusão de que os cristais eram construídos por repetições periódicas de alguma unidade, provavelmente um átomo ou uma molécula, e estas unidades estavam separadas de 1 ou 2 Å. Por outro lado, existiam indícios, porém somente indícios, de que os raios-x talvez fossem uma onda eletromagnética com um comprimento de onda da ordem de 1 a 2 Å. O fenômeno da difração era bem compreendido.

Era sabido, por exemplo, que a luz visível era difratada quando em algum instante a onda em movimento encontrava um conjunto de espaços regularmente espaçados,

dados que o comprimento da onda em movimento era da mesma ordem de magnitude das distâncias repetidas entre os centros de espalhamento (átomos). Quando em 1912 o físico alemão von Laue deparou-se com o problema e tal era o nível de conhecimento da época que raciocinou o seguinte: se os cristais eram compostos de espaçamentos atômicos regulares os quais talvez atuassem como centros de espalhamento para raios-x, se os raios-x eram ondas eletromagnéticas cujo comprimento era da mesma ordem da distância interatômica nos cristais, então seria possível difratar raios-x através da rede cristalina.

Após analisar cuidadosamente o experimento de von Laue, W.L. Bragg foi capaz de expressar as condições necessárias para a difração de Laue ocorrer através de uma simples equação matemática. No ano seguinte Bragg visualizou algumas estruturas como por exemplo o NaCl, KCl e KBr e estas foram as primeiras determinações completas da estrutura de cristais [Cullity, B. D., 1959].

O método convencional de difração de raios-x de Bragg descreve alterações microestruturais qualitativamente e quantitativamente através da medida da composição química da peça. Materiais moles e endurecidos são verificados e relacionados através do alargamento das linhas dos padrões de difração. As tensões residuais também podem ser medidas e baseadas na análise da variação das linhas dos picos de difração. Finalmente, a medição do coeficiente de intensidade relativa do padrão de difração para diferentes orientações das amostras sob o feixe de raios-X permite a determinação da orientação preferencial do grão no material.

O método de difração de raios-x fornece informações na escala atômica. Entretanto, uma medida com resolução nesta ordem de magnitude não é possível, já que a média do método é sobre grandes frações volumétricas.

### 4.3.2 Medida de tensões com raios-x

As tensões, como anteriormente descrito, são resultantes de variações dimensionais permanentes não uniformes no material. Variações estas que ocorrem como deformações plásticas talvez possam ser causadas por expansão elástica ou contrações localizadas da rede cristalina do material, como ocorre por exemplo com nitretação, com a introdução de carbono, transformação de fase ou com filmes epitaxiais no volume do material.

As análises de raios-x fornecem informações sobre a distorção elástica do deslocamento atômico relativo de planos cristalográficos particulares em uma matriz normalmente policristalina. Quando uma matriz policristalina está sob tensão localizada, deformações elásticas são produzidas na rede cristalina do cristal individual. Usando a teoria da elasticidade, estas deformações são convertidas em tensões, somente se a constante elástica apropriada for disponível. Os dados capturados representam a deformação medida dentro de uma camada superficial irradiada com uma espessura de alguns microns, dependendo do material e da radiação usada.

Se as tensões residuais têm de ser determinadas em um material monocristalino, por exemplo em wafers de silício, isto também é possível pela difração de raios-x, usando um goniômetro de quatro eixos em um ambiente condicionado e aplicando tipos especiais de equações para cálculos de tensões.

A principal restrição para a aplicação da difração de raio-x convencional para análise estrutural e de tensões em superfícies usinadas de ultra-precisão é a profundidade de penetração dos raios-x através do material da peça. A profundidade de penetração é principalmente dependente do comprimento de onda da radiação, planos da rede de difração e do coeficiente de absorção linear do material base. Consideráveis problemas surgem quando são realizadas medições em cerâmica.

Existe uma profundidade de penetração dos raios-x através do material enquanto as tensões residuais geradas pela usinagem tem baixa profundidade de penetração devido a dureza. Estes problemas podem ser demonstrados através da medição de tensões superficiais usando dois diferentes tipos de radiações. Logo, pode-se concluir que o método convencional de difração de raios-x pode ser aplicado a engenharia de precisão. Entretanto, se um minucioso perfil dos parâmetros estruturais e tensões com uma resolução abaixo de  $1\mu\text{m}$  são desejados, o método convencional de XDR torna-se mais restrito.

### **4.3.3 Difração de raios-x com incidência razante (Grazing Incidence Diffraction - GID)**

Para superfícies planas de materiais policristalinos o problema da grande profundidade de penetração na XRD convencional pode ser superado pela aplicação de uma técnica especial de difração recentemente desenvolvida. A difração com incidência razante ou com ângulo de incidência menor que o convencional, nova técnica emergente, pode ser usada para obter detalhes estruturais e identificação das fases das camadas superficiais e filmes com variação da espessura inferior a pequenas camadas atômicas.

O princípio desta técnica é baseado no fato de que o índice de refração do sólido na faixa de frequência dos raios-x é menor que 1. Entretanto, a reflexão especular (ou quase-total) das superfícies ocorre para ângulos de incidência de cerca de ( $10^\circ$ ) dez graus. A tal ângulo as ondas de raios-x penetram muito pouco a superfície do sólido.

A profundidade depende sobretudo do material e do comprimento de onda dos raios-x (cerca de uns poucos nanômetros). Mais de 98% do feixe é refletido pela camada superficial. Arranjando o ângulo de incidência para valores críticos de reflexão, então aumentando-o sucessivamente, pode-se investigar o aumento de espessura das camadas e analisar sua composição química ou sua estrutura cristalográfica por meio



da difração ou experimentos de fluorescência. O ângulo de incidência é tipicamente escolhido entre o ângulo crítico de reflexão total ( $0,5 - 1^\circ$ ).

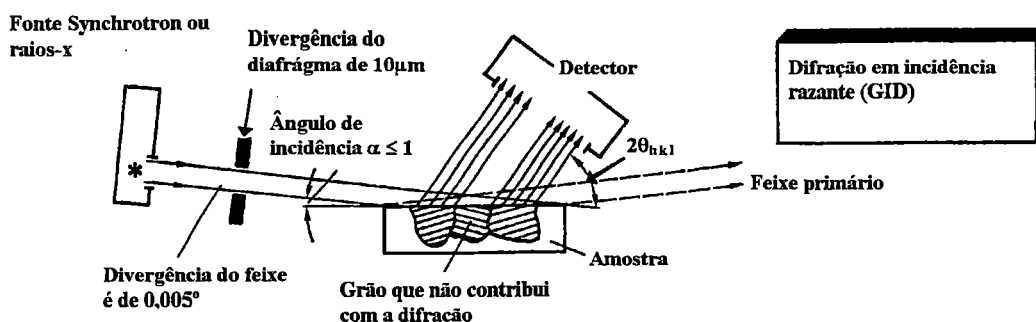


Figura 4.1 Difração de raios - x com incidência razante (GID) [Brinksmeyer, E., 1989].

No lugar de tubo convencional de raios-x, uma fonte de radiação synchrotron pode também ser usada. Uma fonte synchrotron tem qualidades únicas que podem ser usadas em experimentos de difração. Produz raios-x de alta potência, divergência extremamente pequena na direção vertical, quase ilimitada escolha de comprimentos de onda e polarização linear, entretanto, com a desvantagem de não serem disponíveis no mercado fontes transportáveis.

O GID foi usado para registrar difractogramas depois de testes de fricção em titânio policristalino e também sobre filmes depositados quimicamente. Um filme com a composição  $Ni_{74}B_{26}$  o qual é normalmente amorfo, foi submetido a tais testes sob uma pressão de 10 MPa, para estudar sua eventual cristalização induzida por deformações e temperaturas. Em alguns casos a cristalização parcial foi efetivamente observada. Entretanto, este efeito foi muito superficial já que cristais eram removidos pela fricção depois de subseqüentes passadas (running-in of surface).

A profundidade analisada era menor que 150 nm. Tendo em vista que a área da amostra irradiada pelos raios-x era muito grande, a extensão da área contribuindo na difração era limitada pelo uso de fendas radiais entre o detector e a amostra.

Variando os ângulos laterais de  $2\theta$  a  $\theta$  (Figura 4.2) a fim de estudar os parâmetros da rede, adicionando uma rotação em torno de um eixo vertical da peça (denominada  $\omega$ ) podem-se obter informações sobre a orientação aleatória dos planos na rede cristalina de uma fina camada sobre a superfície sob teste.

A possibilidade de medir as deformações/tensões residuais resultantes da usinagem pelo GID ainda não foi investigada, já que abaixo da superfície existem somente alguns grãos que atendem às condições de difração para um determinado ângulo de Bragg. A orientação específica destes grãos representa o ângulo de exposição  $\psi$  o qual tem de ser variado sucessivamente quando da utilização da técnica de multi-ângulo. Este ângulo é normalmente compensado por uma rotação incremental  $\theta$  da peça.

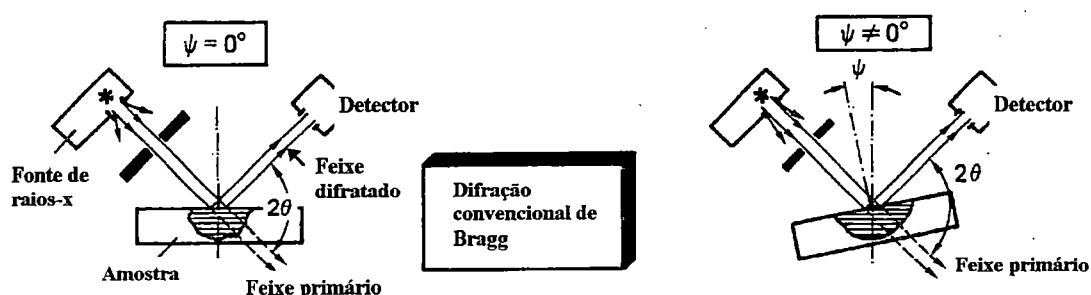


Figura 4.2 Difração de raios - x convencional (XRD) [Brinksmeier, E., 1989].

Tal procedimento não é possível usando a GID porque este traria o ângulo de incidência razante fora da sua pequena faixa de trabalho. Entretanto, se o assim chamado arranjo  $\psi$  do goniômetro fosse usado onde o ângulo de exposição é compensado por uma rotação da amostra em um plano perpendicular ao plano de medição, o ângulo de incidência razante (grazing) tornar-se-ia invariável. Este experimento permitiria a medida de tensões em vários ângulos nas camadas superficiais na faixa nanométrica. Uma suposição é que um material policristalino com fina granulometria e uma fonte de raios-x de alta potência devem ser usados (ou uma fonte synchrotron).

#### 4.3.4 Análise de fluorescência total dos raios-x (TXRF)

Em contraste com os raios-x convencionais, a análise de fluorescência TXRF faz uso da reflexão total da radiação fluorescente excitada dos raios-x. Com o auxílio de ambos os métodos uma análise da composição química de um volume da peça irradiado pode ser obtido. Entretanto, a profundidade de penetração do TXRF é muito menor devido a incidência razante (grazing) da radiação excitada.

A transição dos raios-x do vácuo ou ar para um sólido ou material líquido causará a refração da radiação. A reflexão total é conseguida através do direcionamento de um feixe de raios-x altamente colimados através de refletor em um ângulo abaixo do ângulo crítico.

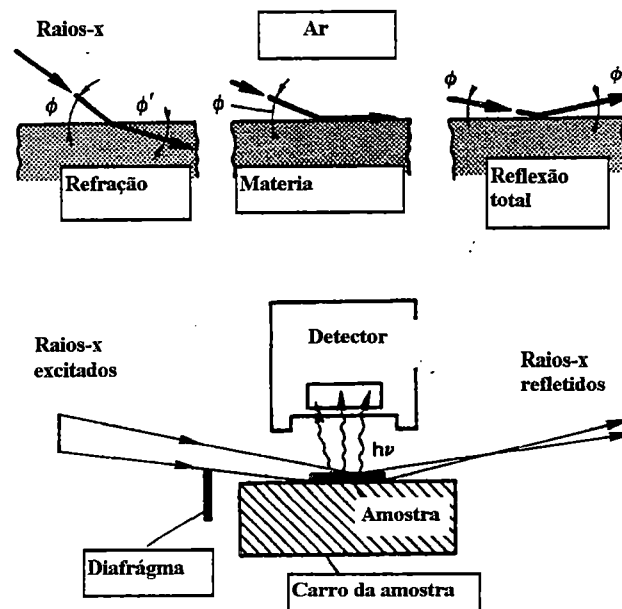


Figura 4.3 Princípio físico da fluorescência total dos raios - x [Brinksmeyer, E., 1989].

Em 1971, Yoneda e Horiuchi escreveram pela primeira vez sobre as possibilidades desta técnica a fim de desenvolver o coeficiente de sinal para o ruído na análise de fluorescência dos raios-x usando uma amostra específica altamente plana. Entretanto, um crescente número de tarefas e aplicações têm sido descobertas.

O método é normalmente utilizado para analisar os elementos em filmes finos depositados sobre superfícies planas de vidro (Figura 4.3). A fim de cobrir uma grande faixa de elementos, duas possibilidades de excitações são usadas, uma usando radiação de molibdênio  $K_{\alpha}$  e a outra usando uma peça de tungstênio com espectro branco.

Recentemente foi notificada uma nova idéia para a aplicação do TXRF. Foi um passo lógico considerar a própria superfície como o objeto de análise, operando no módulo de reflexão total. Por outro lado, devido ao seu poder de penetração de cerca de alguns poucos nanômetros, a técnica TXRF é inerentemente um método sensível à superfície. Por exemplo, a profundidade de penetração  $z_p$  em vidro de quartzo é 3,8 nm com a radiação do Mo. O limite inferior de detecção está na região dos 10 pg ( $10^{-12}$ ) para mais de 60 elementos. Todos elementos acima do sódio ( $z=11$ ) na tabela periódica podem ser determinados. Para determinar elementos ao nível de ppm, basta somente uma quantidade da amostra da ordem de  $1\mu\text{g}$ . Para ilustrar, a refletividade como uma função do ângulo de incidência e os valores para a correspondente profundidade de penetração para uma wafer de silício são dados na Figura 4.4.

A profundidade de penetração é abaixo de 10 nm o que permite analisar contaminações na superfície com alto grau de resolução nas camadas superficiais. Como exemplo, é possível por este método investigar  $10^{11}$  átomos de Ni os quais foram implantados em um wafer de silício a profundidade de 50 nm. No momento, não há nenhum outro método disponível o qual é capaz de fazer a mesma tarefa.

Acredita-se que o potencial da técnica TXRF vá além da determinação de impurezas em wafers de silício. Possíveis aplicações seriam examinar o perfil de concentrações

nas proximidades das camadas superficiais. Usando uma radiação excitada com um espectro branco, a profundidade de penetração pode ser variada devido a dependência do ângulo crítico de incidência sobre o comprimento de onda. Logo, o perfil da concentração na faixa nanométrica pode ser obtido não destrutivamente.

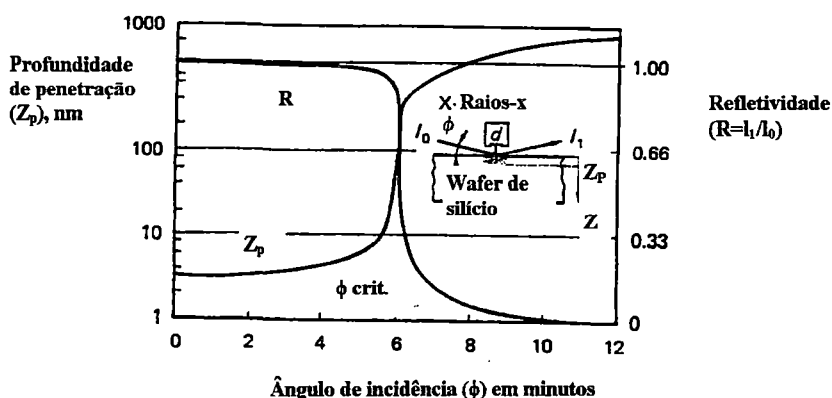


Figura 4.4 Resultados da TXRF usada sobre uma wafer de silício [Brinksmeyer, E., 1989].

#### 4.4 Método Ultrasônico

Em contraste com a técnica de raios-x na qual a resolução espacial é menor que  $0.1 \text{ mm}^3$ , o método ultrasônico atua no mínimo sobre uma seção de  $100 \text{ mm}^3$  por causa do diâmetro do feixe sonoro e as dimensões do caminho do som. A mais promissora aplicação da técnica ultrasônica é a caracterização de componentes volumétricos, porém pela exploração das ondas superficiais, é também possível caracterizar camadas superficiais inferiores a uma profundidade de  $0,1 \text{ mm}$ . Em engenharia de precisão e ultra precisão, o ultrasom pode ser usado para estudar o efeito tamanho. Propriedades superficiais na escala nanométrica não são detectáveis [Brinksmeyer, E., 1989].

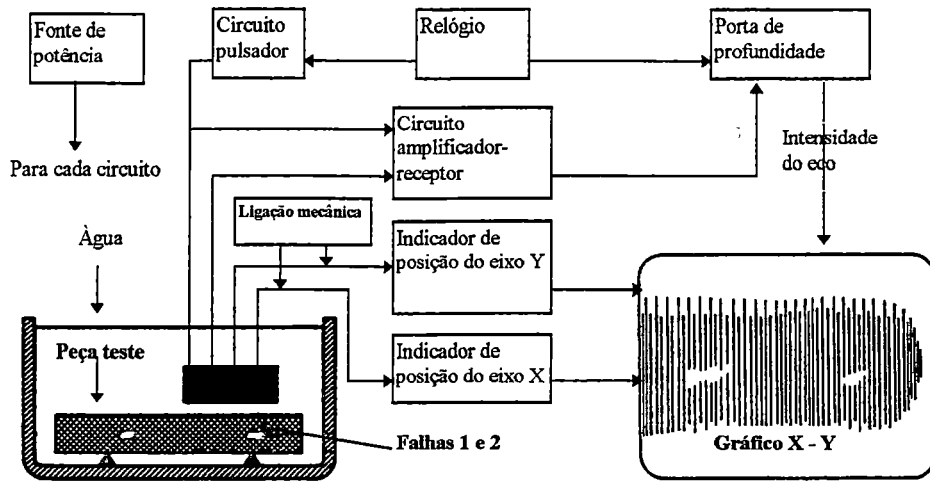


Figura 4.5 Desenho esquemático de uma montagem típica de varredura ultrassônica para detectar falhas internas do material [Metals Handbook, 1986].

#### 4.5 Métodos micromagnéticos

Os métodos micromagnéticos somente podem ser usados em combinação com materiais a base de ferro. Este indispensável pré-requisito limita o uso destes métodos na engenharia de precisão a materiais ferrosos excluindo os não ferrosos e os cerâmicos usados na maioria dos componentes usinados.

Entretanto, algumas aplicações na microengenharia podem apresentar materiais a base de ferro os quais permitem o uso da técnica micromagnética para testes não destrutivos. O estado ferromagnético dos materiais reage sensivelmente a variações dos parâmetros microestruturais e estados de tensão. Se a peça tem uma geometria simples e bem conhecida, pode-se demonstrar estas reações nas variações características dos ciclos de histerese. Na prática, entretanto, o ciclo magnético,  $B(H)$ , o qual é necessário para análise do fenômeno superficial sobre a peça não pode ser medido. Entretanto, as diferentes quantidades magnéticas medidas, por exemplo, tipo corcitiva, ruído de Barkhausen [Brinksmeyer, E., 1989] e a permeabilidade incremental estão sendo exploradas na caracterização de superfícies técnicas.

