

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

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA EMISSÃO ACÚSTICA  
DURANTE O TORNEAMENTO DE ULTRAPRECISÃO DE  
MATERIAIS FRÁGEIS**

**HELDER AUGUSTUS TREVISO DA SILVA**  
Engenheiro Mecânico



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

Orientador: Prof. Dr. **Jaime Gilberto Duduch.**

São Carlos  
- 1999 -



Class.	TESE - EEX
Cutt.	5377
Tombo	173/99

11150006118

S/S 1063996

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

S586a Silva, Helder Augustus Treviso da  
Análise do comportamento da emissão acústica durante o torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis / Helder Augustus Treviso da Silva. -- São Carlos, 1999.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.  
Área: Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch.

1. Usinagem de ultraprecisão. 2. Torneamento com diamante. 3. Emissão acústica. 4. Materiais frágeis. 5. Monitoramento. I. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **HELDER AUGUSTUS TREVISO DA SILVA**

Dissertação defendida e aprovada em 22.09.1999  
pela Comissão Julgadora:



---

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



---

Doutor **RENATO GOULART JASINEVICIUS**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



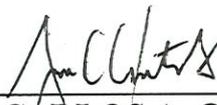
---

Prof. Doutor **ANSELMO EDUARDO DINIZ**  
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)



---

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



---

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

*Aos meus pais, Ignácio e Gê,  
pelo amor, dedicação e presença  
em todos momentos de minha vida.  
Expresso aqui um pouco de minha gratidão.*

## *AGRADECIMENTOS*

Agradeço a Deus por mais este privilégio.

Ao Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch pela orientação, confiança e amizade.

Ao Dr. Renato Goulart Jasinevicius pelas sugestões, discussões e extensa colaboração, com horas de trabalho despendidas.

Ao Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho e Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira pela ajuda na montagem do aparato experimental, pelo empréstimo do sensor e pelas sugestões.

Aos amigos e companheiros do grupo de Engenharia de Precisão Luciana, Juan Carlos, Pagotto e Rogério pelo ótimo ambiente de trabalho proporcionado, além da paciência e ajuda na confecção deste trabalho.

Aos amigos de sempre pelas boas risadas nos momentos fáceis e apoio nos difíceis.

Às secretárias da pós-graduação Ana Paula e Beth, pela ajuda e paciência demonstrada. Em especial à Beth, pelo apoio na minha chegada a São Carlos.

Ao Deivid Luiz da Silva pela ajuda na confecção dos desenhos.

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

À CAPES, pelo apoio financeiro.

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

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	viii
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1- Introdução.....	1
Justificativa.....	1
Objetivos do trabalho.....	4
2- Usinagem de Ultraprecisão e Emissão Acústica – Revisão.....	6
2.1- Usinagem de Ultraprecisão.....	6
2.1.1- Introdução e Aspectos Gerais.....	6
2.1.2- A Ferramenta de Diamante.....	11
2.1.3- Torneamento de Materiais Frágeis.....	13
2.1.4- Indentação e Riscamento.....	20
2.1.5- Modelos de Corte.....	24
2.1.5.1- Modelo de BLAKE (1988).....	24
2.1.5.2- Modelo de BLACKLEY (1991).....	30
2.2- Emissão Acústica (EA).....	32
2.2.1- Conceitos e Histórico.....	32
2.2.2- Mecanismo de Geração de Emissão Acústica.....	33
2.2.3- Sinal de Emissão Acústica: Conceitos e Métodos de Processamento.....	36

2.3- Monitoramento do Processo de Usinagem de Ultraprecisão através de Emissão Acústica.....	40
2.3.1- Sistemas de Monitoramento.....	40
2.3.2- Emissão Acústica no Monitoramento da Usinagem.....	43
2.3.3- Monitoramento da Usinagem de Ultraprecisão através de Emissão Acústica.....	46
2.4- Considerações Finais.....	59
3- Metodologia Experimental.....	62
3.1- Planejamento de Experimentos.....	62
3.2- Características e Preparação da Amostra de Silício.....	65
3.3- O Torno ASG2500.....	67
3.4- A Ferramenta de Diamante: características geométricas.....	69
3.5- O Sistema de Aquisição e o Sensor de Emissão Acústica BM-12.....	70
3.6- Análise do Acabamento e Integridade Superficial: Form Talysurf e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	73
4- Resultados e Discussões.....	76
4.1- Análise do Comportamento do Sinal de EA nos Modos de Remoção Atuantes no Torneamento de Ultraprecisão de Materiais Frágeis.....	76
4.2- Análise da Influência do Desgaste da Ferramenta de Diamante Monocristalinos no Sinal de EA.....	97
5- Conclusões	
5.1- Conclusões.....	100
5.2- Sugestões para Trabalhos Futuros.....	102
6- Bibliografia	
6.1- Bibliografia Citada.....	103
6.2- Bibliografia Consultada.....	115

**LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 2.1- Comparação entre os processos de usinagem de ultraprecisão (STOWERS, 1988).....	10
FIGURA 2.2- Ferramenta de diamante monocristalino.....	11
FIGURA 2.3- Tipos de desgaste em uma ferramenta de diamante dúctil (ZANOTTO & MIGLIORE JR, 1991).....	12
FIGURA 2.4- Curva tensão-deformação de um material frágil e um dúctil (ZANOTTO & MIGLIORE JR, 1991).....	14
FIGURA 2.5 – Vista bidimensional do corte ortogonal, mostrando as trincas remanescentes de cortes anteriores.....	17
FIGURA 2.6 – Modos de remoção frágil e dúctil em uma amostra de silício monocristalino (JASINEVICIUS, 1998).....	19
FIGURA 2.7 – Mecanismo de remoção pobre – “ploughing” (JASINEVICIUS, 1998).....	19
FIGURA 2.8- Esquema de iniciação e propagação de trincas durante o carregamento (a, b, c) e descarregamento (d, e, f) em um teste de indentação (CHAO, 1991).....	21
FIGURA 2.9- Tipos de trincas que podem surgir durante a usinagem de materiais frágeis.....	22
FIGURA 2.10 – Efeito da carga aplicada na indentação em silício monocristalino (LEUNG, LEE & LU, 1998).....	22
FIGURA 2.11 – Riscamento em silício monocristalino (CHAO, 1991).....	23
FIGURA 2.12- Geometria de corte ortogonal da usinagem.....	25
FIGURA 2.13- Geometria de corte para o torneamento de ultraprecisão. A combinação dos movimentos de corte e avanço produzem a seção transversal do cavaco projetada sobre o ombro não-cortado (BLAKE & SCATTERGOOD, 1990).....	26
FIGURA 2.14- Geometria de corte vista num plano normal à direção de corte, mostrando a espessura crítica variável do cavaco (BLAKE & SCATTERGOOD, 1990).....	27

FIGURA 2.15- Vista da seção transversal do cavaco em escala real, mostrando a variação de $t_{ef}$ em função de $\theta$ ao longo da ferramenta (BLAKE & SCATTERGOOD, 1990).....	27
FIGURA 2.16- Modelo para usinagem dúctil. Para $t_{ef} > t_c$ , a zona de danos se forma ao longo da ponta da ferramenta. O corte dúctil sem fratura ocorre somente ao longo da porção abaixo da seção transversal do cavaco, onde $t_{ef} < t_c$ . A profundidade da zona danificada é denotada por $y_c$ (BLAKE & SCATTERGOOD, 1990).....	28
FIGURA 2.17- Modelo de corte de BLACKLEY (1991) mostrando um novo parâmetro, o de profundidade de danos subsuperficiais $y_c$ (BLACKLEY & SCATTERGOOD, 1991).....	31
FIGURA 2.18 – Principais fontes de geração de EA.....	34
FIGURA 2.19 – Tipos de sinais de EA.....	35
FIGURA 2.20 – Efeitos dos múltiplos trajetos percorridos por um sinal de EA. a) Onda inicial; b) Diferentes trajetos para se alcançar o sensor; c) A forma da onda no sensor (BEATTIE, 1983).....	37
FIGURA 2.21- Tipos de sensores existentes em um ambiente de manufatura.....	41
FIGURA 2.22- Sensores mais usados em um ambiente de manufatura (BYRNE et al, 1995).....	43
FIGURA 2.23- Diferença de sinal de $EA_{RMS}$ entre a usinagem de ultraprecisão e a convencional (LIU, 1991).....	48
FIGURA 2.24 - As áreas de interesse na geração de EA e a simplificação do processo da zona terciária em um processo de laminação (“rolling”) (LIU, 1991).....	48
FIGURA 2.25 – Ilustração da usinagem de ultraprecisão quando a profundidade de usinagem é menor ou do mesmo tamanho que o raio da aresta de corte. .....	49
FIGURA 2.26- Sinal de EA durante o torneamento de ultraprecisão, com o aumento da profundidade de usinagem (LIU, 1991).....	50
FIGURA 2.27- Influência dos parâmetros de corte no sinal $EA_{RMS}$ (GAO & FRIEDRICH, 1994).....	53
FIGURA 2.28 – Parâmetros de referência para o monitoramento do processo de usinagem de cerâmicas (AKBARI et al, 1994).....	57

FIGURA 2.29 – Variação da EA em relação à variação da intensidade de carga (SANCHEZ, 1997).....	58
FIGURA 3.1 – O torno ASG2500 e o sistema de aquisição.....	64
FIGURA 3.2 – Detalhe da fixação do sensor de EA fixado sobre o porta-ferramentas. .....	64
FIGURA 3.3 – Medição da Rugosidade Superficial através do perfilômetro Form Talysurf.....	66
FIGURA 3.4 – As amostras de silício usinadas.....	67
FIGURA 3.5 – A amostra de silício fixada. A fixação no eixo-árvore se dá através de vácuo.....	68
FIGURA 3.6 – Detalhe do aparato experimental, onde pode ser visto o torno ASG2500, o CNC BRADLEY 8200 e o sistema de aquisição de sinais, constituído do LapTop PENTIUM 100Khz e da unidade de monitoramento SENSIS BM12.....	71
FIGURA 3.7 – Unidade de monitoramento SENSIS BM12.....	72
FIGURA 3.8 – Medição da rugosidade através do Talysurf.....	74
FIGURA 4.1 – Nível de $EA_{RMS}$ em um corte em vazio.....	77
FIGURA 4.2 – Nível de $EA_{RMS}$ obtido com $f=1\mu\text{m/rev}$ e $a_p=1\mu\text{m}$ .....	77
FIGURA 4.3 – Nível de $EA_{RMS}$ obtido com $f=2,5\mu\text{m/rev}$ e $a_p=1\mu\text{m}$ .....	78
FIGURA 4.4 – MEV da superfície obtida com $f=1\mu\text{m/rev}$ e $a_p=1\mu\text{m}$ . A parte de cima mostra a região do ombro não cortado e a de baixo a superfície gerada (a mesma situação se repetirá nas próximas fotos).....	80
FIGURA 4.5 – MEV da superfície obtida com $f=2,5\mu\text{m/rev}$ e $a_p=1\mu\text{m}$ .....	80
FIGURA 4.6 – Nível de $EA_{RMS}$ obtido com $f=3\mu\text{m/rev}$ e $a_p=1\mu\text{m}$ .....	81
FIGURA 4.7 – MEV da superfície obtida com $f=3\mu\text{m/rev}$ e $a_p=1\mu\text{m}$ .....	82
FIGURA 4.8 – Nível de $EA_{RMS}$ obtido com $f=3\mu\text{m/rev}$ e $a_p=5\mu\text{m}$ .....	83
FIGURA 4.9 – Nível de $EA_{RMS}$ obtido com $f=1\mu\text{m/rev}$ e $a_p=5\mu\text{m}$ .....	83
FIGURA 4.10 – Nível de $EA_{RMS}$ obtido com $f=2,5\mu\text{m/rev}$ e $a_p=5\mu\text{m}$ .....	84
FIGURA 4.11 – MEV da superfície obtida com $f=1\mu\text{m/rev}$ e $a_p=5\mu\text{m}$ .....	84