A Figura 4.6 mostra os diferentes sinais, característicos do ruído magnético de Barkhausen e permeabilidade incremental. Para a aplicação de ambas as quantidades é importante saber que a análise da frequência e a excitação, determinam a profundidade de penetração da medida. Esta relação é também descrita na Figura 4.6.

A profundidade mínima é determinada pela máxima frequência obtida a qual é estimada ser da ordem de 10 MHz para o ruído de Barkhausen e de 30 MHz para a permeabilidade incremental. Isto limita a profundidade mínima de análise em um material ferroso a 10 $\mu$ m e de 1 a 5  $\mu$ m em um não ferroso respectivamente. A resolução local depende do projeto do transdutor usado e pode ser reduzida à medição de um diâmetro de cerca de 0,1 mm. Uma grande vantagem do método de medição micromagnético é o curto tempo de medição - abaixo de um segundo. Os dispositivos eletrônicos são relativamente baratos e permitem investigações estruturais em diferentes profundidades abaixo da superfície somente pela variação da frequência. Estas vantagens fazem esta técnica de medição muito adequada para aplicações industriais. Entretanto, apresenta a desvantagem da necessidade de calibração cuidadosa das medidas a fim de separar as influências do material das quantidades medidas. A resolução espacial desta técnica permite aplicação na engenharia de precisão. A aplicação em engenharia de ultraprecisão não está em vista, já que a resolução abaixo da superfície não pode ser melhor que 0.1 $\mu$ m.

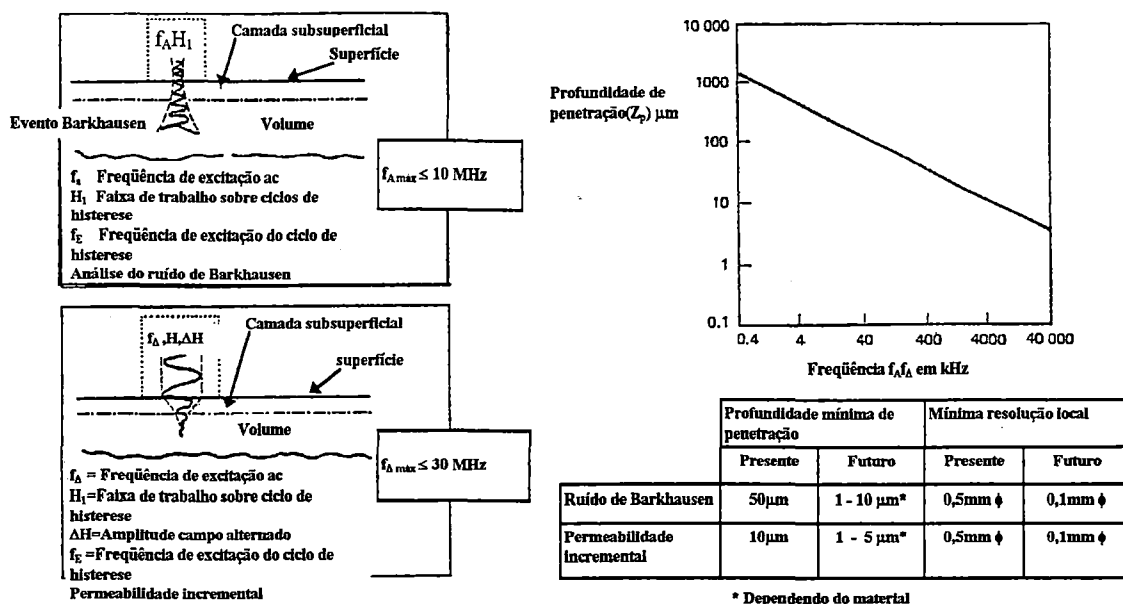


Figura 4.6 Características para a transdução do ruído de Barkhausen e permeabilidade incremental [Brinksmeyer, E., 1989].

## 4.6 Espectroscopia de Raman

A espectroscopia de Raman, ou espalhamento inelástico da luz, tem-se tornado uma importante ferramenta para estudar as propriedades vibracionais e eletrônicas dos materiais. O efeito Raman foi descoberto em 1928 pelos físicos Indianos C.V. Raman e K.S. Krishnam examinando o espalhamento da luz solar através de uma variedade de líquidos. O desenvolvimento do laser levou ao ressurgimento do interesse pelo efeito Raman e várias aplicações têm sido registradas. A espectroscopia de Raman tem provado ser uma técnica útil para medição de grande quantidade de parâmetros de materiais, tais como estruturas interfaciais, composição química e tensão em materiais cristalinos e amorfos. A espectroscopia de Raman fornece informações na escala atômica e baseia-se no espalhamento inelástico dos fótons da superfície que são irradiado pela luz. A espectroscopia de Raman envolve dois feixes de fótons, um incidente o qual provoca o efeito e outro espalhado o qual é coletado e analisado. Nos últimos anos alguns trabalhos promissores foram realizados a fim de se medirem as tensões residuais por meio da espectroscopia de Raman. Sabe-se que na presença de tensões o ensaio Raman exhibe picos espalhados e variações, as quais são lineares para



as tensões aplicadas, isto devido à frequência das vibrações atômicas nos espaçamentos da rede. Tensões de compressão tendem a reduzir o espaçamento da rede o que resulta em uma diminuição das frequências. Tensões de tração tendem a aumentar o espaçamento da rede cristalina elevando a frequência. Estes fatos são consequência da variação da constante elástica com a deformação. Tais efeitos foram encontrados em filmes de silício sobre safira devido a tensões mecânicas causadas pela usinagem com ferramentas de ponta única de diamante.

O arranjo experimental para a observação do espectro de Raman é mostrado esquematicamente na Figura 4.7. Um feixe de laser monocromático incidente é focalizado sobre a superfície da amostra. A luz espalhada é então coletada por um sistema de múltiplas-lentes o qual focaliza a luz sobre a entrada da fenda do espectrômetro (dispositivo de detecção). A espectroscopia convencional de Raman usa dimensões de cone relativamente grandes (10 mm x 2 mm) por outro lado a técnica de microespectroscopia de Raman, descrita por [Sparks e Paesler], permite o uso de pequenos feixes de laser de diâmetro da ordem de  $1\mu\text{m}$  usando um microscópio óptico adicional. A técnica de microespectroscopia é mostrada esquematicamente na Figura 4.7.

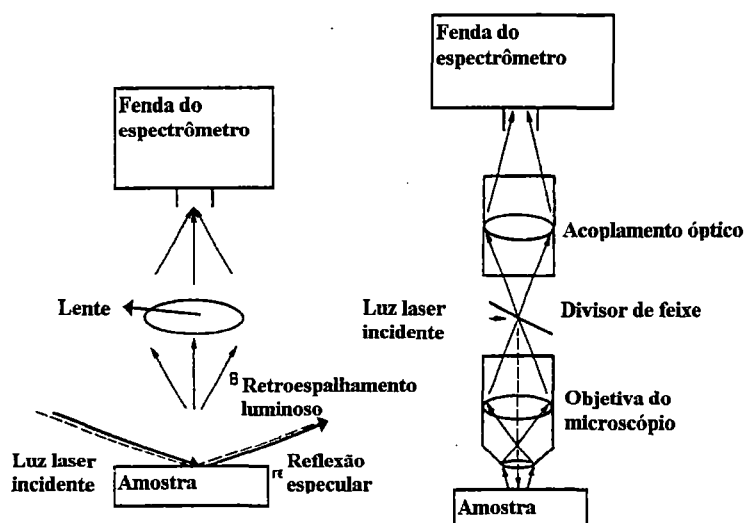


Figura 4.7 Diagrama esquemático do experimento para a espectroscopia de Raman [Brinksmeyer, E., 1989].

A espectroscopia convencional de Raman foi usada para examinar o estado de tensões residuais em wafers de silício serradas com discos de diamante. Usou-se um feixe de laser de argônio para a medição. O pico de Raman ocorreu, para o silício, em número - frequência espacial  $520 \text{ cm}^{-1}$ , sendo que o espectro de Raman foi medido entre  $515 \text{ cm}^{-1}$  e  $525 \text{ cm}^{-1}$ . A Figura 4.8 mostra, na seção superior, um pico de Raman de um wafer de silício, o qual foi cortado e retificado com uma ferramenta de diamante.

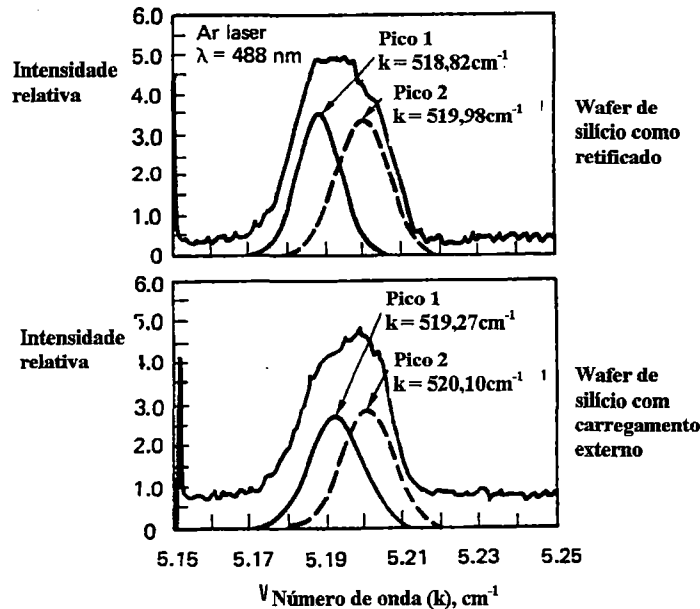


Figura 4.8 Espectro de Raman de um wafer de silício usinado [Brinksmeyer, E., 1989].

O sinal de Raman foi descrito por uma função Gaussiana. Pode-se verificar que dois diferentes picos de Raman ocorreram. A divisão do pico pode ser explicada pela variação da simetria cúbica de monocristais de silício devido ao processo de usinagem. Isto leva a danos das camadas superficiais e sub-superficiais. Um segundo espectro foi obtido para a mesma amostra, porém sob carregamento externo o qual resulta no dobramento por deformação ( parte inferior da Figura 4.8). A variação da linha de Raman pode ser explicada pela deformação do cristal devido à tração externa.

Sparks e Paesler usaram a microespectroscopia de Raman para medir a distribuição de tensões residuais em um pequeno canal (50  $\mu\text{m}$ ) o qual foi produzido por corte em mergulho por uma ferramenta de ponta única de diamante (polida na direção 100) em superfícies de silício e germânio.

O comprimento de onda da excitação do laser foi de 488,0 nm com profundidade de penetração correspondente a 0,6  $\mu\text{m}$  e 514,5 nm com profundidade de penetração de 1  $\mu\text{m}$ . Verifica-se que na região de corte dútil, tensões compressivas da ordem de 100 à 300 MPa estão presentes nas faces do corte em mergulho.

Estas tensões de compressão atingem o máximo de 700 MPa próximo ao centro (Figura 4.9). Na região de fratura, tensões residuais de tração da ordem de 200 MPa foram encontradas. Usando diferentes comprimentos de onda, as tensões são ligeiramente diferentes devido a variações nas profundidades de penetração.

Corte em mergulho em um monocristal de silício com ferramenta de ponta única de diamante  
 Espectroscopia de Raman  
 Laser de Ar,  $\lambda = 488 \text{ nm}$   
 Profundidade de penetração =  $0,6 \mu\text{m}$   
 Área medida =  $1 \mu\text{m}^2$

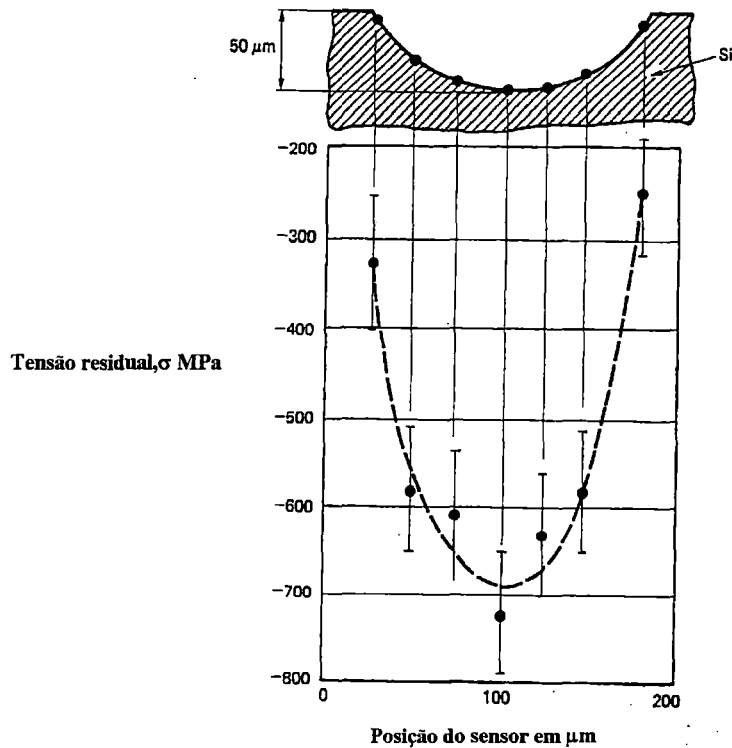


Figura 4.9 Tensões residuais em silício numa única operação de corte em mergulho [Brinksmeyer, E., 1989].

A profundidade de penetração da luz laser pode ser descrita por uma função de absorção exponencial similar à do raio-x. Pela variação do comprimento de onda é possível experimentar diferentes profundidades da amostra quando submetida à medição de tensões residuais.

A espectroscopia de Raman raramente é aplicada à engenharia de precisão. Entretanto, tem-se mostrado uma poderosa técnica para determinar não somente parâmetros do material como também medir diretamente tensões residuais com uma resolução espacial inferior ao comprimento da onda excitada.

A técnica é não-destrutiva, não requer ambiente especial (vácuo) e talvez possa ser aplicada a materiais não condutores. Um aspecto interessante para o futuro talvez seja a investigação da variação de fase em cerâmicas usinadas. A determinação das tensões residuais em cerâmicas policristalinas avançadas, infelizmente, não será possível quando o grão for de pequena dimensão. Acredita-se que para a determinação de tensões o grão necessita ter dimensões da ordem de 30  $\mu\text{m}$ .

#### **4.7 Microindentação Instrumentada**

A microindentação instrumentada é basicamente um procedimento de teste de dureza com a aplicação de baixos níveis de força, que variam numa faixa de 0,1 mN a cerca de 250 mN. A profundidade de indentação é tipicamente na faixa sub-micrométrica a qual classifica o método como quase não-destrutivo. A técnica de microindentação foi inicialmente desenvolvida para estudo das propriedades mecânicas e espessuras de finas coberturas sobre substratos do material. Devido à alta resolução na exploração de camadas profundas, acredita-se que esse método seja atualmente extremamente útil na avaliação de superfícies usinadas de precisão e ultraprecisão. A microindentação instrumentada pode ser usada em vários materiais e não requer ambiente especial tipo vácuo. Alguns cuidados devem ser tomados para prevenir distúrbios térmicos e vibrações do instrumento. Além de rígida estrutura e cobertura para isolá-lo do meio, um microindentador possui quatro importantes partes funcionais (Figura 4.10). Estas são o indentador, comando do indentador, sistema de medição de profundidade e unidade de controle.

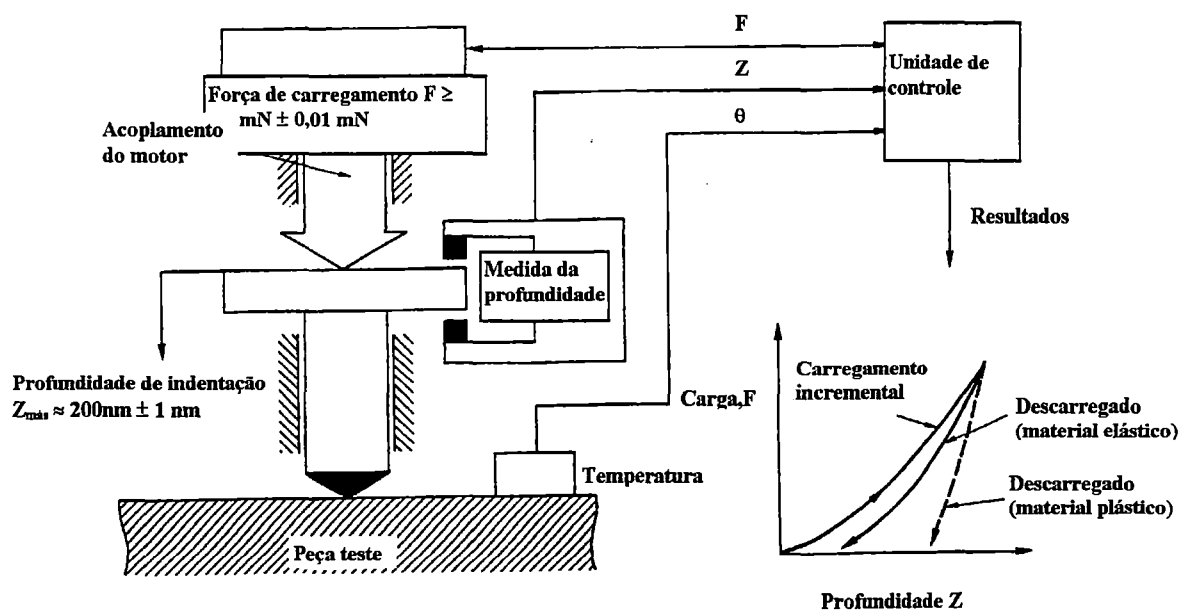


Figura 4.10 Montagem de um equipamento de microindentação [Brinksmeier, E., 1989].

Diferentes tipos de indentadores são usados na prática. O mais usado, entretanto, é o indentador com ponta de diamante tipo Vickers, o qual é vantajoso quando aplicado em materiais com alto módulo de Young. Para materiais moles ou com grãos grandes, tipo chumbo, alumínio ou cobre, recomendam-se indentadores com esferas já que atuam sobre grandes volumes do material - isso melhora a caracterização da superfície já que integram, resultando em valores médios, grande número de grãos com propriedades e orientação desiguais. A aplicação da carga e também o movimento de saída do indentador são especificados em estágios incrementais. Isto facilita reconhecer o primeiro contato do indentador com a superfície e também reduz os distúrbios de carregamentos dinâmicos. Isto é normalmente acompanhado pelo uso de um sistema eletrônico de sensoriamento que mede o deslocamento vertical do indentador, já que a técnica de microindentação é baseada na medida da profundidade de penetração. Um computador controla o teste, armazena os dados e avalia os resultados. Os dados são inicialmente registrados com carga e profundidade versus tempo. A carga e a profundidade são plotadas transversalmente e uma curva de carga versus profundidade de penetração é obtida. A Figura 4.11 mostra um exemplo

observado por um trabalho inter-laboratorial do CIRP. As curvas de micro indentação foram medidas em alumina retificada e cerâmicas de nitreto de silício a fim de obterem-se informações sobre eventuais danos superficiais e subsuperficiais. A exatidão e alta resolução do método são evidentes. A linha tangencial desenhada na parte inicial da porção de descarregamento da curva de profundidade de penetração versus carga pode ser usada para avaliar duas propriedades mecânicas convencionais, o módulo de Young e a dureza.