FIGURA 4.12 – MEV da superfície obtida com $f=2,5\mu\text{m/rev}$ e $a_p=5\mu\text{m}$ .....	85
FIGURA 4.13 – Nível de $EA_{\text{RMS}}$ obtido com $f=1\mu\text{m/rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$ .....	87
FIGURA 4.14 – Nível de $EA_{\text{RMS}}$ obtido com $f=2,5\mu\text{m/rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$ .....	87
FIGURA 4.15 – MEV da superfície obtida com $f=1\mu\text{m/rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$ .....	88
FIGURA 4.16 – MEV da superfície obtida com $f=2,5\mu\text{m/rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$ .....	88
FIGURA 4.17 – Nível de $EA_{\text{RMS}}$ obtido com $f=3\mu\text{m/rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$ .....	89
FIGURA 4.18 – MEV da superfície obtida com $f=3\mu\text{m/rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$ .....	89
FIGURA 4.19 – Nível de $EA_{\text{RMS}}$ em um corte em vazio com nova calibração.....	90
FIGURA 4.20 – Nível de $EA_{\text{RMS}}$ obtido com $f=1\mu\text{m/rev}$ e $a_p=1\mu\text{m}$ para a nova calibração.....	91
FIGURA 4.21 – Nível de $EA_{\text{RMS}}$ obtido com $f=1\mu\text{m/rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$ para a nova calibração.....	91
FIGURA 4.22 – Nível de $EA_{\text{RMS}}$ obtido com $f=2,5\mu\text{m/rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$ para a nova calibração.....	92
FIGURA 4.23 – Nível de $EA_{\text{RMS}}$ obtido com $f=7,5\mu\text{m/rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$ para a nova calibração.....	92
FIGURA 4.24 – MEV da superfície obtida com $f=7,5\mu\text{m/rev}$ e $a_p=10\mu\text{m}$ .....	93
FIGURA 4.25 – Variação do nível de $EA_{\text{RMS}}$ com a rugosidade superficial $R_a$ .....	95
FIGURA 4.26 – Variação do nível de $EA_{\text{RMS}}$ com o avanço por revolução.....	95
FIGURA 4.27 – Variação do nível de $EA_{\text{RMS}}$ com a profundidade de usinagem.....	96
FIGURA 4.28 – Detalhe da ponta da ferramenta de diamante monocristalino.....	97
FIGURA 4.29 – MEV da ferramenta de diamante, mostrando a face de saída, a de folga e o estado de afiação da aresta de corte antes dos ensaios....	98
FIGURA 4.30 – MEV da ferramenta de diamante após os ensaios, mostrando o desgaste da aresta de corte.....	98

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Tolerâncias de componentes para uma gama de produtos produzidos por processos de usinagem.....	09
TABELA 2.2 – Materiais utilizados na usinagem de ultraprecisão.....	13
TABELA 3.1 – Parâmetros de corte utilizados.....	63
TABELA 3.2 – Propriedades do silício monocristalino (JASINEVICIUS, 1998; SPEAR, 1984).....	65
TABELA 3.3 – Características geométricas da ferramenta de diamante CO30MG .....	69
TABELA 4.1 – Variação da rugosidade superficial Ra e da $EA_{RMS}$ com a variação dos parâmetros de corte.....	94

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- EA – emissão acústica
- $E_{RMS}$  – raiz média quadrática do sinal de emissão acústica
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
- CNC – controle numérico computadorizado
- RMS – “root mean square” – raiz média quadrática
- A – área de corte normal à velocidade de corte
- RC – constante de tempo
- $a_p$  – profundidade de usinagem
- C – capacitância
- dB - decibéis
- E – módulo de elasticidade
- f – avanço por revolução
- $f_{máx}$  – avanço por revolução máximo
- H – dureza Vickers
- Kc – tenacidade à fratura
- Pc – carga crítica em um indentador
- R – resistência
- Ra – rugosidade média superficial
- $r_p$  – raio de ponta da ferramenta
- t – tempo
- $t_c$  – profundidade crítica em indentação
- $h_D$  – espessura nominal de corte
- $h_c$  – espessura crítica de corte
- w – largura do cavaco
- U – velocidade
- V – volts
- $y_c$  – profundidade de danos subsuperficiais
- z – linha de transição de danos
- $\alpha$  - ângulo de saída

$\beta$  - ângulo de atrito

$\beta$ -Sn – fase beta-estanho

$\tau$  - variável de controle para o tempo

$\tau_s$  – tensão de cisalhamento

$\phi$  - ângulo de cisalhamento

## RESUMO

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

O grande interesse que a usinagem de ultraprecisão vem despertando na indústria óptica e eletrônica, tem impulsionado pesquisas na área de torneamento de materiais frágeis. Estes materiais se caracterizam por sofrer fratura frágil para a maioria das condições de corte. Entretanto, respeitadas certas condições críticas de profundidade e/ou espessura de corte, é possível usinar este tipo de material de tal forma a obter superfícies livres de trincas. Isto requer o uso e o aperfeiçoamento de técnicas de monitoramento. Uma das mais promissoras técnicas de monitoramento de processos de usinagem está baseada na análise do sinal de emissão acústica (EA). A geração deste sinal é intrínseca ao processo de deformação (corte, trinca, quebra ou atrito) dos materiais. Por isso, espera-se que a correlação entre as características da zona de deformação e a energia de emissão acústica sejam próximas. O presente trabalho objetiva a investigação do monitoramento do torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis, através de sensores de emissão acústica. Foram usinadas amostras de silício monocristalino, onde o sinal de emissão acústica emitido durante o processo foi correlacionado com o acabamento e integridade superficial da peça, obtidos através de perfilometria mecânica e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Três situações distintas de remoção de material foram investigadas: totalmente dúctil, dúctil-frágil e totalmente frágil. Também foi investigado o comportamento do sinal de emissão acústica em relação à variação dos seguintes parâmetros: avanço e profundidade de usinagem. Assim, acredita-se que o trabalho nos dará uma perspectiva sobre a viabilidade do monitoramento da usinagem de materiais frágeis

Palavras-chave: usinagem de ultraprecisão, torneamento com diamante, emissão acústica, materiais frágeis, monitoramento

**ABSTRACT**

SILVA, H.A.T. (1999). *Analysis of the behaviour of acoustic emission during the diamond turning of brittle materials*. 115p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The increasing interest that ultraprecision machining has roused in the optical and electronic industries has prompted researches in diamond turning of brittle materials. These materials characteristically undergo brittle fracture for most of cutting conditions. However, under certain critical conditions of depth and/or thickness of cut, it is possible to machine this type of material so as to obtain a crack free surface. This requires the use and improvement of monitoring techniques. One of the most promising techniques for machining processes monitoring is based upon the analysis of the acoustic emission (AE) signal. The generation of this signal is inherent to the deformation process (cut, cracking, breakage or friction) of materials. For this reason, it is expected that the correlation between the characteristics of the deformation zone and the acoustic emission energy be reasonably close. The objective of the present work is to investigate the monitoring of the ultraprecision machining of brittle materials through acoustic emission sensors. Single crystal silicon samples are machined and the acoustic emission signal during the process is correlated with the surface finish and integrity. Three different material removal situations are investigated: whole ductile, ductile-brittle, whole brittle. The behaviour of the acoustic emission signal in respect of the variation of feedrate and depth of cut is also investigated. It is anticipated that this work will shed a little light on the monitoring of the machining of brittle materials.

Keywords: ultraprecision machining, diamond turning, acoustic emission, brittle materials, monitoring.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1- Introdução e Justificativa

A usinagem de ultraprecisão é uma tecnologia para a produção de peças ópticas, eletrônicas e mecânicas com nível de precisão submicrométrico e, em alguns casos, nanométrico, que inclui a usinagem química, transferência de energia, retificação e torneamento com ferramentas de diamante monocristalino.

O torneamento com ferramenta de ponta única de diamante foi inicialmente desenvolvido para a produção de componentes ópticos fabricados a partir de materiais dúcteis, como alumínio e cobre. Porém, o grande interesse que a usinagem de ultraprecisão vem despertando na indústria óptica e eletrônica, tem impulsionado as pesquisas na área de usinagem de materiais frágeis (BLACKLEY & SCATTERGOOD, 1994; BLAKE & SCATTERGOOD, 1990).

Estes materiais caracterizam-se por sofrerem pouca ou nenhuma deformação plástica e por apresentarem baixa tenacidade. Entre os mais comumente usados na indústria, estão o silício, germânio, vidros ópticos, safira, arseneto de gálio e cerâmicas finas. Têm como propriedade intrínseca dureza elevada e, conseqüentemente, alta fragilidade.

Apesar de possuírem características teoricamente adversas ao uso do processo de torneamento, materiais frágeis podem ser torneados no regime dúctil, desde que respeitados alguns requisitos básicos de profundidade e/ou espessura de corte.

Para que ocorra este chamado regime “dúctil” de remoção, é necessário que a espessura de corte seja suficientemente pequena, dita no nível submicrométrico. Segundo SHIMADA et al (1995), respeitadas estas premissas, qualquer material, independentemente de sua dureza, pode ser usinado no modo dúctil.

A grande vantagem do torneamento de ultraprecisão sobre os métodos tradicionais de processamento de materiais frágeis, como lapidação, polimento e ataque químico, é que estes processos gastam um tempo elevado para produzirem determinado componente, são de difícil automação e podem introduzir erros de forma, tendo como consequência a diminuição da exatidão de forma da superfície. Estes erros são mínimos, senão inexistentes, em uma máquina-ferramenta de ultraprecisão.

Logo, a procura por processos de manufatura que se adequem às características particulares dos materiais frágeis tem feito com que o entendimento dos mecanismos envolvidos na interface ferramenta/material seja objeto de muitas pesquisas, pois o aperfeiçoamento da tecnologia de usinagem de ultraprecisão é prioritária para se atingir a produção econômica desses produtos.

Esta crescente busca por qualidade e produtividade industrial, que capacitam as empresas quanto à competitividade no mercado mundial, tem despertado grande interesse em pesquisadores do mundo todo no monitoramento do processo de usinagem.

Uma das mais promissoras técnicas de monitoramento de processos de usinagem está baseada na análise do sinal de emissão acústica (EA). A geração deste sinal é intrínseca ao processo de deformação (corte, trinca, quebra ou atrito) dos materiais (DORNFELD, 1994).

Devido a estas características, o sinal de emissão acústica possui diversas aplicações na indústria, como o monitoramento da usinagem, forjamento e soldagem de materiais, onde a deformação plástica, fratura, atrito e transformação de fase dominam o processo. Aliadas à importância da emissão acústica na manufatura, estão as diversas aplicações atuais da usinagem de materiais frágeis, o que justifica o crescente interesse pelo estudo destas duas áreas. Todos estes aspectos fazem do sensoramento de emissão acústica uma possível técnica para o monitoramento do processo de usinagem de ultraprecisão de materiais frágeis.

Alguns pesquisadores estudaram a viabilidade do uso da emissão acústica no monitoramento do processo de torneamento com diamante (CHOI & CHOI, 1997; GAO & FRIEDRICH, 1994; KLAIBER et al, 1990; LIU, 1991; LIU & DORNFELD, 1996). Entretanto, todos os ensaios foram realizados com materiais dúcteis, mais especificamente o alumínio. Os resultados obtidos são bastante encorajadores, demonstrando que o uso da emissão acústica tem um futuro promissor no monitoramento da usinagem de ultraprecisão. Em materiais frágeis, foi utilizada para processos quasi-estáticos e dinâmicos como indentação (AKBARI et al, 1994; BERGNER, 1996; TANIKELLA & SCATTERGOOD, 1995) e riscamento (AKBARI et al, 1993; COELHO et al, 1996; MOON, LEE & DORNFELD, 1999; SANCHEZ, 1997). Entretanto, poucos trabalhos referenciam esta técnica aplicada à processos com remoção deste tipo de material. Pode-se citar a retificação (AKBARI et al, 1995; BIFANO & YI, 1992). Porém, não foi encontrado nenhum trabalho no qual foi feito o monitoramento do torneamento com diamante de materiais frágeis, através da emissão acústica. A necessidade de se obterem dados sobre estas duas técnicas relativamente novas, é o maior incentivo deste trabalho.

## 1.2- Objetivos do trabalho

O presente trabalho objetiva a investigação da viabilidade do monitoramento do torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis, através de sensores de emissão acústica.

Foram usinadas amostras de silício monocristalino com ferramenta de ponta única de diamante com determinada geometria e parâmetros de corte. O sinal de emissão acústica emitido durante o processo foi correlacionado com o acabamento e integridade superficial da peça, obtidos através de perfilômetro mecânico e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Três situações distintas de remoção de material foram investigadas: totalmente dúctil, dúctil-frágil e totalmente frágil.

O trabalho está estruturado em capítulos, cujos conteúdos são descritos abaixo.

O capítulo 2 trata da revisão bibliográfica, enfocando, primeiramente, o torneamento de ultraprecisão, ilustrando os modos dúctil e frágil de remoção, e enfocando os modelos de remoção, de indentação e riscamento até os modelos de corte para materiais frágeis. Em seguida, é abordada a emissão acústica, onde são apresentados os conceitos e definições, bem como o uso da emissão acústica no monitoramento da usinagem, tanto a convencional como a de ultraprecisão.

O capítulo 3 trata das montagens executadas para os ensaios e os procedimentos experimentais, assim como o planejamento experimental.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e as discussões.