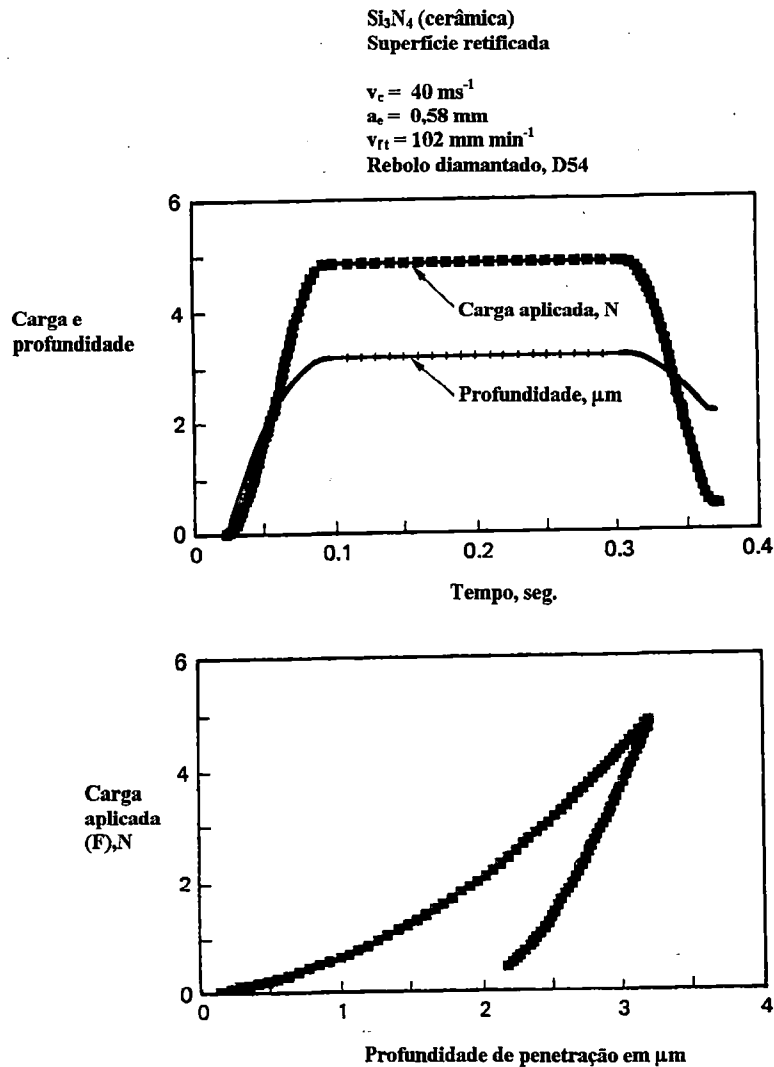


Figura 4.11 Curvas de microindentação sobre ferramentas de cerâmicas

Se o cociente entre a carga instantânea aplicada e a área da impressão projetada for calculado, podem ser obtidas curvas do fluxo do pressão. A pressão é registrado

como a medida em tempo real da deformação, a qual reflete as propriedades elásticas, inelásticas e plásticas do material. Recomenda-se calcular a diferença entre a pressão superficial sob teste e o volume de material ou padrão externo.

Mostrando a curva delta de pressão a qual fornece informações que indicam um amolecimento ou um endurecimento do material após uma operação de usinagem. Tais investigações foram registradas sobre operações de usinagem em cerâmicas como mostra a Figura 4.12.

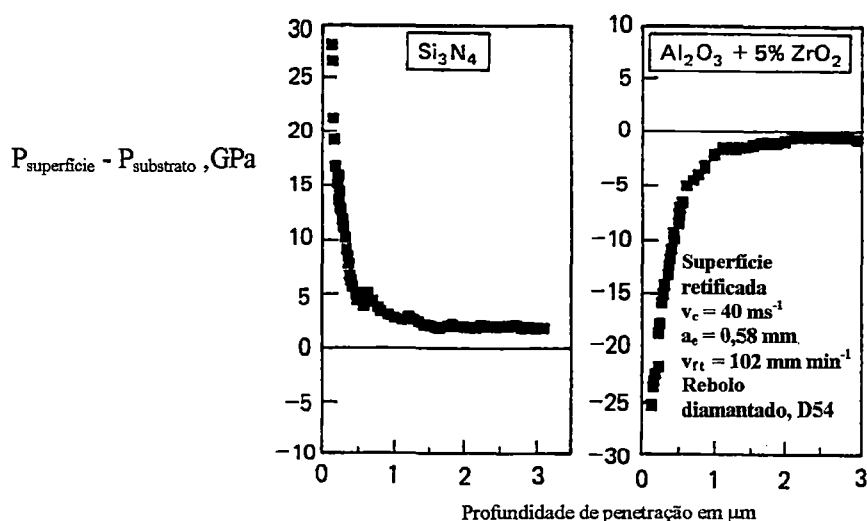


Figura 4.12 Curvas de pressão delta para cerâmicas [Brinksmeyer, E., 1989].

Pode ser visto que na retificação de precisão há alteração mensurável na região próxima à superfície. Surpreendentemente, o nitreto de silício mostra relativo endurecimento enquanto a alumina exibe relativo amolecimento da superfície. Talvez as condições para a retificação dútil tenham sido adequadas para a amostra de nitreto de silício enquanto a amostra de alumina foi retificada em modo de fratura frágil.



### **4.7.1 Indentação - Materiais frágeis**

Um teste de indentação consiste na interação entre dois corpos, um dos corpos pode ser uma superfície qualquer enquanto o segundo um elemento mecânico com geometria definida a qual está submetido a uma força variável ou carga, sendo definido como o indentador. Para analisar, quantificar e descrever o comportamento da superfície diante da aplicação de cargas variáveis é necessário estabelecer a natureza dos campos de tensões, detalhes específicos da geometria de contato e da medida da carga.

O conhecimento de alguns modelos de testes de indentação são, então, de grande importância já que estes fornecem as condições mínimas necessárias, atualmente, para se ter noção do comportamento superficial, prever provável comportamento catastrófico do material, estimar (com o auxílio de instrumentos de medição adequados) quais são os níveis de tensões residuais através da medida do recuo elástico do material e também fornecer informações sobre fenômenos como erosão, desgaste, danos de usinagem e resistência à fratura;

O termo dureza é utilizado por metalurgistas para descrever a dificuldade de penetração de um indentador em determinado material, enquanto para engenheiros projetistas, trata-se da medida do fluxo de tensão, já para engenheiros de lubrificação, expressa a resistência ao desgaste, por outro lado, o mineralogista entende como a característica de o material resistir ao riscamento e para o especialista em usinagem a resistência ao corte.

### **4.7.2 Campos de tensão na indentação**

A primeira necessidade de uma teoria baseada na sondagem da fratura causada por indentação traduz-se em conhecimento detalhado dos campos de tensão dentro do sistema carregado. Isto demanda uma visão profunda da natureza da zona de contato.

A forma do indentador é fator de vital importância na determinação das condições de contorno para o campo, como é indicado na figura 4.13.

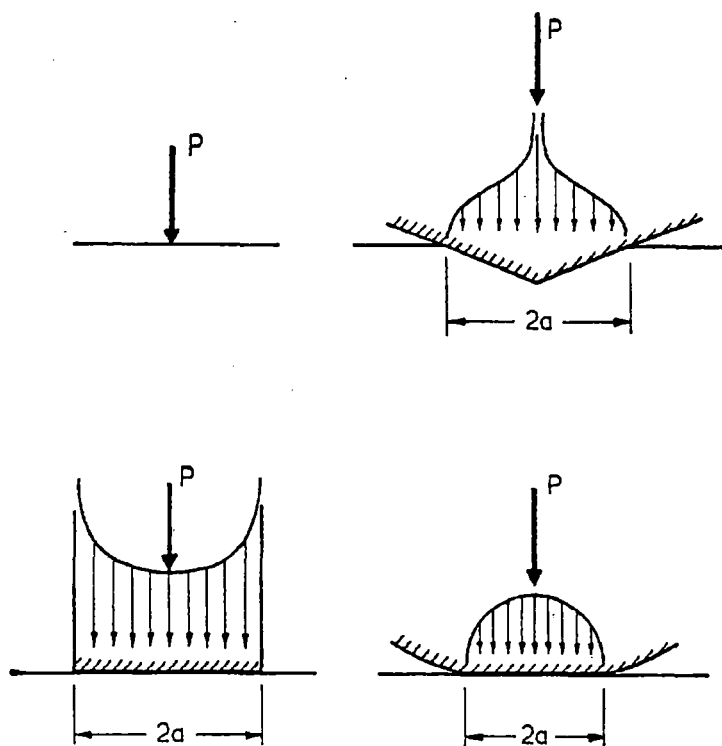


Figura 4.13 Distribuição de pressão no contato elástico para vários sistemas de indentação: (a) carga pontual, (b) indentador afiado, (c) punção plana, (d) esférico (ou cilíndrico).  $P$  caracteriza o carregamento aplicado e “ $a$ ” a extensão do contato resultante respectivamente

As forças aplicadas contêm as componentes normal e tangencial, a última pode aumentar o carregamento oblíquo ou a fricção interfacial entre o indentador e a superfície. Novamente, as forças aplicadas podem variar com o tempo enquanto durar o teste, elevando-se a condições extremas de carregamento estático ou dinâmico. A anisotropia mecânica é um outro fator a ser considerado, particularmente na indentação de monocristais.

O ponto mais importante a ser investigado é a distribuição das componentes primárias de tensão responsáveis pela operação do processo de fratura, nominalmente a tensão de tração. A observação dos campos de indentação elásticos clássicos, envolvendo no primeiro caso o indentador pontual idealizado da Figura 4.13a e no segundo o indentador esférico da Figura 4.13d, é suficiente para mostrar as características essenciais da indentação. (De acordo com o princípio da superposição linear dos campos, é possível visualizar todas as configurações de contato na Figura 4.13 em termos de distribuição apropriada da carga pontual na superfície da peça.)

Às vezes, é importante ter-se alguma sensibilidade em relação à distribuição das componentes cisalhantes e hidrostáticas. Para estas serem determinadas, a deformação irreversível estende-se pela região da superfície tensionada. Comentários sobre as complexas e pobres regras que compreendem tal deformação modificando a distribuição de tensões serão breves e qualitativos.

Deve-se iniciar a análise das tensões introduzindo-se um parâmetro de escala conveniente para o campo geral: a escala de contato espacial com algumas características dimensionais, quer dizer  $a$  (Figura 4.13); então a intensidade escalar da tensão com uma pressão média de contato,

$$p_0 = P / \alpha \pi a^2 \quad (1)$$

sendo  $P$  a carga aplicada e  $\alpha$  uma constante adimensional refletindo a geometria do indentador; para indentadores axialmente simétricos,  $\alpha = 1$ .

### 4.7.3 Indentador com carga pontual - Campo elástico de Boussinesq

Considere um material isotrópico, linearmente elástico sujeito à uma carga pontual  $P$  (Figura 4.13a). A solução para o campo de tensão nesta configuração foi primeiro dada por Boussinesq em 1885 e assume a forma geral simples de:

$$\sigma_{ij} = (P / \pi R^2) [f_{ij}(\phi)]\nu \quad (2)$$

onde:

- ◆  $R$  - distância radial do ponto de contato
- ◆  $f_{ij}$  - função angular
- ◆  $\phi$  - ângulo entre o eixo normal da carga aplicada e  $R$
- ◆  $\nu$  - coeficiente de Poisson

Quando expressa em termos das coordenadas curvilíneas da Figura 4.14. Isto é, a magnitude das tensões é proporcional à carga aplicada e ao inverso quadrado da distância radial do ponto de contato, algumas vezes independente da função angular a qual é ao mesmo tempo uma função do coeficiente de Poisson.

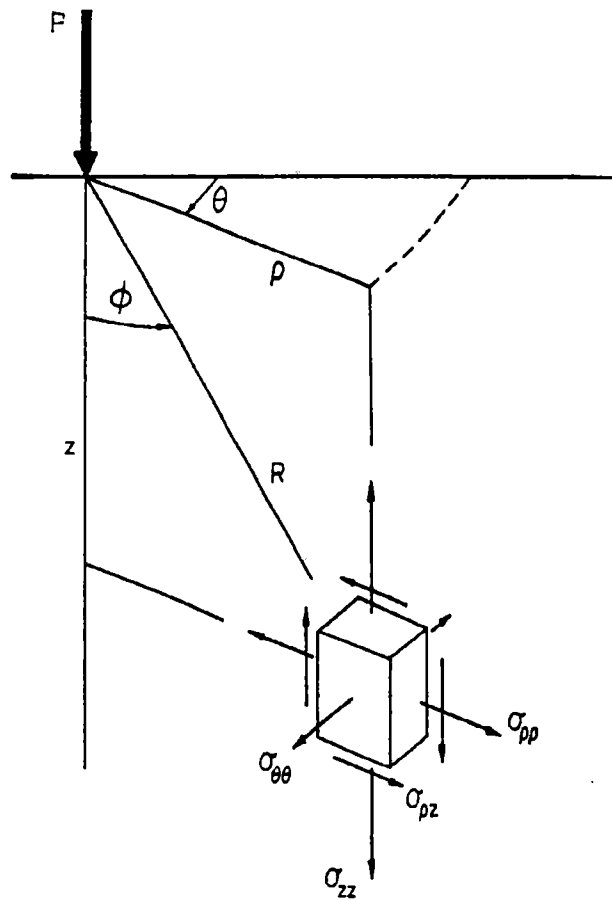


Figura 4.14 Sistema de coordenadas para o campo de tensão na indentação

A singularidade em  $R=0$  na equação 2 é uma característica do campo de Boussinesq e consequência da associação implícita de uma área de contato ( $a=0$ ) para a superposição de uma carga. Na realidade, a deformação inelástica não linear operará na liberação das altas concentrações de tensões acerca de um ponto singular, e assim fazendo a distribuição da carga sobre uma área de contato diferente de zero ( $a>0$ ). Torna-se conveniente reescrever a equação 2 na forma alternativa normalizada,

$$\sigma_{ij} / p_0 = \alpha(a/R)^2 [f_{ij}(\phi)]v \quad (3)$$

É de particular interesse o caso onde o contato segue de acordo com o princípio da similaridade geométrica, para a intensidade do campo ser então governada explicitamente pela dureza na indentação  $H \approx p_0 = \text{const.}$

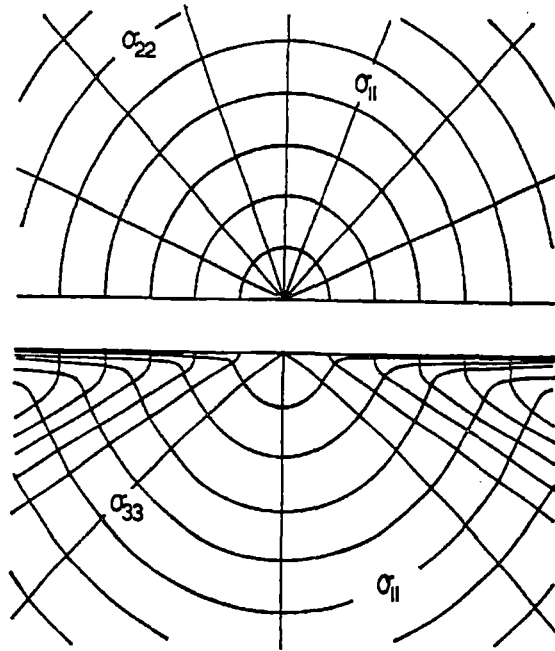


Figura 4.15 Vista superior de metade da superfície indentada (topo) e vista lateral (inferior) das trajetórias das tensões no campo de Boussinesq. (Para  $\nu = 0,25$ )

As características essenciais do campo são ilustradas nas Figuras 4.14 e 4.15, para o caso de  $\nu=25$  ( um valor típico para materiais frágeis). As direções das tensões principais foram investigadas,  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  e  $\sigma_{33}$  por meio do gráfico de trajetórias das tensões na Figura 4.15. As três famílias de trajetórias são denominadas tal que  $\sigma_{11} \geq \sigma_{22} \geq \sigma_{33}$  aproximadamente em todos os pontos. Similarmente, investigou-se a distribuição das tensões principais por meio do gráfico de contorno na Figura 4.16.

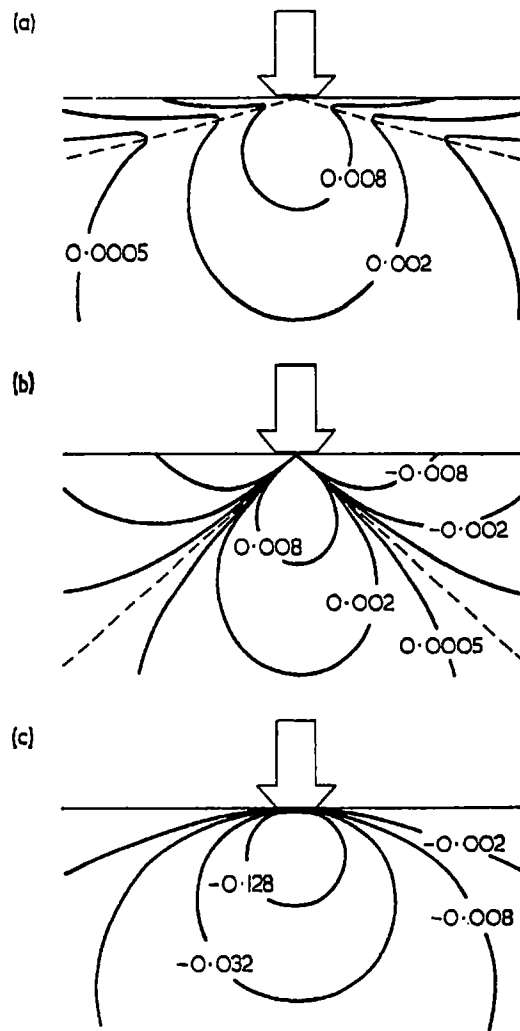


Figura 4.16 Contorno das tensões normais principais, (a)  $\sigma_{11}$ , (b)  $\sigma_{22}$ , (c)  $\sigma_{33}$ , no campo de Boussinesq, mostrado no plano contendo o eixo de contato. Para  $\nu = 0,25$ . A unidade de tensão é  $p_0$ , o diâmetro de contato é  $2a\sqrt{\alpha}$ .

As componentes  $\sigma_{11}$  e  $\sigma_{33}$  atuam dentro de planos simétricos através do eixo de carga, são todas respectivamente componentes de tração e compressão. A componente  $\sigma_{22}$ , uma “tensão circular” é tração em uma região abaixo do indutor porém compressão próximo à superfície. Nota-se que a máxima tensão de tração ocorre em  $\phi = \pi/2$  ( $\sigma_{11}$ ) e  $\phi = 0$  ( $\sigma_{11} = \sigma_{22}$ ). Das três tensões normais principais, torna-se de fácil compreensão a avaliação das tensões compressivas hidrostáticas e principais de cisalhamento; uma ao longo do eixo de contato, onde a máxima é mais frequente, estas componentes normalmente excedem às de tração várias vezes.

#### 4.7.4 Indentador esférico - Campo elástico Hertziano e suas variantes

O caso de um indentador esférico carregado sobre uma peça plana, em virtude de sua facilidade na aplicação e prevenção de singularidades complexas, é a configuração com contato elástico mais extensivamente estudada. O campo de tensão Hertziano é descrito em primeiro lugar, em seguida discutem-se algumas modificações que ocorrem em situações de importância prática.