O capítulo 5 traz as conclusões do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

# USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO E EMISSÃO ACÚSTICA - REVISÃO

### 2.1- Usinagem de Ultraprecisão

#### 2.1.1- Introdução e Aspectos Gerais

O torneamento de ultraprecisão é uma operação de usinagem para a produção de componentes ópticos e mecânicos com resolução de forma e acabamento submicrométrica e nanométrico, respectivamente. Na verdade, a usinagem de ultraprecisão não possui uma definição fixa, pois esta tecnologia tende a melhorar com o progresso e o passar do tempo. Segundo DUDUCH (1993), “ultraprecisão” está relacionada ao maior nível de exatidão alcançável, em uma determinada época, com um determinado tipo de equipamento. Atualmente, ultraprecisão inclui elementos com dimensões da ordem de 1mm e resoluções de medição da ordem de 1nm, daí, nanotecnologia. A usinagem de ultraprecisão é de interesse particular para a indústria óptica e eletrônica e envolve a retificação com diamante de ultraprecisão (UPDG – “Ultraprecision Diamond Grinding”) e torneamento com diamante de ponta única (SPDT – “Single Point Diamond Turning”). Ambos são capazes de gerar superfícies

com acabamento espelhado sem polimento posterior, usando máquinas-ferramenta especialmente projetadas, com mancais aerostáticos e elevada rigidez (SHAW, 1995).

Entre as características principais da usinagem de ultraprecisão, além dos já citados mancais aerostáticos e rigidez elevada, podem-se citar o controle ultrapreciso de posicionamento, a ferramenta utilizada, de diamante, e o material a ser usinado, que deve ser escolhido de forma a permitir um nível de acabamento superficial de ordem nanométrica.

A usinagem de ultraprecisão apareceu em muitos países após a 2ª Guerra Mundial, com o desenvolvimento de máquinas de retificação de ultraprecisão. A partir deste ponto, pesquisadores começaram a procurar novas alternativas para a fabricação de componentes ópticos anesféricos, que não a retificação. Assim, o torneamento com ferramenta de diamante tornou-se uma alternativa primordial. Neste sentido, os primeiros trabalhos de desenvolvimento foram realizados na Phillips Research na Holanda, Bryant-Simmons na Inglaterra e na Union Carbide Corp., Perkin-Elmer Corp., Lawrence Livermore National Laboratory e Battelle Pacific Northwest Laboratories, todos nos Estados Unidos. Entretanto, a maioria dos projetos pioneiros de torneamento com diamante foi incentivado pelo Departamento de Energia (“Department of Energy” - DOE) dos Estados Unidos, para projetos de fusão nuclear e armas nucleares. Assim, uma das primeiras máquinas-ferramenta para usinagem de ultraprecisão com ferramenta de diamante com características atuais, foi construída em 1962, pela Union Carbide Corp. Nuclear Division e a firma DuPont de Nemours & Company. A máquina produzia espelhos de diâmetro de 102mm, com exatidão geométrica de 127nm e desvios de circularidade menores que 51nm.

Esta tecnologia continuou se desenvolvendo, financiada principalmente por órgãos governamentais. Entretanto, na década de 70, através de um projeto intitulado “Precision Machining Commercialization”, feito pelo Laboratório de Materiais da Força Aérea Americana, grande parte da tecnologia de torneamento com diamante foi transferida dos órgãos governamentais para a indústria civil, no sentido de criar novos e maior quantidade de fornecedores de componentes de ultraprecisão (como componentes ópticos, por exemplo) para a indústria militar. Assim, a década de 80 foi marcada pelo uso extensivo na manufatura em escala industrial de elementos usinados de forma ultraprecisa, como cilindros de fotocopiadora, discos rígidos para computadores e elementos reflexivos para “scanner”, entre outros (KRAUSKOPF, 1984; SCHROETER, 1997).

Atualmente, a tecnologia de torneamento com diamante continua sendo muito usada na indústria óptica e mecânica de precisão, na fabricação de espelhos de formas esféricas e anesféricas, elementos ópticos, constituídos de materiais metálicos ou frágeis (BLOUGH et al, 1997; PARR-BURMAN & SHORE, 1996). No entanto, especial ênfase vem sendo dada à usinagem de materiais frágeis, devido à crescente tecnologia no campo da óptica reflexiva e no espectro infravermelho e no campo da microeletrônica, na fabricação de circuitos integrados (BLACKLEY & SCATTERGOOD, 1991; LEUNG, LEE & LU, 1998). Segundo McKEOW (1987), uma possível classificação das usinagens convencional, de precisão e de ultraprecisão em termos de tolerância e gama de produtos produzidos por cada processo, pode ser vista na Tabela 2.1.

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

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

Entre os processos de usinagem de ultraprecisão, o torneamento com ferramenta de diamante tem uma posição de destaque. Uma de suas maiores vantagens é sua habilidade em alcançar alto nível de acabamento superficial e controle

de forma, impondo baixo nível de defeitos superficiais e subsuperficiais, enquanto a taxa de remoção de material é relativamente maior se comparada com as de outros processos de ultraprecisão, tais como usinagem por emissão elástica, polimento, retificação dúctil, retificação, lapidação entre outros (STOWERS, 1988). A Figura 2.1, demonstra a superioridade do torneamento com diamante em relação aos outros processos, com melhor taxa de remoção versus rugosidade superficial e alto nível de controle de forma.

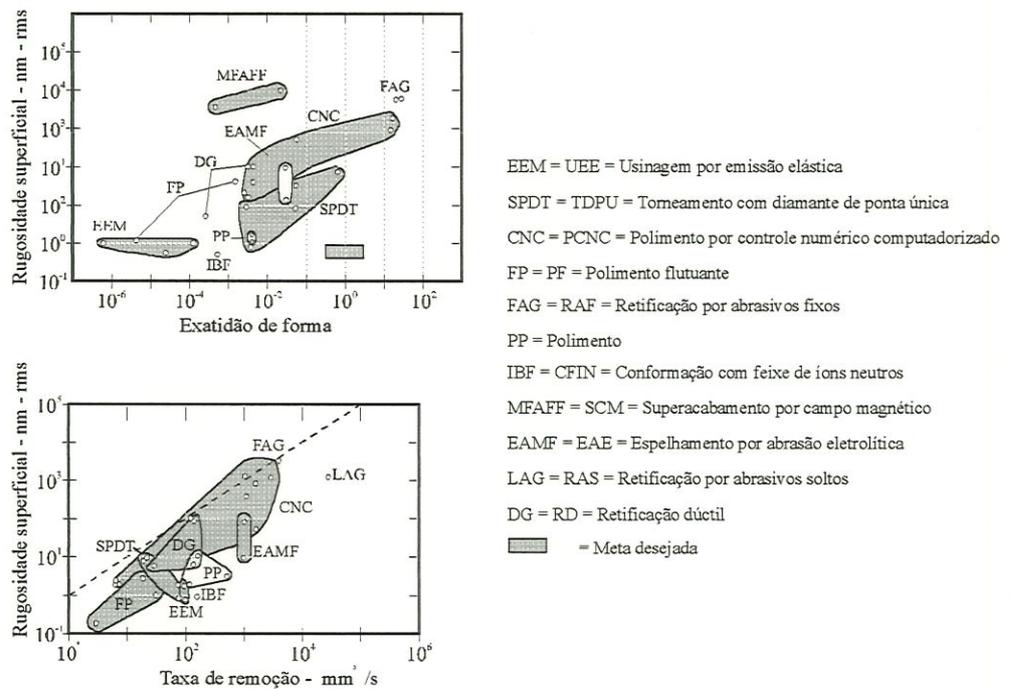


FIGURA 2.1- Comparação entre os processos de usinagem de ultraprecisão (STOWERS, 1988).

## 2.1.2- A ferramenta de diamante

O torneamento de ultraprecisão é realizado com ferramentas monocortantes de diamante monocristalino, que devem atender a requisitos necessários a este tipo de torneamento, onde acabamentos superficiais inferiores a 10nm são freqüentes. A geometria típica deste tipo de ferramenta é apresentada na Figura 2.2, denominada de ferramenta de ponta circular.

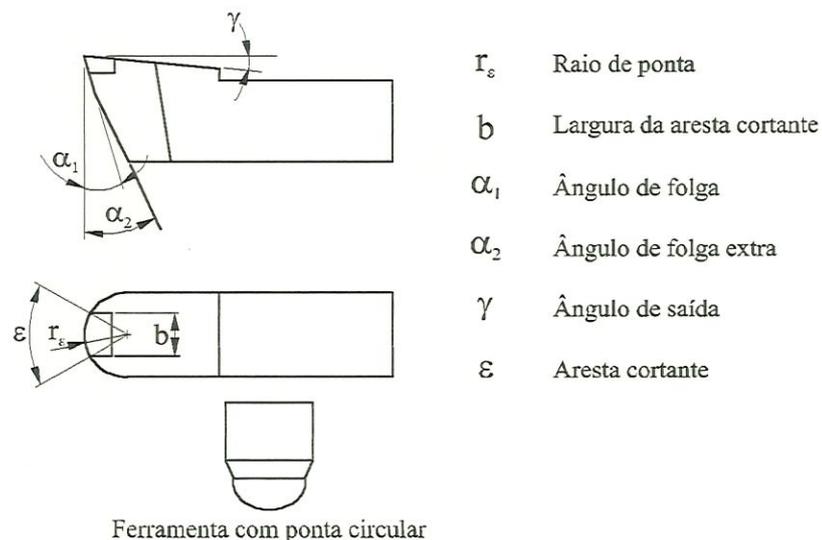


FIGURA 2.2- Ferramenta de diamante monocristalino

Entre as grandes vantagens do diamante monocristalino, está a sua elevada dureza e resistência ao desgaste, baixo coeficiente de dilatação térmica, elevado módulo de elasticidade, baixo coeficiente de atrito e alta condutividade térmica (2 a 6 vezes maior que a do cobre). Entre outras vantagens, estas características promovem um alto grau de afiação à ferramenta, com raio de aresta na faixa de 70-350nm, difícil

de se obter com outro tipo de material (KRAUSKOPF, 1984; PAUL et al, 1996; WONG, 1981).

Segundo WONG (1981), o desgaste de uma ferramenta de diamante é uma combinação de efeitos mecânicos, térmicos e químicos. O desgaste termo-químico é dividido em oxidação e grafitização do diamante, diminuindo sua resistência e levando a uma destruição progressiva. Já o desgaste mecânico é dividido em de flanco e face ou progressivo e microlascamentos (fissuras na aresta), como pode ser visto na Figura 2.3.

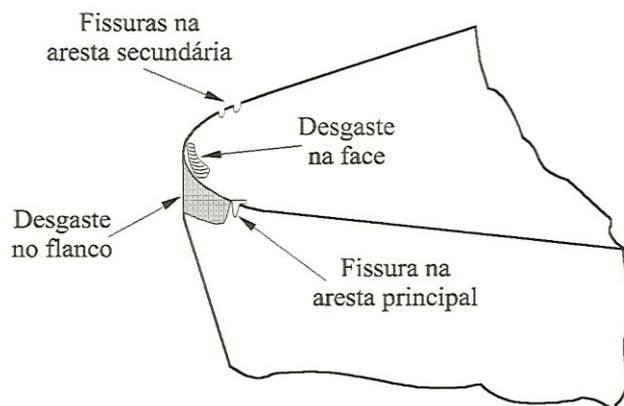


FIGURA 2.3- Tipos de desgaste em uma ferramenta de diamante

Através de fenômenos observados no desgaste da ferramenta, pode-se concluir que nem todo tipo de material pode ser usinado com diamante. PAUL et al (1996) afirmam que na prática, “torneável com diamante” significa que o custo do desgaste da ferramenta é aceitável em termos do valor do componente usinado. Deste modo, lentes anesféricas de silício às vezes são torneadas com diamante, ainda que haja desgaste significativo da ferramenta. Alguns dos materiais mais utilizados na usinagem de ultraprecisão estão listados na Tabela 2.2.

TABELA 2.2 – Materiais utilizados na usinagem de ultraprecisão

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

### 2.1.3- Torneamento de Materiais Frágeis

Quando submetido a tensões, materiais frágeis fraturam antes que apreciável deformação plástica ocorra, podendo ser evidência da característica frágil do material (CHAO, 1991). Entre os mais comumente usados na indústria, estão o silício, germânio, vidros ópticos, safira, arseneto de gálio e cerâmicas finas. A curva tensão-deformação, Figura 2.4 retirada de ZANOTTO & MIGLIORE JR (1991), demonstra o comportamento de um material frágil e um dúctil. Enquanto o material frágil apresenta somente comportamento elástico, o dúctil apresenta escoamento, deformação plástica e ruptura. Em função deste fenômeno, segundo JASINEVICIUS (1998), os materiais frágeis sempre foram considerados difíceis de serem usinados com remoção dúctil de material.