#### 4.7.5 Campo Hertziano ideal

Considera-se um meio espaço isotrópico, linearmente elástico sujeito a um carregamento normal por um indentador esférico de raio  $r$ . A análise original de Hertz fornece considerações quantitativas explícitas somente para as condições de tensão superficial. Tomando  $E$  e  $E'$  como os módulos de Young da peça e o indentador e  $\nu$  e  $\nu'$ , respectivamente, como os coeficientes de Poisson, temos que o raio  $a$  do contato elástico circular é dado por

$$a^3 = 4kPr/3E, \quad (4)$$

onde:

$r$  - raio do indentador

$a$  - raio do contato elástico circular

onde  $P$  é a carga normal aplicada e  $k$  é uma constante adimensional,

$$k = 9/16 [(1 - \nu^2) + (1 - \nu'^2) E/E'] \quad (5)$$



A distância de aproximação mútua entre os corpos é dada por  $Z$

$$Z^3 = (4k/3E)^2 P^2/r \quad (6)$$

Estas três equações são suficientes para especificar as condições de carregamento para alguns indentadores esféricos usados normalmente nos arranjos para indentação. Dentro do círculo de contato, as tensões, são distribuída como um hemisfério de tensão compressiva (Figura 4.13d). A máxima tensão de tração ocorre na superfície da peça na aresta de contato sendo direcionada radialmente. A tensão cai com a distância radial  $\rho$  (Figura 4.14) externa ao círculo de contato de acordo com

$$\sigma_{\rho\rho}/p_0 = (1 - 2\nu/2) (a/\rho)^2, (\rho \geq a) \quad (7)$$

Em 1904 Hubber estendeu a análise de Hertz e produziu uma solução completa para os campos de tensão na forma

$$\sigma_{ij} / p_0 = [ g_{ij} (\rho/a, z/a) ] \nu \quad (8)$$

Procedendo da mesma forma que no caso Boussinesq plotou-se nas figura 4.18 e 4.19 trajetórias e contornos para as funções da equação 8 correspondente as três tensões principais, desta vez para  $\nu = 0,33$ . Comparando estes gráficos com suas partes contornadas nas Figuras 4.15 e 4.16 é aparente que a forma precisa da distribuição de carga aplicada tem uma profunda influência sobre a natureza do campo de contato próximo. Observando atentamente as direções das tensões principais, a mais importante variação aparenta ser um menor “achatoamento” (flattening) das trajetórias de  $\sigma_{11}$  imediatamente abaixo da área de contato.

Por outro lado, variações mais drásticas são vistas na magnitude das tensões, nas quais a componente de tração tende a ser localmente suprimida. As tensões  $\sigma_{11}$  e  $\sigma_{22}$  tornam-se compressivas a uma profundidade de  $\approx 2a$ , abaixo da qual uma rápida

convergência para os valores de Boussinesq; a Figura 4.17 ilustra estas convergências para as tensões  $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{11} = \sigma_{22}$  ao longo do eixo de contato. Na região superficial externa ao contato nenhum sinal de reversão das tensões foi evidenciado, porém gradientes de tensão extremamente altos aparecem na aresta de contato; estes gradientes tornam-se extremamente severos para pequenas áreas de contato.

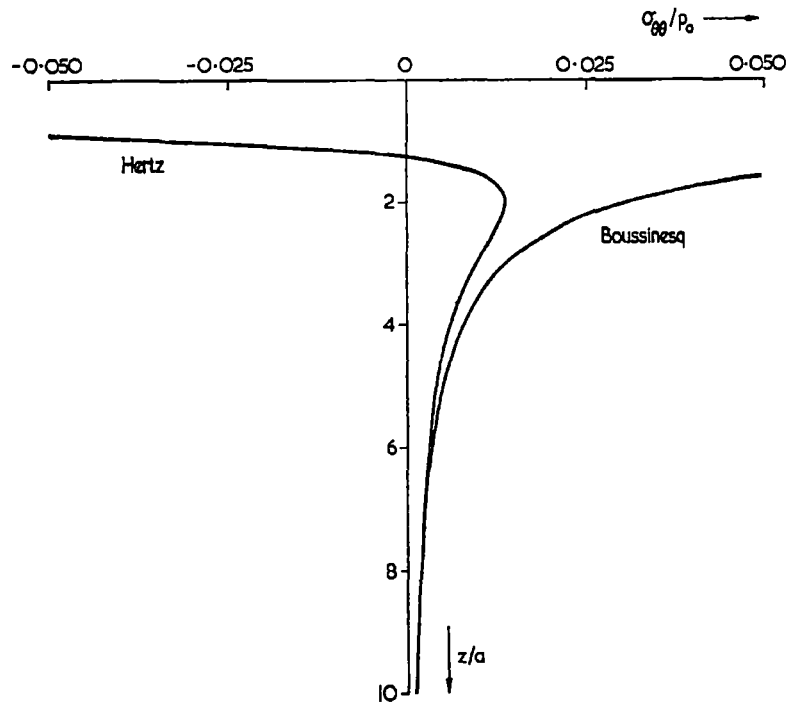


Figura 4.17 Comparação entre as tensões  $\sigma_{\theta\theta}(z)$  determinadas para Boussinesq e os campos Hertzianos. Para  $\nu = 0,25$

#### 4.7.6 Forças de fricção tangenciais - combinação elástica com interface estática

Em muitos testes de indentação é usual escolher materiais tais que a rigidez elástica do indentador exceda a da peça ( $E' > E$ ), a fim de evitar a deformação do indentador. Sob carregamento normal, as superfícies de contato opostas serão teoricamente deslocadas radialmente, devido à ação das componentes compressivas de tensão radiais  $\sigma_{22}$  dentro de  $\rho < a$  (Figuras 4.18 e 4.19).

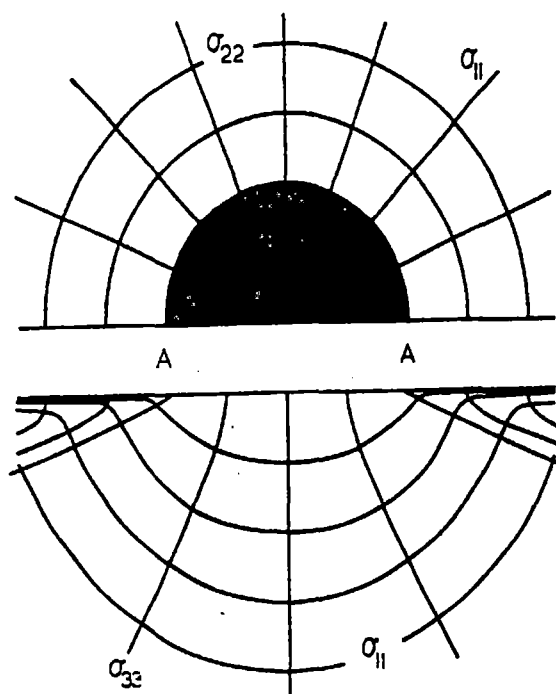


Figura 4.18 Vista lateral da superfície indentada (superior) e vista lateral (inferior) das trajetórias em um campo de tensão Hertziano. Para  $\nu = 0,33$ . (AA é o diâmetro de contato)

A peça mais resistente à indentação necessitará passar por um maior deslocamento que o indutor, porém será restringida pela tração friccional na interface. Isto aumentará a distribuição das forças tangenciais atuando externamente à superfície de contato da peça para ser superposta à distribuição hemisférica das forças Hertzianas normais (um igual e oposto arranjo de forças atuará sobre a superfície correspondente do indutor).

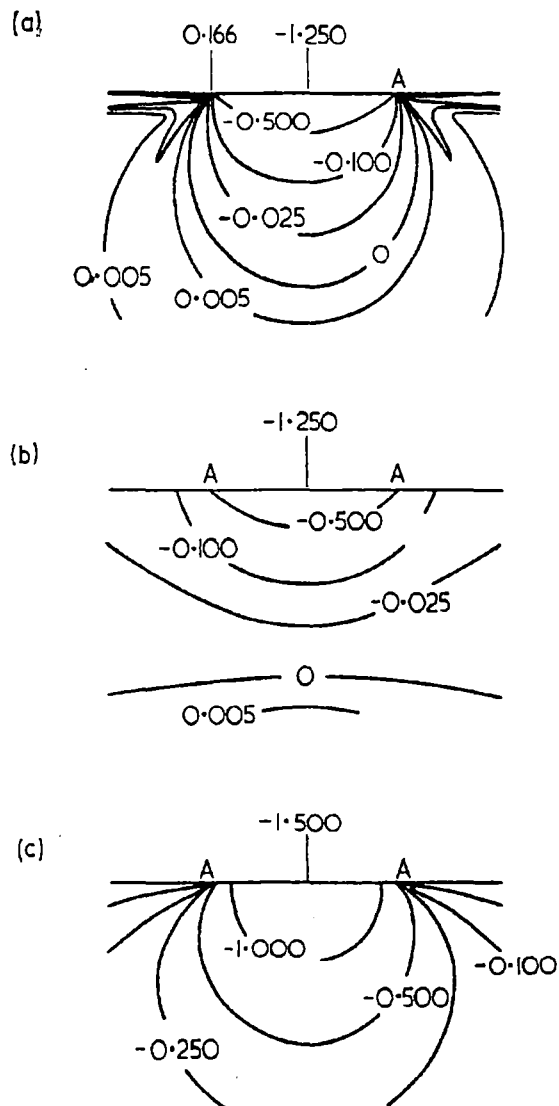


Figura 4.19 Contornos das tensões normais principais, (a)  $\sigma_{11}$ , (b)  $\sigma_{22}$ , (c)  $\sigma_{33}$ , no campo Hertziano, mostrado no plano contendo o eixo de contato. Para  $\nu = 0,33$ . A unidade de tensão é  $p_0$ , o diâmetro de contato AA é  $2a$

O efeito modificado da tração tangencial sobre o campo de tensão foi discutido por Johnson *et al* [1973]. Suas análises dão uma explícita atenção às tensões radiais na superfície da peça externas à área de contato e somente para duas situações limites: (a) “nenhum deslizamento”, onde a fricção é suficientemente alta que o deslizamento seja inibido em todos os pontos da interface, já que em tal caso a distribuição de tensão modificada é inteiramente determinada pelo parâmetro de combinação elástica,

$$k = \frac{(1 - 2\nu)/\mu - (1 - 2\nu')/\mu'}{(1 - \nu)/\mu + (1 - \nu')/\mu'} \quad (9)$$

com  $\mu$  e  $\mu'$  sendo os módulos de cisalhamento da peça e do indentedor respectivamente; (b) “deslizamento completo”, onde a fricção é suficientemente baixa, o que leva à ocorrência de deslizamento em todos os pontos, logo o coeficiente de fricção estática,  $f$ , torna-se o parâmetro determinante. A figura 4.20 ilustra as duas situações e seus comportamentos sobre as tensões radiais; nota-se uma tendência da tensão máxima diminuir e mover-se para fora do círculo de contato quando os parâmetros  $k$  e  $f$  tornam-se maiores que zero. Geralmente, o deslizamento ocorrerá somente sobre parte da área de contato (i.e. sobre um valor nulo); a situação intermediária, determinada pelo coeficiente  $f/k$ , é um problema complexo o qual ainda não tem solução.

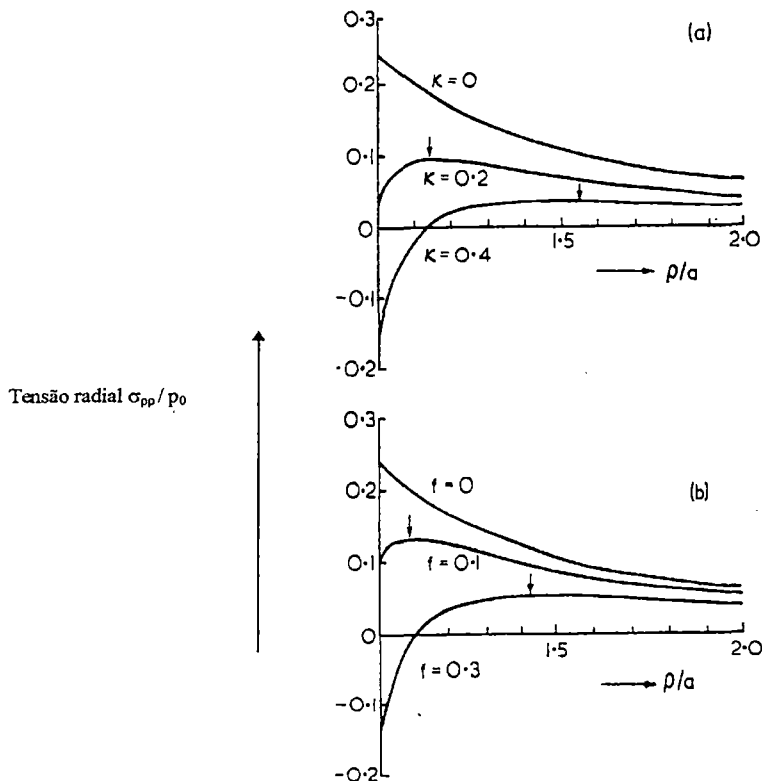


Figura 4.20 Efeito da combinação elástica entre o indentedor e a peça sobre tensão radial superficial no campo Hertziano: Para  $\nu = 0,25$

No caso especial de simetria elástica, i.e., indentador e peça do mesmo material, tem-se  $k = 0$ , há uma configuração na qual a análise Hertziana do campo ideal permanece estritamente válida. Maiores detalhes dos efeitos da combinação elástica no contato interfacial são tratados por Johnson *et al*[1973]. Esta é uma situação onde a superfície constante é topograficamente rugosa, em pequena escala comparada àquela do próprio contato. Utilizando a análise de elasticidade anterior para tais superfícies torna-se possível mostrar que o efeito da rugosidade é similar àquele da fricção interfacial, porém geralmente de magnitude relativamente insignificante.

#### 4.7.7 Forças de fricção tangenciais - interface de deslizamento

Suponha que um indentador esférico é feito transladar transversalmente à superfície da peça a uma velocidade constante. Uma vez mais, trações friccionais atuarão para restringir os deslocamentos tangenciais no contato. Desta vez a distribuição resultante das forças tangenciais atuarão sobre a peça na direção de movimentação do indentador.

O efeito dos movimentos de tração sobre os campos de tensão são tratados em profundidade por Hamilton e Goodman [1966], para o caso de deslizamento completo. Nesta configuração o contato geométrico permanece não afetado pela fricção, porém a tensão radial máxima na aresta da trilha do indentador é aumentada marcadamente de acordo com

$$\sigma_{\rho\rho}/p_0 = (1 - 2\nu/2) (1 + Af) \quad (10)$$

onde  $f$  é agora o coeficiente extritamente de fricção cinética, e

$$A = 3\pi (4 + \nu) / 8 (1 - 2\nu) \quad (11)$$

Hamilton e Goodman [1966] também fornecem soluções exatas para os campos de tensões. Os gráficos das maiores tensões principais,  $\sigma_{11}$ , para  $f = 0,1$  e  $0,5$  com  $\nu = 0,33$  são mostrados conforme a Figura 4.21.

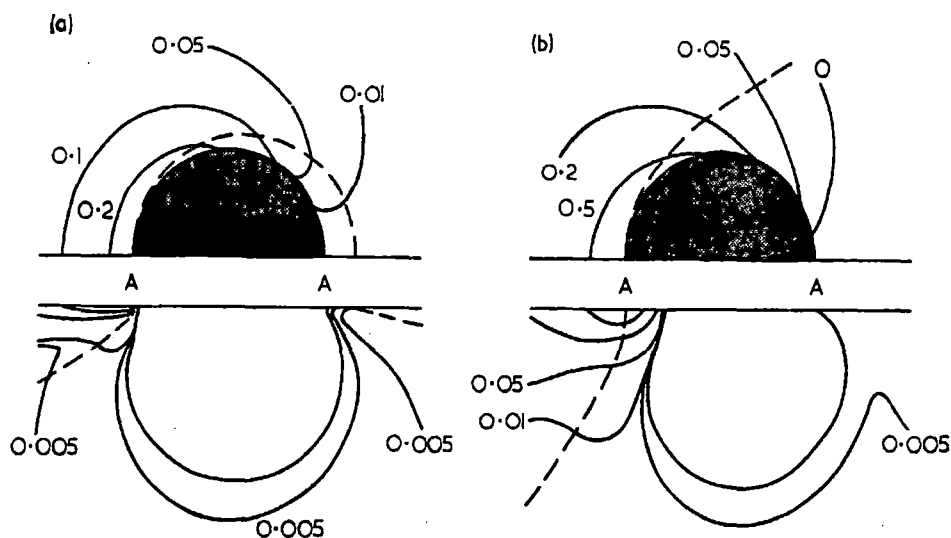


Figura 4.21 Vista lateral da superfície indentada e vista lateral dos contornos das tensões máximas principais,  $\sigma_{11}$ , em peças elásticas em contato com a esfera de deslizamento (diâmetro = AA e a movimentação é da esquerda para a direita); (a)  $f = 0,1$ ; (b)  $f = 0,5$ . A unidade de tensão é  $p_0$ . As linhas hachuradas são,  $\sigma_{22}$  (vista da superfície) e  $\sigma_{33}$  (vista lateral), as trajetórias desenhadas dos locais de máximas tensões de tração na peça. Para  $\nu = 0,33$

São também traçadas as trajetórias para as menores tensões principais, iniciando nos pontos de máximas tensões no campo. Nota-se a dramática tendência para aumento de tensão atrás do indentador e correspondente supressão em frente, quando em maior movimento. Nota-se também correspondente tendência para aumento no espaçamento dos contornos de tensão, i.e., uma redução no gradiente de tensão, abaixo da aresta da trilha, e variação da simetria radial dos padrões das trajetórias das tensões.

#### 4.7.8 Campos de deformações inelásticas

Como mostrado anteriormente sobre o campo Boussinesq na seção 4.7.3, a limitada deformação inelástica tenderá a ocorrer acerca de alguma alta concentração de tensão, especialmente em alguns pontos singulares, no sentido oposto ao campo de indentação elástica. Tal situação apresenta problemas complexos na análise de tensão, particularmente quando o material do indentador aumenta em fragilidade. Em grande número de sistemas frágeis é muito natural a deformação inelástica permanecer altamente contida.

Não é muito simples estabelecer qual dos dois processos básicos compete, o fluxo de cisalhamento induzido (ambos plástico ou viscoso) ou densificação induzida de pressão (variação de fase ou compactação de uma abertura microestrutural), numa pequena zona de contato em dado material. Então, cada módulo de deformação é caracterizado por sua própria, complicada, resposta de tensão-deformação tipificada por algum nível limite de deformação (limite de tensão, pressão de densificação) obtido no interior do material.

Entretanto, a própria zona não linear confinada na configuração linear do material é sujeita a uma restrição elástica. O problema geral com a indentação não linear parecia ser sem solução. Entretanto, através da introdução de modelos simplificados alguns progressos têm ocorrido no caso de materiais elastos-plásticos. Modelos estes que têm sido observados por Tabor [1970] e Johnson[1970]. Os conceitos básicos propostos e observados por Marsh estão no esquema da Figura 4.22.