Mas, ainda que tais características frágeis façam a usinagem deste tipo de material extremamente difícil, a demanda por elementos de precisão fabricados a partir de materiais frágeis vem crescendo rapidamente, principalmente pelas

propriedades eletrônica, óptica, mecânica e físicas superiores às de outros tipos de materiais

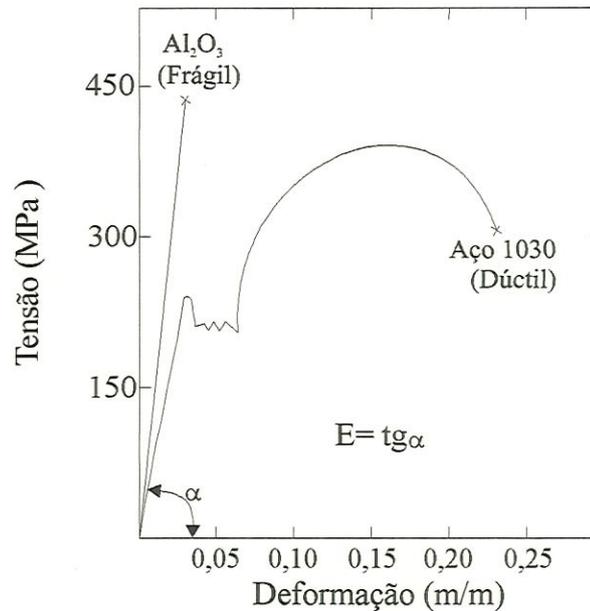


FIGURA 2.4- Curva tensão-deformação de um material frágil e um dúctil  
(ZANOTTO & MIGLIORE JR, 1991)

A usinagem de ultraprecisão de cristais semicondutores, por exemplo, continua a receber grande atenção, devido à necessidade crítica de se prover superfícies com extremo controle de rugosidade superficial e planicidade, assim como quantidade mínima de defeitos subsuperficiais na estrutura cristalina do material (JASINEVICIUS, 1998; LUCCA, MAGGIORE & RHORER, 1996; PAGOTTO, 1998). Esta necessidade é enfatizada em recente pesquisa realizada por VENKATESH et al (1995).

Tanto na indústria óptica como na eletrônica, o uso de materiais frágeis está condicionado à presença ou não de defeitos superficiais e subsuperficiais (DUDUCH,

1993). Na indústria óptica, a eliminação de defeitos subsuperficiais é necessária porque eles causam dispersão e absorção da luz. Na eletrônica, as propriedades eletrônicas do material são dependentes da perfeição da estrutura cristalina sendo, portanto, necessária a eliminação de defeitos subsuperficiais. Estes defeitos podem ser normalmente removidos pelos processos de lapidação e polimento ou polimento químico (“etching”). Entretanto, estes processos tradicionais possuem algumas desvantagens, como o elevado tempo gasto para produzir um determinado componente, difícil automação, introdução de erros de forma, com a diminuição da exatidão de forma da superfície original. Assim, torneamento e retificação de ultraprecisão aparecem como opções viáveis para a fabricação de superfícies ópticas e elementos eletrônicos com acabamento superficial adequado. O torneamento com diamante foi inicialmente usado em materiais dúcteis, como alumínio e cobre, na fabricação de espelhos ópticos e moldes para lentes Fresnel. Com a experiência adquirida com estes tipos de materiais e a descoberta de um regime “dúctil” em vidros e outros materiais frágeis, o torneamento de ultraprecisão pode ser considerado como uma alternativa na usinagem destes materiais (DUDUCH, 1993; SHIMADA et al, 1995).

Vários pesquisadores vem desenvolvendo trabalhos específicos com torneamento de materiais frágeis, especialmente silício e germânio (BLACKLEY & SCATTERGOOD, 1990 e 1994; JASINEVICIUS, 1998; LEUNG, LEE & LU, 1998; MORRIS et al, 1995; SHIBATA et al, 1996; SHIMADA et al, 1995). Todos vêm se empenhando na pesquisa do mecanismo de remoção durante a usinagem de tais materiais, já que a remoção de cavaco afeta a qualidade superficial. SHIMADA et al (1995) afirmaram que o mecanismo de remoção de materiais frágeis pode ser

classificado de dois modos. Um, é o processo devido à deformação plástica nos planos de escorregamento; o outro é devido a fratura frágil no plano de clivagem. Os autores ainda observaram que qualquer material, independentemente de sua dureza, pode ser usinado no modo dúctil sob uma usinagem com profundidades suficientemente pequenas ditas no nível submicrométrico. Outros pesquisadores, como BLACKLEY & SCATTERGOOD (1990 e 1994) e SHIBATA et al (1994 e 1996), no torneamento de germânio e silício, respectivamente, salientaram a importância da orientação cristalina, ou seja, direção de corte em relação à orientação cristalográfica. Os autores observaram que defeitos por “pittings” (danos causados por microfaturas) ocorriam ao longo de certas orientações cristalográficas específicas, em maior ou menor intensidade. Esta dependência das características da superfície da orientação cristalográfica também mudava com a variação da profundidade de usinagem, por causa da diferença no mecanismo de remoção de material entre remoção dúctil e frágil. JASINEVICIUS (1998), baseado em resultados de SHIBATA et al (1994 e 1996), investigou a influência de passes anteriores da usinagem na superfície gerada observando, mesmo com um “ombro não cortado” totalmente dúctil, a presença de trincas na superfície acabada. Os autores afirmaram que, mesmo usinando em condições de remoção teoricamente dúcteis, poderiam surgir trincas remanescentes de passes anteriores. A Figura 2.5 ilustra este fenômeno, onde podemos notar que, mesmo utilizando-se taxas de avanço predominantemente “dúcteis”, a camada superficial apresenta danos gerados a partir de passos anteriores, ou seja, trincas médias relacionadas à orientação do cristal dependentes da direção de corte.

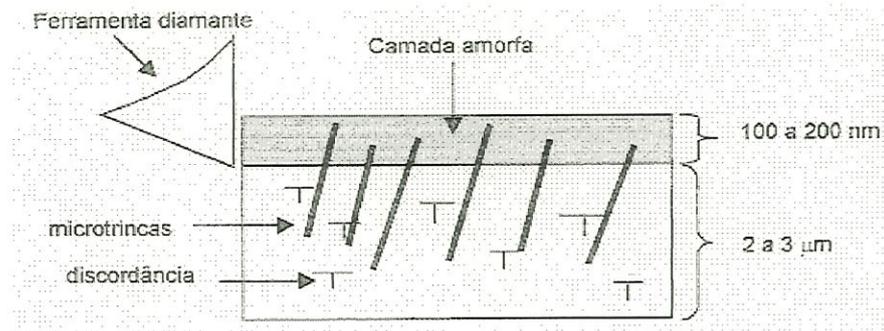


FIGURA 2.5 – Vista bidimensional do corte ortogonal, mostrando as trincas remanescentes de cortes anteriores (JASINEVICIUS, 1998)