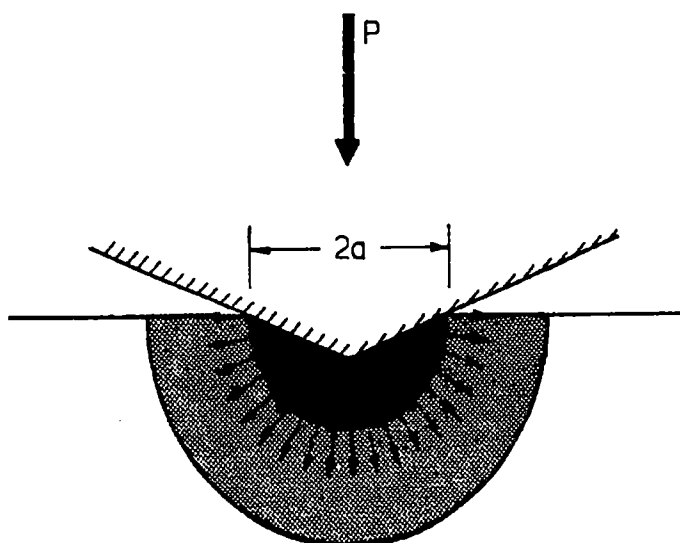


Figura 4.22 Modelo para o problema da indentação elástico-plástica. As regiões escuras denotam o “núcleo hidrostático”, as regiões sombreadas as “zonas plásticas” e as regiões ao redor a “matriz elástica”

A associação muito simples é aquela da simetria esférica no campo de deformação: imediatamente abaixo do indutor o material deve-se comportar como um “núcleo” expandindo externamente, injetando uma pressão hidrostática uniforme em torno do ponto de indentação; restringindo o núcleo a uma ‘região plástica’ ideal, dentro da qual o fluxo ocorre de acordo com alguns critérios de campo simples; à frente da região plástica permanece a ‘matriz’ elástica. Sendo  $Y$  limite de tensão do material indentado, as análises dão

$$p_0/Y = h(E/Y), \quad (12)$$

onde  $h(E/Y)$  é uma função variando suavemente. Entretanto, as associações incorporadas por este modelo precisam ser examinadas criticamente. Por exemplo, com indentadores cônicos ou piramidais com pequenos ângulos entre as arestas, o material plástico tenderá a empilhar ao redor das faces do indutor destruindo a simetria esférica das condições de contorno elásticas-plásticas.

Da análise Hertziana ficou claro que pequenas variações na distribuição de tensões no limite elástico pode conduzir a grandes variações nos campos na região de contato. Esta sensibilidade a detalhes no modelo enfatiza a futilidade de algumas observações na exata análise de tensões. Dificuldades similares poderiam ser esperadas no caso de deformação por densificação, entretanto modelos análogos têm sido propostos deste modo.

Surgem algumas complicações que acompanham a deformação inelástica e devem ser mencionadas aqui. Devido ao material inelástico dentro da zona de contato (por definição) sofrer deformação permanente depois de alguns ciclos de carregamento e descarregamento, o estado inicial livre de tensões ao redor da matriz elástica pode nunca ser completamente registrado. Isto é, um campo de tensão residual permanecerá no sólido descarregado e, entretanto, sua natureza pode ser muito diferente do correspondente estado de tensão completamente carregado, geralmente o corpo reterá uma componente de tração significativa.

## 4.8 COMENTÁRIOS FINAIS

Determinar e quantificar as tensões residuais ou variações na estrutura cristalina, devido ao encruamento subsuperficial, contidas em um elemento mecânico após operações de corte de ultraprecisão, i.e., usinagem com ponta única de diamante é extremamente importante já que a presença de trincas, a prevenção de falhas por fadiga e exigências de forma são fatores importantes.

A aplicação de técnicas com interação micromecânicas e/ou com ondas eletromagnéticas é o que há de mais recente e sofisticado para a medição de tensões residuais e variações de dureza em camadas subsuperficiais cuja profundidade varia de 0 a 1 micrometros.

O comportamento atômico do material, i.e., variação dos planos atômicos quando submetidos a forças/cargas externas. Após as cargas serem retiradas ou cessadas, expressam um estado de tensões residuais que pode ser verificado através de técnicas específicas, mecânicas ou com ondas eletromagnéticas, podem ser detectadas.

Várias técnicas foram apresentadas e discutidas suas características específicas e possibilidades de aplicação na medida de tensões residuais em materiais dúteis e frágeis. Para evidenciar a diferença entre materiais frágeis e dúteis alguns tópicos referentes a um ensaio de indentação em materiais frágeis foram mostrados, cujas figuras e gráficos elucidam as características do comportamento frágil do material.

As técnicas de microindentação e difração de raios-x com incidência razante foram apresentadas e discutidas em detalhes neste capítulo. A difração de raios-x com incidência razante se mostra muito apropriada à proposta deste trabalho já que possibilita medidas em regiões da peça usinada extremamente próximas à superfície, i.e., profundidades de 0 a 1 micrometro e a interação não ocorre por contato mecânico evitando a introdução de esforços ou maiores níveis de tensões residuais, se não for adequadamente planejada. Os estudos comparativos são poucos já que se

trata de uma técnica emergente, no entanto, a difração convencional e alguns ensaios em materiais frágeis aparecem como ótimos parâmetros de comparação, considerando que as peças usinadas são de Alumínio. Entretanto, devido a disponibilidade e a viabilidade econômica serão realizados ensaios de microindentação instrumentada e destes investigações serão feitas para a compreensão da influência da profundidade de corte nos danos subsuperficiais e introdução de variações dos parâmetros de rede.

A microindentação, por outro lado, é uma técnica consolidada e os parâmetros para comparação são muitos, entretanto, com o inconveniente do contato mecânico que talvez introduza alguns esforços ou tensões que venham a se concretizar como residuais após a retirada da carga.

A técnica de microindentação instrumentada foi escolhida por ser, quando se trata de ensaios com contato mecânico, a que melhor caracteriza o estado do material após ter sido trabalhado (usinado). Somando-se a isto a disponibilidade e facilidade de utilização dos equipamentos, seja de microindentação ou de medição de rugosidade.

# CAPÍTULO

## 5

### Ensaaios

#### **5.1 Planejamento experimental**

- I. Material das amostras**
- II. Preparação das amostras**
- III. Método de fixação das amostras à placa**
- IV. Metodologia**
- V. Relação das condições dos ensaios de corte**
- VI. Especificação das ferramentas de corte de diamante**
- VII. Análise da rugosidade**
- VIII. Microindentação instrumentada**

## I. Material das amostras

O material utilizado foi uma liga de Alumínio fornecido pela Alcan do Brasil, cujas as características são:

Tabela 5.1 - Composição química do alumínio 6061 - T6

Material	Cu %	Fe %	Mg %	Mn %	Si %	Ti %	Zn %	Cr %	Diâmetro (mm)	Dureza HV
Al 6061-T6	0,4	0,7	1,2	0,15	0,8	0,15	0,25	0,35	20,00	115

## II. Preparação das amostras

Os corpos de prova foram preparados com o objetivo de permitir o máximo aproveitamento do diâmetro original da barra, de 20 mm. O comprimento dos corpos de prova foi definido de forma a permitir a confecção de um número máximo de peças, o que resultou em um comprimento de 16 mm. O material foi utilizado para o ensaio conforme recebido da fábrica, não sendo portanto submetido a nenhum tratamento especial antes de ser submetido à operação de torneamento, no ASG 2500 [Porto.J.V.A.,1996]

## III. Método de fixação das amostras à placa

Para fixar as amostras à placa foi desenvolvido um dispositivo de fixação com o objetivo de se permitir a fixação dos corpos de prova na placa de vácuo do torno ASG 2500, conforme figura abaixo:

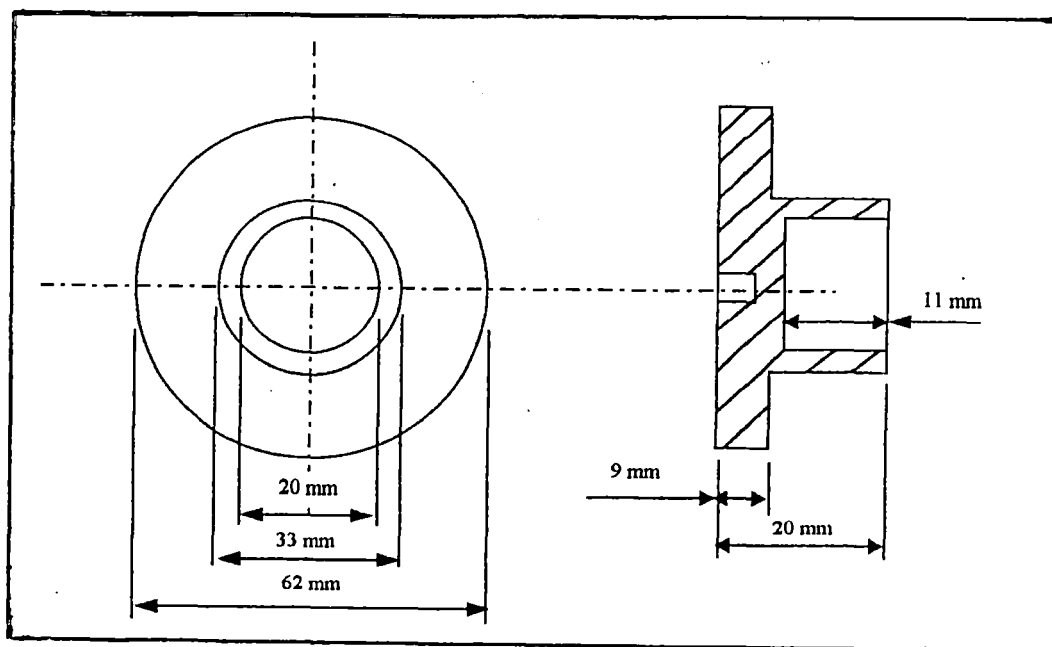


Figura 5.1 - Croqui do dispositivo de fixação da peça

#### IV. Metodologia

O ensaio de microindentação instrumentada tem como objetivo medir a variação da microdureza da camada encruada devido ao processo de usinagem de ultraprecisão.

Para a realização deste ensaio foram utilizadas onze (11) amostras obtidas pelo processo de usinagem convencional conforme item II, as quais posteriormente foram submetidas a operações de faceamento onde os parâmetros de usinagem especificados, tais como velocidade de avanço e profundidade de corte, estavam combinados conforme as tabelas 5.2 e 5.3.

Afim de obter um padrão para comparação entre a microdureza da camada subsuperficial das peças usinadas pelo processo de ultraprecisão, retirou-se do “rol” uma amostra, aleatoriamente, que foi submetida a tratamento térmico, para alívio de tensões, nas seguintes condições:

amostra número quatro: 2 horas à 200 °C

As demais não sofreram nenhum tratamento térmico.

As onze amostras foram microindentadas com o microindentador Fisher, o qual mede dinamicamente a microdureza plástica do material em função da profundidade atingida devido à carga aplicada. O equipamento, microindentador Fisher, foi ajustado para sua capacidade de carga máxima, 100g (1000 mN). O instrumento utilizado consta de um microindentador Vickers cuja geometria é a mesma dos indentadores convencionais, 136° de abertura da pirâmide.

O ensaio de microindentação da amostra tratada termicamente gerará valores de microdureza que são tratados por métodos estatísticos, o que é possível através do software acoplado ao equipamento, produzindo curvas de microdureza versus profundidade de indentação cujo objetivo é visualizar graficamente onde os valores de microdureza tornam-se constantes e a que profundidade para, então, serem adotados como valores de referência para os demais ensaios que serão realizados com as dez amostras não aliviadas.

Graficamente a região onde o valor da microdureza plástica torna-se constante, para a amostra aliviada, será interpretado como ponto de referência ou limite da zona encruada, isto é, valores de microdureza acima deste estarão dentro da zona encruada (nas outras amostras não aliviadas e usinadas). Desta forma é quantificada, em função da profundidade de microindentação a espessura da camada encruada. Cada amostra foi microindentada cinco vezes conforme croqui abaixo.



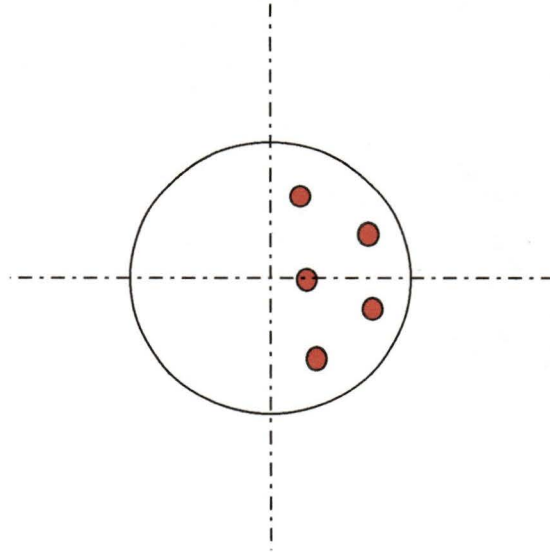


Figura 5.2 - Croqui da superfície da amostra microindentada

Em cada ponto microindentado foram coletados 20 valores de microdureza, por amostra, já que o intervalo de tempo selecionado foi de 0,1 segundo, objetivando uma curva de microdureza média que expusesse a variação da camada subsuperficial encruada e deste modo pode observar a espessura da zona encruada em função da profundidade de microindentação (A profundidade onde a microdureza é igual à do corpo de prova aliviado é considerada como espessura encruada).

## V. Relação das condições dos ensaios de corte

Tabela 5.2 - Parâmetros de usinagem para a ferramenta de corte com raio de ponta de 1,52 mm

Ensaio de corte	Material	Rotação do eixo-árvore (rpm)	Velocidade de avanço (mm / min)	profundidade de corte ( $\mu\text{m}$ )	Número da peça
1	Al 6061-T6	1000	5	10	P31
2	Al 6061-T6	1000	11	10	P02
3	Al 6061-T6	1000	13	3	P33
2	Al 6061-T6	1000	14	10	P03

Tabela 5.3 - Parâmetros de usinagem para a ferramenta de corte com raio de ponta de 0,76 mm

Ensaio de corte	Material	Rotação do eixo-árvore (rpm)	Velocidade de avanço (mm / min)	profundidade de corte ( $\mu\text{m}$ )	Número da peça
4	Al 6061-T6	1000	10	10	P26
5	Al 6061-T6	1000	13	10	P06
6	Al 6061-T6	1000	13	3	P11
6	Al 6061-T6	1000	13	5	P10
5	Al 6061-T6	1000	14	10	P08
4	Al 6061-T6	1000	20	10	P18

## VI. Especificação das ferramentas de corte de diamante monocristalino

As ferramentas monocortantes de diamante natural utilizadas para a execução da operação de faceamento dos corpos de prova foram as abaixo descritas:

Tabela 5.4 - Geometria das ferramentas de corte

Nº de série	Raio de ponta (mm)	Angulo de saída ( ° )	Angulo de folga ( ° )
23 436	1,52	0°	11,5°
19 610	0,76	0°	11°

## VII. Análise da rugosidade superficial

A rugosidade superficial dos corpos de prova usinados foi medida através do rugosímetro Form Talysurf. A resolução (i.e., a menor quantidade possível de ser medida com um instrumento em particular) deste equipamento é de 4 nm [Porto. A. J. V., 1995]

O Form Talysurf é um sistema de medição por contato de forma e rugosidade superficial, utilizando um “stylus” de diamante. Este sistema apresenta a desvantagem de poder causar danos à superfície pela ponta de diamante que é pressionada sobre a peça.

O instrumento é operado através de um microcomputador, de maneira que todo o procedimento de medição pode ser controlado automaticamente, ou seja, posicionamento, pressão de contato, velocidade de medição, comprimento de medição, filtros e “cut-off”.

O sensoriamento da posição vertical da agulha ao longo da superfície se faz através de um sistema interferométrico (tipo Michelson), o que garante a alta resolução e repetibilidade do instrumento.

A tabela 5.5 mostra os resultados de rugosidade das amostras usinadas com ferramenta de raio de ponta 1,52 mm e a tabela 5.6 das amostras usinadas com ferramenta de raio de ponta de 0,76 mm.

Tabela 5.5 - Rugosidade das amostras usinadas com a ferramenta de raio de ponta de 1,52mm

Velocidade de avanço (mm / min)	profundidade de corte ( $\mu\text{m}$ )	$R_t$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Número da peça
5	10	0,1065	0,0079	P31
11	10	0,1522	0,0096	P02
13	3	0,1091	0,0092	P33
14	10	0,1314	0,0098	P03

Tabela 5.6 - Rugosidade das amostras usinadas com a ferramenta de raio de ponta de 0,76mm

Velocidade de avanço (mm / min)	profundidade de corte ( $\mu\text{m}$ )	$R_t$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Número da peça
10	10	0,1111	0,0078	P26
13	10	0,1069	0,0108	P06
13	3	0,1453	0,0142	P11
13	5	0,1281	0,0128	P10
14	10	0,1649	0,0137	P08
20	10	0,2325	0,0126	P18

## VIII. Microindentação instrumentada

A microindentação instrumentada constitui-se numa técnica nova, não destrutiva, de medição de microdureza em camadas superficiais, filmes finos e em materiais homogêneos utilizando cargas muito baixas que variam de 0,025 a 1N (2,5 a 100gf). O método é baseado no uso do indentador convencional Vickers acoplado a um dispositivo de medida de deslocamento.

Sob o efeito da carga variável, o indentador se desloca e, a intervalos de tempo determinados, um valor de microdureza é associado à profundidade e carga correspondentes. Através do uso de software adequado ao sistema de medição podem ser geradas curvas da microdureza versus carga; microdureza versus profundidade de indentação e profundidade de indentação versus microdureza. O método também fornece informações sobre trincas e propriedades de recuo elástico do material da peça.

O método de microdureza Vickers normalmente produz valores de microdurezas com valores diferentes mesmo sendo obtidos de ensaios realizados sobre o mesmo material. Verica-se através de ensaios realizados em materiais idênticos que o valor da microdureza obtido é altamente dependente do trabalho que foi realizado em sua superfície. O material pode ter sua superfície submetida a diferentes operações de acabamento superficial tais como retificação, polimento e ataque químico, polimento e ataque químico severo, tratamentos eletroquímicos combinados, polimento com pasta de diamante e também pode ter sido usinada com uma ferramenta de ponta única de diamante natural monocristalino, o que induz microdeformações em camadas subsuperficiais que variam de alguns poucos microns a mais de uma dezena de microns (0 a 10 micrometros).

O microdurômetro trabalha com uma faixa de cargas de 0 a 100 gramas, sendo é sensível à variação de microdurezas em camadas extremamente finas tais como películas de materiais duros depositadas sobre substratos de materiais moles ou o inverso películas de materiais moles depositadas sobre materiais duros, sendo portanto o instrumento capaz de perceber esta região de transição claramente.

Essa eficiência característica do instrumento pode ser explicada através do procedimento interativo do indentador com o material o qual exerce uma força ( $F$ ) sobre a superfície da peça cujo equilíbrio ocorre quando uma força ( $F_{op}$ ), oposta, dependente do material, atua sobre a força ( $F$ ). Esta força dependente do material é composta pelas componentes de deformação plástica e elástica da indentação. Logo, o valor da dureza derivado nestas condições é baseado na indentação verdadeira da superfície da peça enquanto a carga está sendo aplicada. O valor encruado denominado de microdureza plástica e pode ser aproximado ao valor da microdureza Vickers.

O objetivo do ensaio de microindentação instrumentada é, então, perceber a variação da microdureza subsuperficial da liga de alumínio através do deslocamento contínuo do indentador pela região em estado de encruamento a qual pode ser interpretada como uma película endurecida devido ao processo de usinagem com ponta única de diamante e tem sua espessura variando de 0 a 10 micrometros.

Os gráficos abaixo mostram a relação entre microdureza ( $N / mm^2$ ) e profundidade de indentação ( $\mu m$ ) para as onze amostras. O gráfico obtido para a amostra de número 04, a qual foi tratada termicamente, é utilizado como o padrão de comparação para os gráficos obtidos das demais amostras.

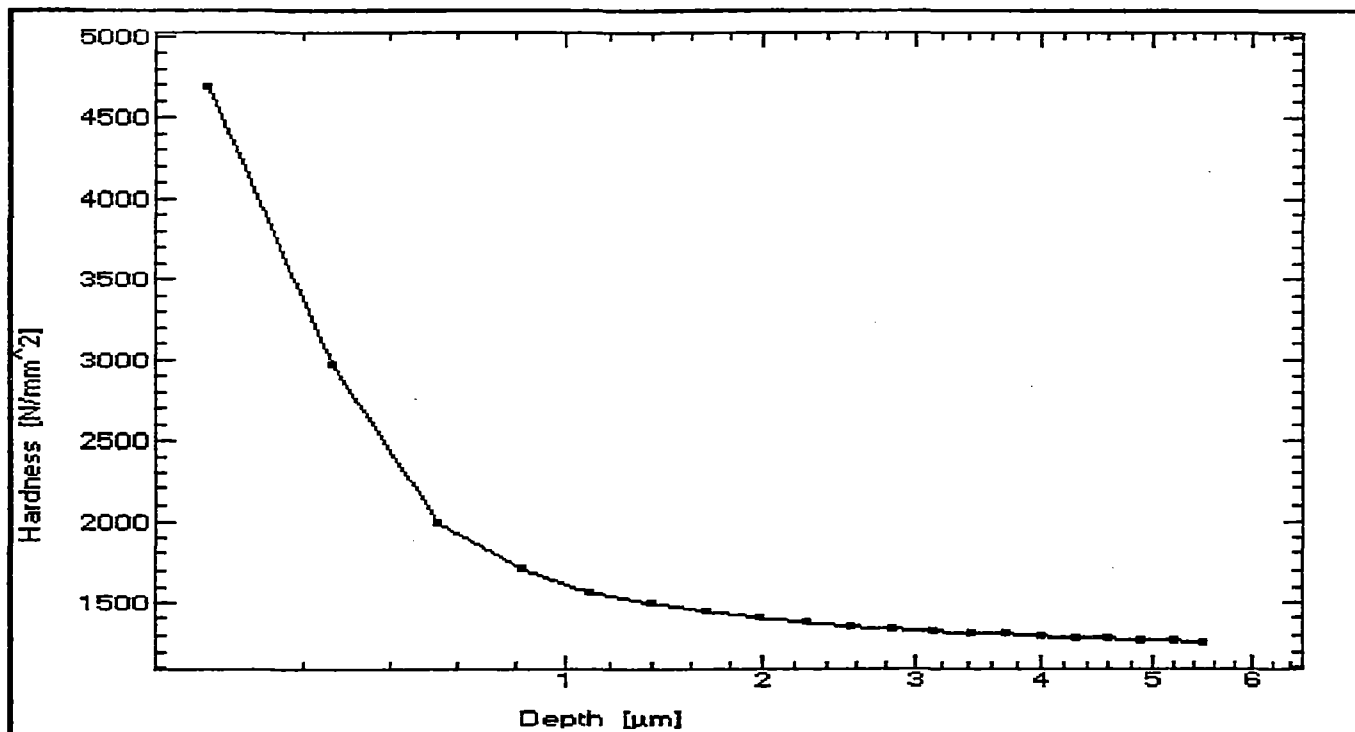


Figura 5.3 Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova número - 31

Carga utilizada para indentação - 1000 m N

Microdureza Plástica - 1445 N / mm<sup>2</sup>

Velocidade de avanço - 5 mm / min

Profundidade de corte - 10 µm

Raio de ponta da ferramenta - 1,52 mm

R<sub>t</sub> - 0,1065

R<sub>a</sub> - 0,0079

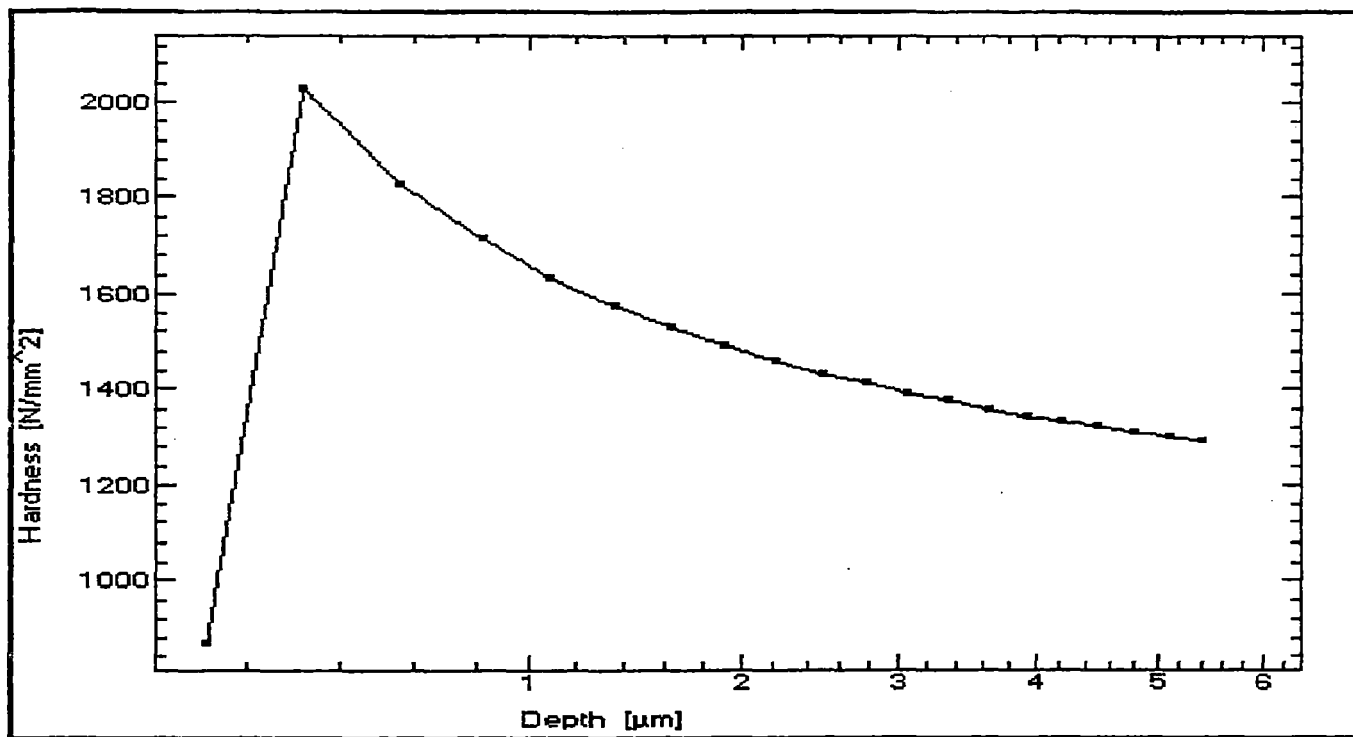


Figura 5.4 Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova número - 02

Carga utilizada para indentação - 1000 m N

Microdureza Plástica - 1510 N / mm<sup>2</sup>

Velocidade de avanço - 11 mm / min

Profundidade de corte - 10  $\mu\text{m}$

Raio de ponta da ferramenta - 1,52 mm

R<sub>t</sub> - 0,1522

R<sub>a</sub> - 0,0096



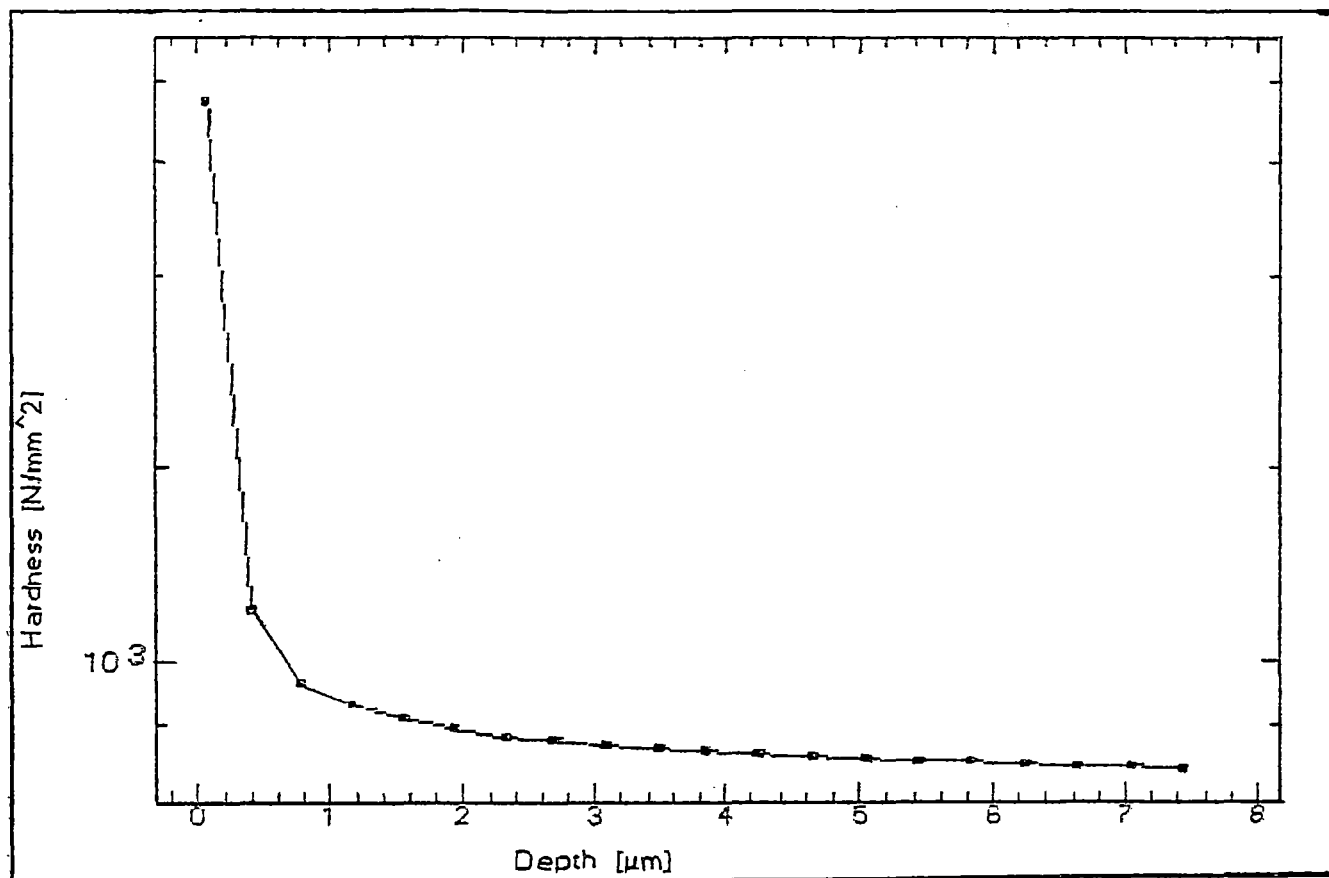


Figura 5.5 Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova número - 04

(Submetido a alívio de tensões: 2 horas à temperatura de 200 °C)

Carga utilizada para indentação - 1000 m N

Microdureza Plástica - 879 N / mm<sup>2</sup>

Velocidade de avanço - 12 mm / min

Profundidade de corte - 10 µm

Raio de ponta da ferramenta - 1,52 mm

R<sub>t</sub> - 0,1395

R<sub>a</sub> - 0,0114

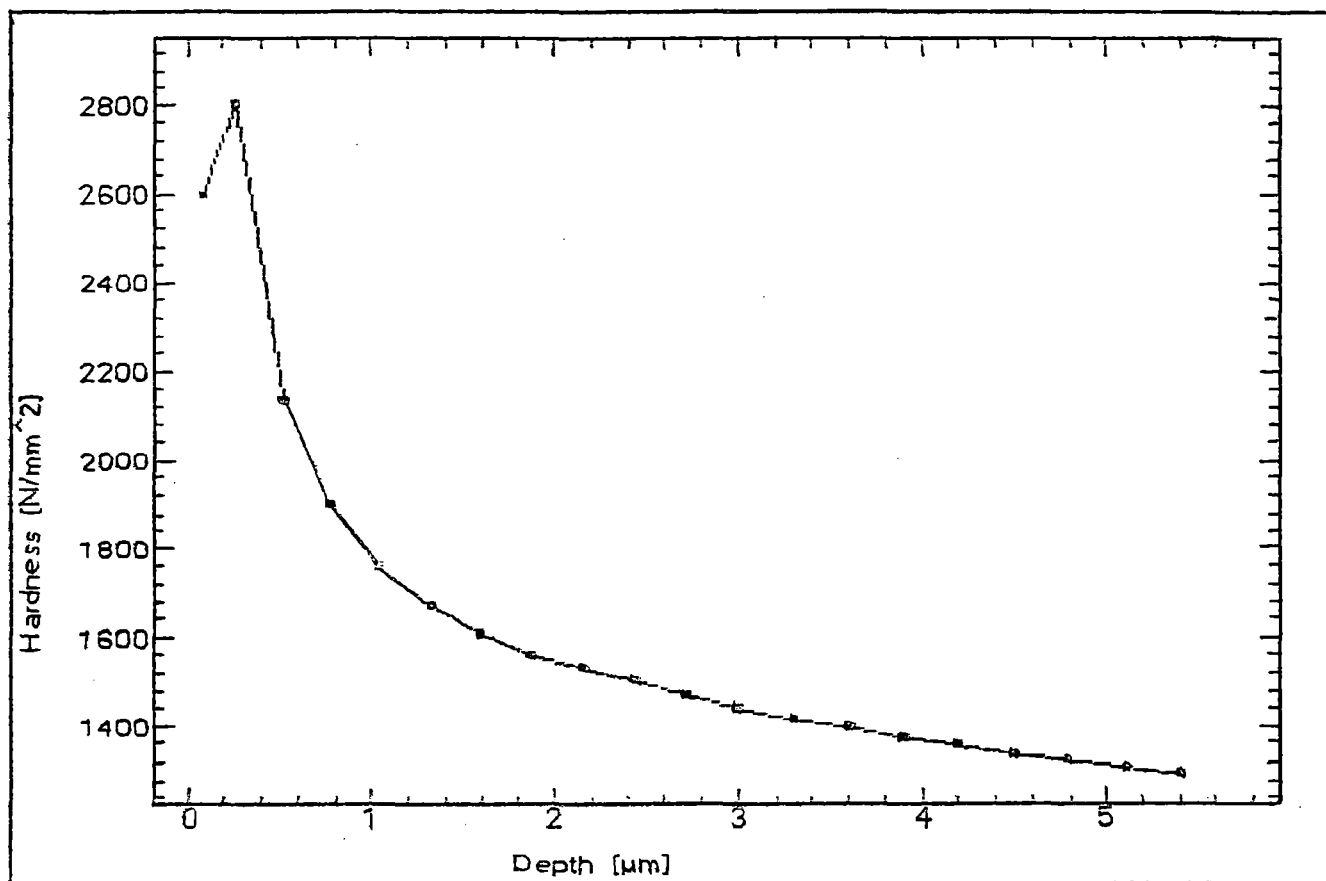


Figura 5.6 Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova número - 33

Carga utilizada para indentação - 1000 m N

Microdureza Plástica - 1510 N / mm<sup>2</sup>

Velocidade de avanço - 13 mm / min

Profundidade de corte - 3  $\mu\text{m}$

Raio de ponta da ferramenta - 1,52 mm

R<sub>t</sub> - 0,1091

R<sub>a</sub> - 0,0092

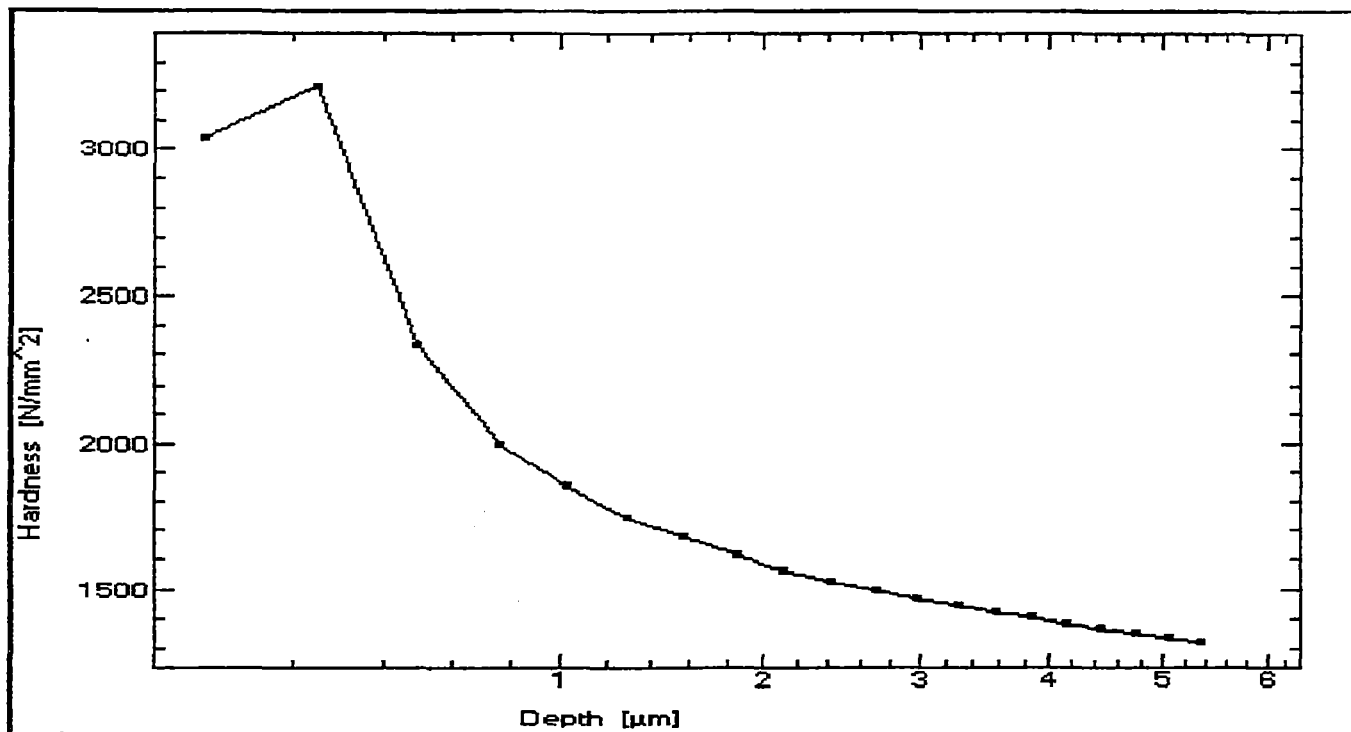


Figura 5.7 Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova número - 03

Carga utilizada para indentação - 1000 m N

Microdureza Plástica - 1537N / mm<sup>2</sup>

Velocidade de avanço - 14 mm / min

Profundidade de corte - 10  $\mu\text{m}$

Raio de ponta da ferramenta - 1,52 mm

R<sub>t</sub> - 0,1314

R<sub>a</sub> - 0,0098

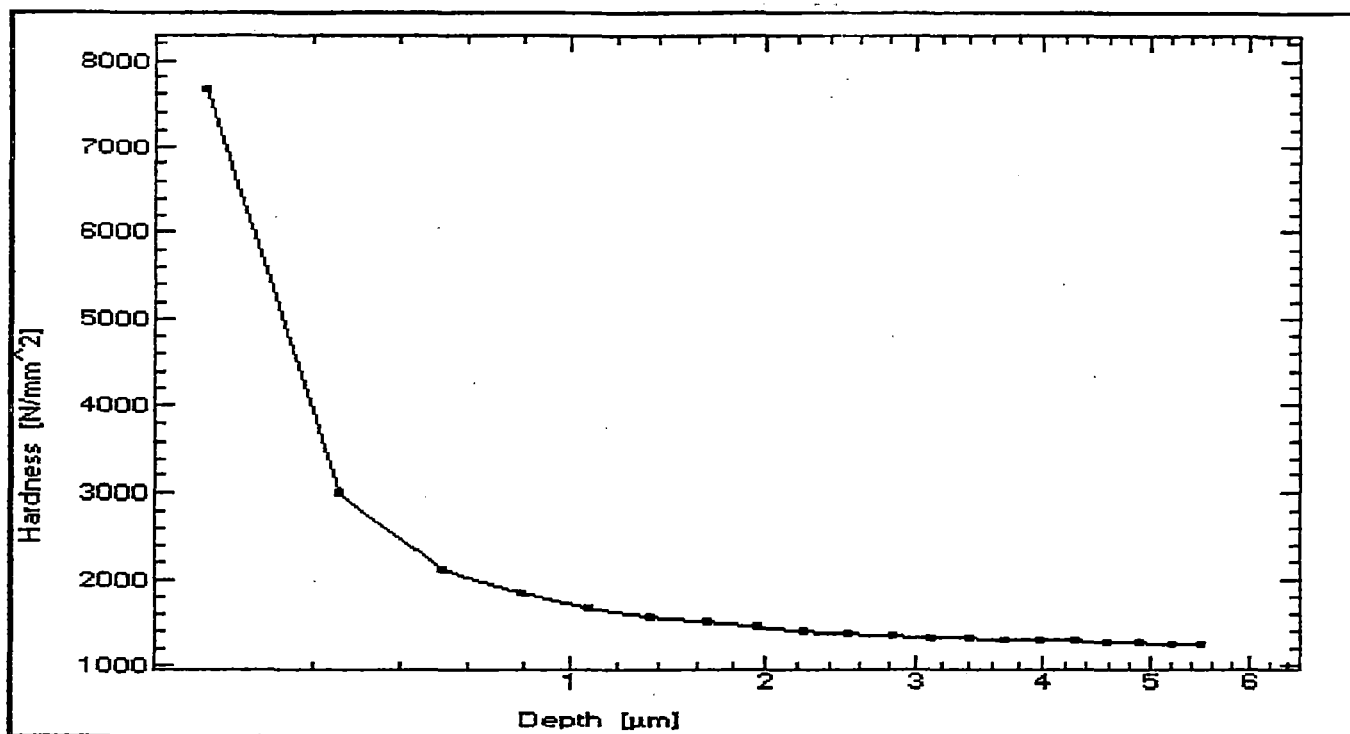


Figura 5.8 Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova número - 26

Carga utilizada para indentação - 1000 m N

Microdureza Plástica - 1459 N / mm<sup>2</sup>

Velocidade de avanço - 10 mm / min

Profundidade de corte - 10  $\mu\text{m}$

Raio de ponta da ferramenta - 0,76 mm

R<sub>t</sub> - 0,1111

R<sub>a</sub> - 0,0078

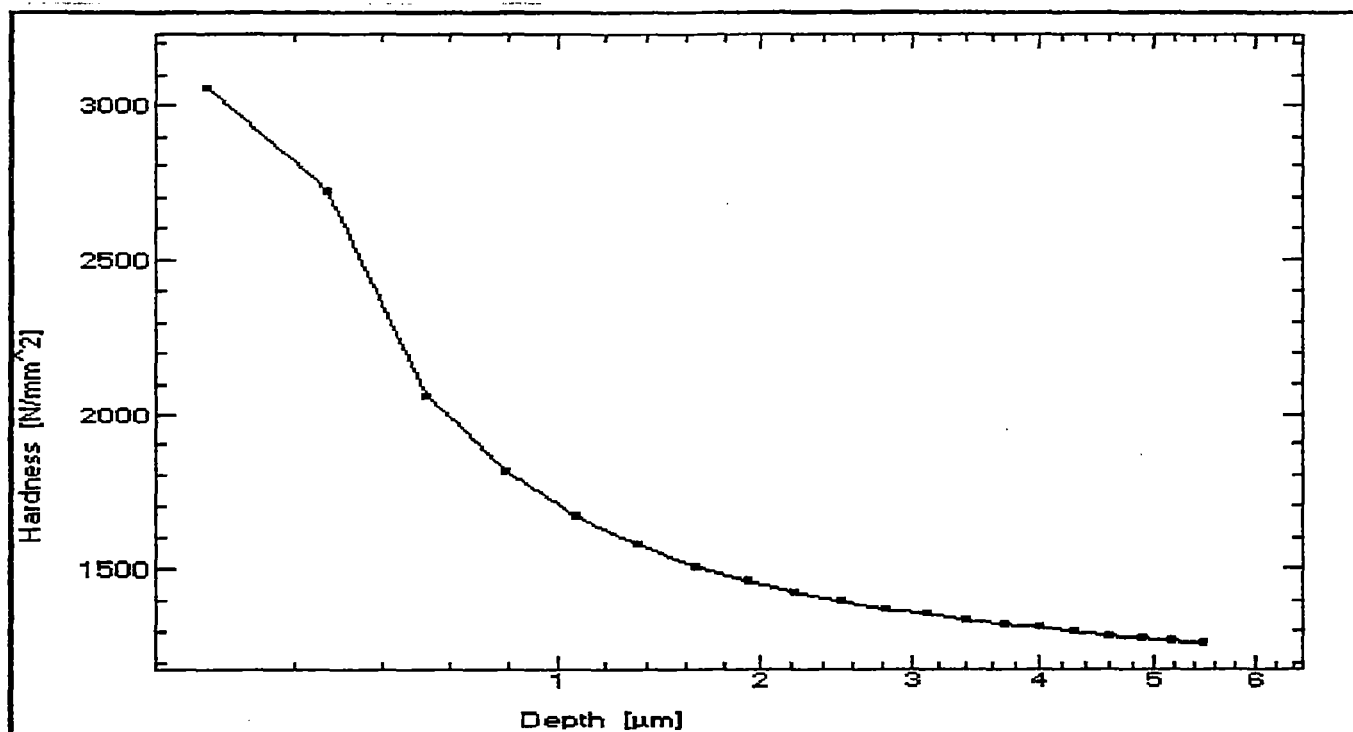


Figura 5.9 Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova número - 06

Carga utilizada para indentação - 1000 m N

Microdureza Plástica - 1451 N / mm<sup>2</sup>

Velocidade de avanço - 13 mm / min

Profundidade de corte - 10 µm

Raio de ponta da ferramenta - 0,76 mm

R<sub>t</sub> - 0,1069

R<sub>a</sub> - 0,0108

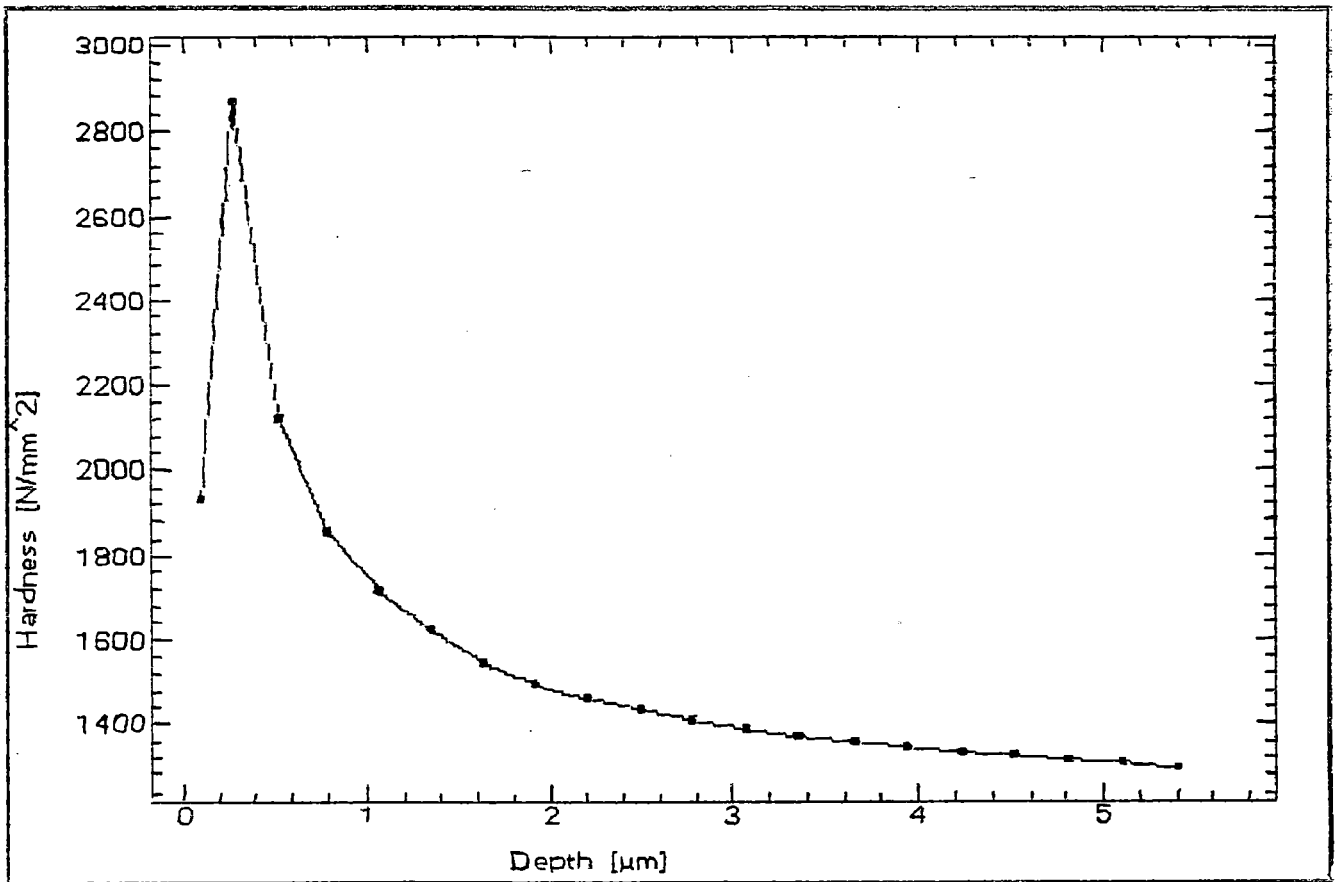


Figura 5.10 Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova número - 11

Carga utilizada para indentação - 1000 m N

Microdureza Plástica - 1484 N / mm<sup>2</sup>

Velocidade de avanço - 13 mm / min

Profundidade de corte - 3 µm

Raio de ponta da ferramenta - 0,76 mm

R<sub>t</sub> - 0,1453

R<sub>a</sub> - 0,0142

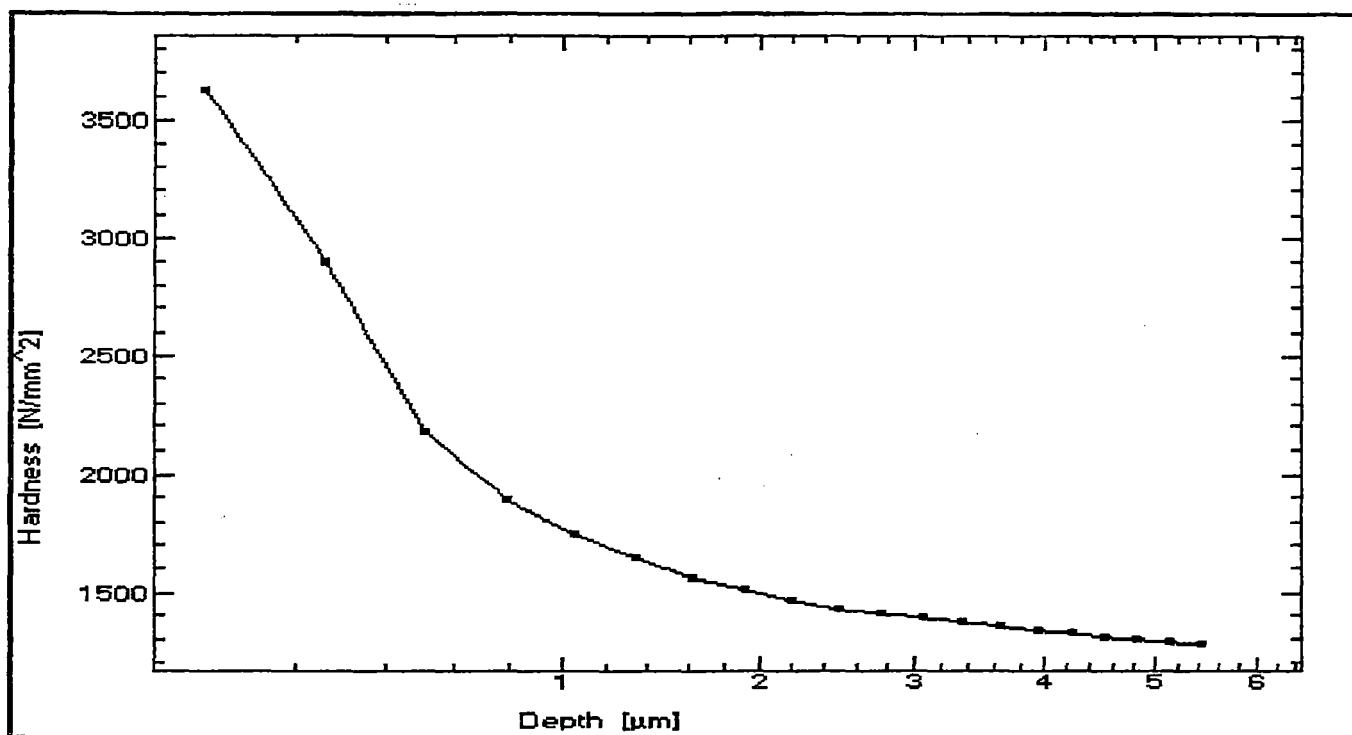


Figura 5.11 Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova número - 10

Carga utilizada para indentação - 1000 m N

Microdureza Plástica - 1469 N / mm<sup>2</sup>

Velocidade de avanço - 13 mm / min

Profundidade de corte - 5 μm

Raio de ponta da ferramenta - 0,76 mm

R<sub>t</sub> - 0,1281

R<sub>a</sub> - 0,0128

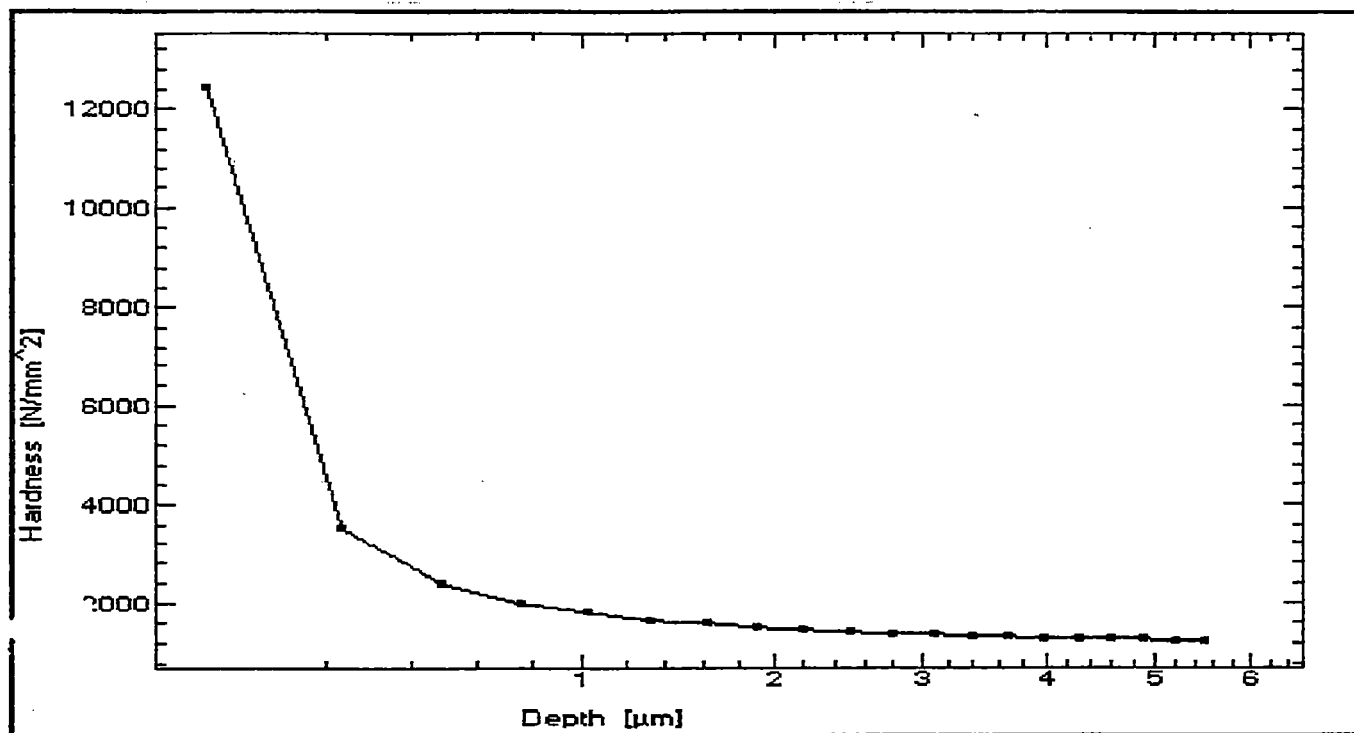


Figura 5.12 Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova número - 08

Carga utilizada para indentação - 1000 m N

Microdureza Plástica - 1471 N / mm<sup>2</sup>

Velocidade de avanço - 14 mm / min

Profundidade de corte - 10  $\mu\text{m}$

Raio de ponta da ferramenta - 0,76 mm

R<sub>t</sub> - 0,1649

R<sub>a</sub> - 0,0137



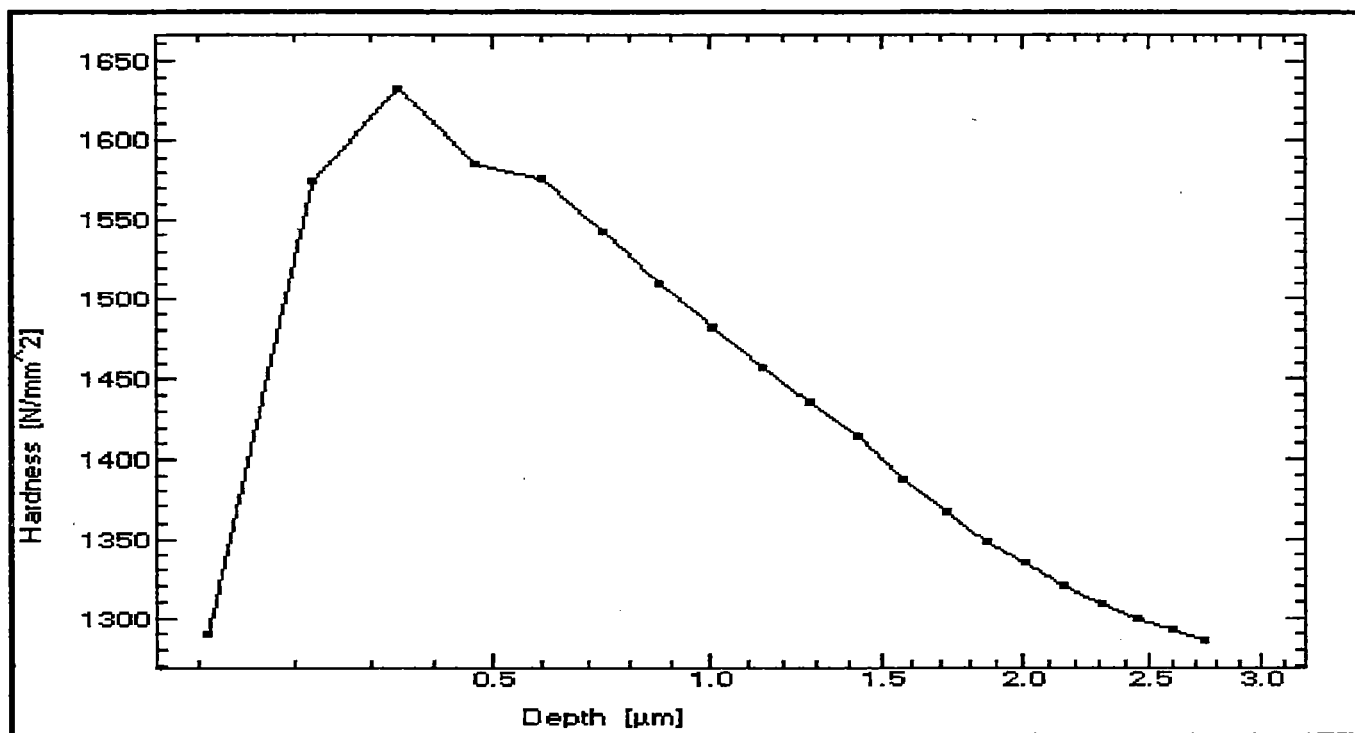


Figura 5.13 Gráfico de microdureza versus profundidade de indentação do corpo de prova número - 18

Carga utilizada para indentação - 1000 m N

Microdureza Plástica - 1421 N / mm<sup>2</sup>

Velocidade de avanço - 20 mm / min

Profundidade de corte - 10  $\mu\text{m}$

Raio de ponta da ferramenta - 0,76 mm

R<sub>t</sub> - 0,2325

R<sub>a</sub> - 0,0126

## 5.2 Análise dos resultados e conclusões

Os componentes ópticos devem manter por longo tempo a exatidão da imagem para a qual foram projetados sendo então de grande importância conhecer o nível de encruamento ou variações dos parâmetros de rede subsuperficiais, já que ao longo do tempo as características microestruturais do material podem vir a se alterar, de modo a influenciarem na qualidade das imagens produzidas pelos componentes ópticos. Do mesmo modo os componentes utilizados pelas indústrias mecânicas podem ter suas formas alteradas com o passar do tempo levando a sua inutilização. Isso torna vital o conhecimento e domínio de técnicas de medição avançadas e confiáveis para quantificar os fenômenos que ocorrem durante o corte de ultraprecisão.

A técnica utilizada, a microindentação instrumentada, mostrou-se pertinente já que atendeu ao objetivo esperado, isto é, detectar a variação da microdureza através da camada subsuperficial encruada do alumínio 6061-T6 devido ao processo de corte de ultraprecisão. Verifica-se através das curvas a tendência da camada encruada manter-se em torno dos valores apresentados por vários autores os quais variam de 0 a 10 micrometros de profundidade. As curvas apresentadas quantificam valores de dureza até 6 micrometros para a carga máxima permitida pelo microdurômetro, entretanto, fica clara a tendência a manterem-se constantes em torno do valor de dureza plástica do material da ordem de  $\pm 1000 \text{ N / mm}^2$ .

Tabela 5.7 - Microdureza versus avanço e profundidade de corte para a ferramenta com raio de ponta de 1,52 mm

Velocidade de avanço (mm / min)	profundidade de corte ( $\mu\text{m}$ )	Dureza plástica ( $\text{N / mm}^2$ )	Número da peça
5	10	1445	P31
11	10	1510	P02
13	3	1510	P33
14	10	1537	P03

Tabela 5.8 - Microdureza versus avanço e profundidade de corte para a ferramenta com raio de ponta de 1,52 mm

Velocidade de avanço (mm / min)	profundidade de corte ( $\mu\text{m}$ )	Dureza plástica ( $\text{N} / \text{mm}^2$ )	Número da peça
10	10	1459	P26
13	10	1451	P06
13	3	1484	P11
13	5	1469	P10
14	10	1471	P08
20	10	1421	P18

A tabela 5.7 mostra os valores obtidos dos ensaios de microdureza para as peças faceadas com a ferramenta de raio de ponta 1,52 mm cuja a geometria é especificada na tabela 5.4. Os dados apresentados mostram a tendência de a microdureza crescer em função do avanço da ferramenta quando é mantido fixo o valor da profundidade de corte. A peça que foi usinada com o avanço de 13 mm/min e profundidade de corte de 3  $\mu\text{m}$  teve sua microdureza semelhante à do corte com profundidade de 10  $\mu\text{m}$ , o que pode ser resultado do efeito tamanho.

Os dados referentes ao corte efetuado com a ferramenta de 0,76 mm cuja geometria também está sumariada na tabela 5.4, descrevem os valores de microdureza para duas situações: para o avanço constante e profundidade de corte variável e a outra onde o avanço é variável e a profundidade de corte constante. Quando o avanço é constante e a profundidade variável, a oscilação nos valores de microdureza pode também ser interpretada como característica do efeito tamanho. Por outro lado, quando a profundidade é constante e avanço variável verifica-se um sensível decréscimo nos valores da microdureza.

As ferramentas utilizadas para a realização dos ensaios apresentam o mesmo valor de ângulo de folga ( $\alpha$ ), diferentes raios de curvaturas, isto é, de 1,52 mm e 0,76mm e ângulo de saída ( $\gamma$ ) variando de  $0,5^\circ$  para a ferramenta com raio de curvatura de 1,52. Os valores de microdureza obtidos nos ensaios, onde utilizou-se a ferramenta com raio de curvatura de 1,52 mm, caracterizam-se por apresentar valores de microdureza sensivelmente maiores comparados aos obtidos para a ferramenta de raio de curvatura de 0,76 mm e em se tratando de ultraprecisão e ensaio de microdureza Vickers, variações desta ordem são consideradas severas. Porém, considerando as variações que ocorreram para cada ferramenta em função das variações das condições de usinagem pode-se verificar pela ordem de grandeza da microdureza, medida em cada amostra para as duas ferramentas, que as condições definidas para este ensaio pouco influenciaram a microdureza.

Verificamos então que a comparação entre amostras usinadas com diferentes condições de usinagem, mesmo que muito pequenas, e diferentes ferramentas mostraram níveis de microdurezas diferentes indicando diferentes estados de encruamento para cada ferramenta ou a detecção da variação da microdureza para as diferentes profundidades da camada encruada. Esta variação pode ser visualizada através do gráfico e do valor da microdureza da peça (P04) submetida ao alívio de tensões.

Autores como Cullity e Cohen que reconhecidamente trataram teoricamente e também executaram trabalhos práticos com o objetivo de medir e avaliar os níveis de tensões residuais em metais como por exemplo o alumínio utilizaram técnicas de raio-x para detectar variações nos parâmetros de rede então tratá-las matematicamente e quantificar os níveis de tensões residuais. Por sua vez, Brinksmeyer apresenta para pequenas profundidades de incidência a técnica de raios-x em incidência razante a qual seria capaz de quantificar os níveis de tensões residuais ou das camadas danificadas próximas à superfície. Estes autores expõem de forma clara a ligação entre a variação dos parâmetros de rede e os níveis de tensões residuais em materiais policristalinos, porém, nenhuma discussão é realizada sobre o assunto objetivamente,

relacionando os níveis de tensão residuais às camadas deformadas subsuperficiais ou a microdureza.

Pesquisadores como Polvani e Evans que discutiram e publicaram trabalhos sobre microindentação instrumentada, e.g., tratam em alguns dos seus trabalhos de pesquisa, do estudo e medição da microdureza e da microdureza instrumenta. Estes autores não fazem nenhuma ligação direta entre o estado de encruamento do material e os níveis de tensões residuais. De acordo com as observações destes autores verifica-se que as curvas de microdureza dos corpos de prova que não foram submetidos ao tratamento térmico mantêm o mesmo formato e constância quando comparadas as curvas da amostra tratada termicamente.

Os valores de avanço e profundidade de corte definidos para o ensaio com a ferramenta de raio de ponta de 1,52 mm apresentam pequena variação na microdureza. Para a ferramenta com raio de ponta de 0,76 mm o número de amostras foi maior de modo que se pôde aumentar a faixa de variações dos parâmetros tais como velocidade de avanço (variando de 1 para 13, 14 e 20 micrometros) e de profundidade de corte (variando de 3 para 5 e 10 micrometros). Dos valores obtidos do ensaio de rugosidade superficial, verifica-se que a maior variação ocorre quando há a mudança da ferramenta de corte, isto é, a ferramenta com raio de ponta de 1,52 mm produz menor variação do valor de  $R_a$  enquanto a ferramenta com raio de ponta de 0,76 mm prудuz maior [Porto. J.V.A,1995].

### **5.3 Sugestões para trabalhos futuros**

- Medição de tensões residuais com Raios-X em incidência razante das superfícies desbastadas e acabadas.**
  
- Determinação da espessura das camadas subsuperficiais danificadas com Raios-X**
  
- Relacionamento dos resultados obtidos de forma e microindentação com os obtidos através de Raios-X.**
  
- Estudar as influências da geometria da ferramenta de corte na camada deformada do material**

## 5.4 Referência bibliográficas

Abe, T.,1991. A future technology for silicon wafer processing for VLSI. *Precision Engineering*, v. 13, n .4, p.251-255.

Ashkerov, Yu. V. & Minaeyv, A.I. 1988. Standing for diamond turning of aspherical optical surfaces. *Sov. J. Opt. Technol*, v.55, n .5, p.319-321.

Barkman, W. E. 1980. Laser interferometer position feedback for precision machine tools. *Proc. J.T. Autom. Control Conf.*, S. Francisco, CA, Aug, ppWA7-E.

Boussinesq. J., “*Application des Potentiels a l’Etude de l’Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques*” (Gauthier-Villars, Paris, 1885). In S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, “*Theory of Elasticity*”, McGraw-Hill, New York, 1970, p.398-402.

Brinksmeyer, E. 1989. State-of-the-art of non-destructive measurement of subsurface material properties and damages. *Precision Engineering*, v.11, n.4, p.211-224.

Bryan et al., (1967) Trusty, Van Herck e depois McKeown (com Chapman). Spindle Accuracy, *American Machinist*, v.4, dec, p.149-164.

Cullitty, B.D.,1959. X-Ray diffraction, In Cullity, B.D., *The structure of polycrystalline aggregates*, London, Addison-Wesley P.C., Inc., cap 9, p.263-264

Dow, T. A. et al 1991. Application of a fast tool servo for diamond turning of non-rotationally symmetric surfaces. *Precision Engineering*, v.13, n.4, p.243-249

Dow, T.A. e Drescher, J.D.,1990. Tool force model development for diamond turning, *Precision Engineering*, v.12, n.1, p.29-35.

Dow, T.A. & Falter, P.J,1987. Design and performance of a small-scale diamond turning machine. *Precision Engineering*, v. 9, n.4, p.185-190.

Duduch, J. G., Some critical aspects of machine design and performance for the machining of brittle materials. Cranfield, 1993. *Ph.D. Thesis*; Cranfield Institute of Technology.

Falter, P. J & Dow, T. A. 1987. Design and performance of a small-scale diamond turning machine. *Precision Engineering*. v.9, n.4, p.185-190.

Fornaro, R. J. & Dow, T.A. 1988. A high-performance machine tool controller. *IAS Annual Meeting (IEEE Industria Applications Society)*,v.35, n.6, p1429-1439

Franje, J., 1990. Manufacturing techniques for complex shapes with submicron accuracy. *Rep. Prog. Phys.*, v. 53, p. 1049-1094.

Gee, A. E., Green, D. & Pain, D. 1988. An in-process tool proximity sensor for ultra-fine machining. *Surface Topography*, n.1, p.183-191.

Hamilton, G.M. and Goodman, L.E. 1966., *ibid* 33, 153

Hertz, H. J. 1881. *Reine Angew. Math.* v. 92 p. 156; *Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbe Fleisses*. 1882. v. 61, p.449. Reprinted, in English, in "*Hertz's Miscellaneous Paper*" (Macmillan, London, 1986) Chs. 5,6.

Hubber, M. T. 1904., *Ann. Physik.*, v.14, p.153.



- Ikawa, Naoya.; Shimada, Shoichi. and Morooka, Hideyuka. 1987. Technology of Diamond Tool for Ultraprecision Metal Cutting. *Bull, Japan Soc. of Prec. Engg.*, v. 21, n.4, p.233-238.
- König, W. ; Weck, M. ; Spennath, N. ; Luderich, J. 1991. Tutorial "Diamond machining technology", *IPT, Aachen - Germany*, p.1-38.
- Kouno, E. 1984. A fast response piezoelectric actuator for servo correcting of systematic errors in precision machining. *Annals of the CIRP*, v.33, n.1, p.369-372.
- Lawn, Brian. and Wilshaw, Rodney. 1975. Review Indentation fracture: principles and applications. *Journal of materials science*. v. 10. p. 1049-1081.
- Lucca, D.A.; Seo, Y.W. and Rhoer, R.L. 1992. Effect of the Tool-Workpiece Interface on Energy Dissipation in Ultra-Precision Machining of Aluminum. *ASPE 1992*. p.49-52.
- Johnson, K. L. 1970. *Mech. Phys. Solids*. v. 18. p.115.
- Johnson, K. L.; O'Connor, J.J. and Woodward, A.C. 1973., *ibid A334*, p.95.
- McKeown, P. 1986. High precision manufacturing and the British economy. *Proc. I Mech. E.*, London, v.200, p. 1-19.
- McKeown, P. 1987. The role of precision engineering in manufacturing of the future. *Annals of the CIRP*, v. 32, n.2, p.495-501.
- McCue, H. K. 1983. The motion control system for the large optics diamond turning machine (LODTM). *Proc. SPIE, Int. Soc. Opt. Eng.*, San Diego, CA, USA, v.433, p.68-75.

- McGeough, J.A., 1988. Advance methods of machining. In McGeough, J. A. Specialized methods of machining; Electrochemical machining; Electron beam machining, London, Chapman and Hall Ltda, cap. 10, p. 212 - 218; cap. 4, p.55-58; cap.2, p. 10 - 33
- McKeown, P.A., Carlisle, K. Shore. P. & Read, R.F.J. 1990. Ultra-precisão, high stiffness CNC grinding machines for ductile mode grinding of brittle materials *Proc. SPIE*, v.1320, p.301-313.
- McKeown, P. A., & Morgan, G. H. 1979. Epoxy granite: a structural material for precision machines. *Prec. Engg*, v.1, n.4, p.227-229.
- Metals Handbook, Desk Edition; *American Society for Metals*, 3º edição, Metals Park, Ohio 44073-edited for Boyer, Howard E. and Gall, Timothy L. 1986. p.6.1. Metals Handbook, 1989. American Society for Metals, Machining, ninth edition. 1989, v.16, p. 509
- Miyamoto, I.1987. Ultra fine finishing of diamond tools by ion beams. *Precision Engineering*, v. 9, n.2.
- Morgan. 1979. Materials for machine tool structures. *Prec. Machine Tool Desgn and Research Conf.*, Manchester.
- Moriwaki, Toshimichi.; Sugimura, Nobuhiro.; Luan Sheng. 1993. Combined Stress, Material Flow and Heat Analysis of Orthogonal Micromachining of Copper. *Annals of CIRP*, v. 42, n.1, p.75-78
- Polvani, S. Robert e Evans, J. Chis.1991. Aluminum optics, but of which alloy and what temper?. *Proceedings 6<sup>th</sup> 1991 Annual Conference*.p.93-95.
- Nagashima et al, 1990. *ITEJ Tech. Repts.*, v.14, n.64, p. 25-30

- Nakasuji et al., 1990. Diamond turning of brittle materials for optical components, *Annals of the CIRP*, v. 39, I, p.89-92.
- Patterson, S. R. and Magrab, E. B. 1985. Design and testing of a fast tool servo for machine tools. *Precision Engineering*, v.7, n.3, p.123-128.
- Porto, A. J. V., Diagnóstico do Processo de Fabricação da Operação de Torneamento de Face de Ultra - Precisão em Cobre e Ligas de Alumínio. São Carlos, 1995. 41p. 85 - 86p.131p. Tese (Livre Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
- Puttick, K.E.; Rudman, M.R.; Smith, K.; Franks, A. & Lindsey, K. 1989. Single-pointe diamont machining of glasses. *Proc. Roy. Soc. A.*, v.426, 1989, p.19-30.
- Rank Pneumo Inc. 1988. *Catálogo Técnico ASG 2500*. Precision Park, New Hampshire.
- Schinker, M. G. and Doll, W. 1987. Turning of optical glasses at room temperature. *Proc. SPIE*, v.802, n.2, p.95-103.
- Siddal, G. J. and Baldwin R. R. 1984. Developments in laser interferometry for precision sensing. *Precision Engineering*, v.6, n.4, p.175-180.
- Shimada, Shaichi; Ikawa, Naoya., 1994. Structure of Micromachined Surface simulated by molecular dynamics analysis, *Annals of the CIRP*, v. 43, n.1, p.51-54.
- Slocum, Alexander . H,1992. Precision mavinging design, In Slocum, Alexander H, System design considerations, New Jersey, Prentice-Hall, Inc, 1992, cap7, p.321 - 326.

- Smith, S.T., 1990. Machining of silicon using high-speed miniature diamond cutters. *J. Phys. D.; Appl. Phys.*, v. 23, p.607-616.
- Spur, G., Simpfendorfer, D., Sabotka, I., 1988. Form Accuracy and Surface Integrity in Plane Lapping. Proceedings of the International Congress for Ultraprecision Technology in Aachen / FRG.UPT May'88. p. 78 - 94.
- Tabor, D. 1970. *Rev. Phys. Tech.* v.1, p. 145.
- Taniguchi, Norio. 1993. The state of the art of nanotechnology for processing of ultraprecision and ultrafine products. *Precision Engineering*. v. 16, n.1, p.5-24.
- Tanimura, Y. 1983. A new differential laser interferometer with a multiplied optical path difference. *Annals of the CIRP*, v. 32, n.1, p.449-452.
- Tonshoff, H. K.; Schmieden, W. V.; Inasaki, I.; Konig, W. and Spur, G. 1990. Abrasive machining of silicon. *Annals of the CIRP*, v.39, n.2, p.621-635.
- Tsuwa, H. 1979. A personal view of ultra-precision machining in Japan. *Precision Engineerin*, v.1, n.1, p.39-43.
- Une, A et al ,1982. Flatness control lapping/polishing machine. *Precision Engineering*, v.4, n.2, p.93-100
- Watanabe, J & Suzuki, J. 1981. High precision polishing of semiconductor materials using hidrodynamic principle. *Annals of he CIRP*, v.30, n.1, p.91-95.
- Weck, Manfred.1937. Handbook of machine tools, In Weck, Manfred, Machines and equipment for erosion machining, London, Wiley Heyden, 1984, v.1 , cap.6, p.56-75.

Wills-Moren, W.J. 1986. The design of structure for high precision machines. *Short Course Notes*, Cranfield Institute of Tecnology.

Wills-Moren, W.J., Modjarrad, H. and Read, R.F.J. 1982. Some spectrs of the design and development of a large high precision diamnd turning machine. *Annals of the CIRP*, v.31, n.1, 1982, p.409-414.

Yoneda, Y. and Horiuchi, T. 1971. Optical flats for use in X-ray spectrochemical microanalysis, *Rev. Sci. Instr.*, v..42, p.1069.