Em descobertas mais recentes, pesquisadores observaram que o torneamento de ultraprecisão no regime dúctil ocorre devido a uma transformação de fase de um monocristal para uma fase intermediária metálica  $\beta$ -Sn (JASINEVICIUS, 1998; MORRIS et al, 1995, SHIBATA et al, 1994 e 1996), a qual promove a remoção de material no regime dúctil. Segundo JASINEVICIUS (1998), na usinagem de determinados monocristais semicondutores, como Si, existem fortes evidências de que as condições sob as quais o modo de remoção muda de fratura frágil para remoção no regime dúctil estariam associadas não só a condições de usinagem e geometria de ferramenta, mas ao comportamento destes cristais quando submetidos a elevadas pressões de contato durante o corte. Assim, a ocorrência do regime dúctil durante a usinagem estaria relacionado a uma transformação de fase induzida por pressão/tensão, sendo que a ductilidade de cristais semicondutores estaria limitada à profundidade que esta transformação atinge na região comprimida entre a ponta/aresta de corte da ferramenta e o substrato cristalino. Se esta camada fosse ultrapassada, o regime frágil passaria a ocorrer. MORRIS et al (1995) também afirmam que a alta pressão sob a aresta de corte pode causar a transformação de fase

da estrutura cúbica do diamante do semiconductor para a fase metálica ( $\beta$ -Sn). A ductilidade dessa fase metálica proporcionaria a plasticidade necessária para a existência do regime dúctil no corte de materiais semicondutores. Conseqüentemente, a formação do cavaco pode ser resultante de dois mecanismos: extrusão e cisalhamento. Quando a pressão é liberada (após a passagem da ferramenta), a fase amorfa seria formada, sendo os cavacos constituídos de fase amorfa. Pesquisas complementares vêm sendo realizadas a fim de se elucidar este fenômeno.

BLACKLEY & SCATTERGOOD (1994) também afirmaram que com dimensões extremamente pequenas de profundidade e espessura de corte, dependendo das condições de usinagem e geometria da ferramenta, o mecanismo de remoção de material pode mudar com a transição de fratura frágil para a deformação plástica. A Figura 2.6, retirada de JASINEVICIUS (1998), mostra duas regiões de uma amostra de silício monocristalino, uma danificada e a outra não. Na região danificada predominou a remoção frágil, enquanto que na não danificada ocorreu remoção dúctil de material.

Em profundidades de usinagem e avanços muito pequenos, ocorre um mecanismo de remoção denominado “ploughing” (sulcamento), onde o material será plasticamente empurrado para os lados. Assim, segundo JASINEVICIUS (1998), a remoção de material se resume a pequenas rebarbas, que são escoadas lateralmente ou simplesmente compactadas, como pode ser observado na Figura 2.7.

Os mecanismos e parâmetros envolvidos na remoção de materiais frágeis serão melhor discutidos mais adiante, quando serão vistos os modelos de corte para estes tipos de materiais, de BLAKE (1988) e de BLACKLEY (1991).

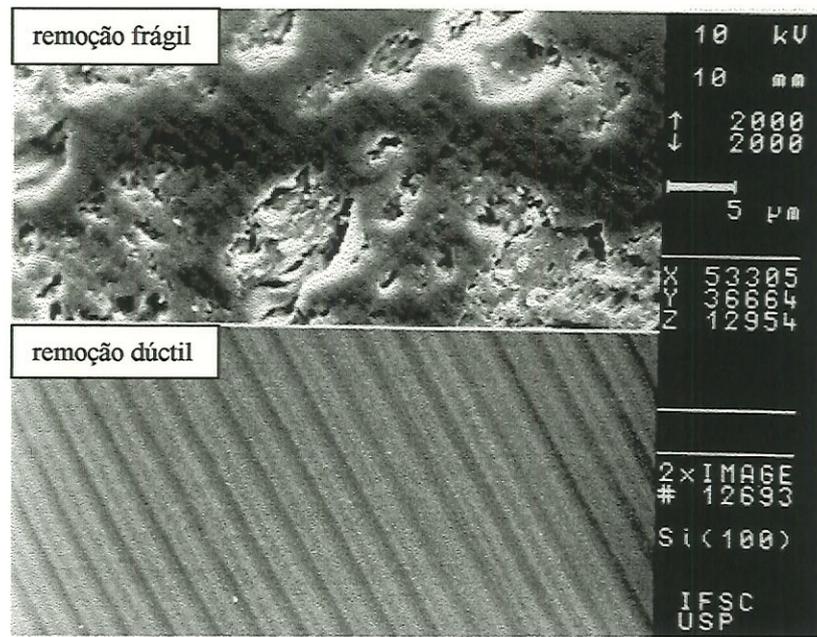


FIGURA 2.6 – Modos de remoção frágil e dúctil em uma amostra de silício monocristalino (JASINEVICIUS, 1998)

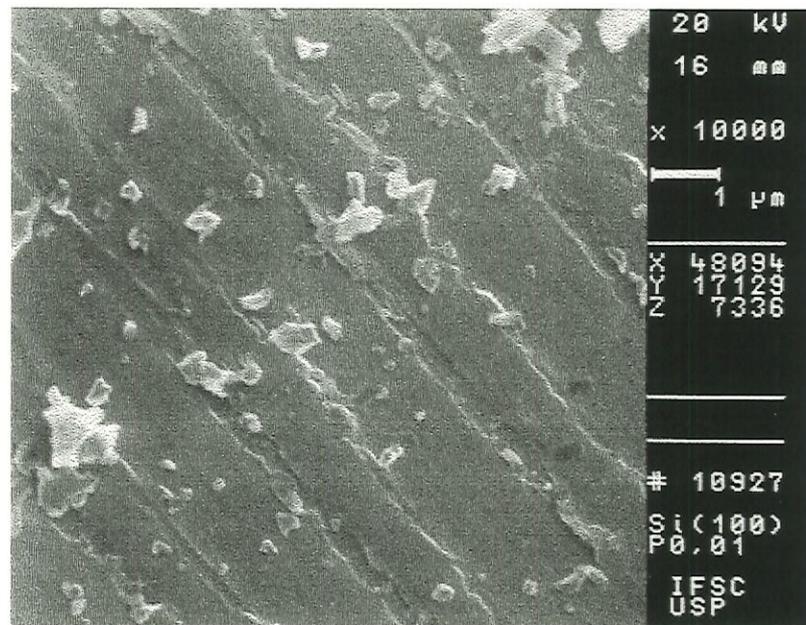


FIGURA 2.7 – Mecanismo de remoção pobre – “ploughing” (JASINEVICIUS, 1998)

#### 2.1.4- Indentação e Riscamento

Para o esclarecimento dos fenômenos envolvidos na remoção de materiais frágeis, duas técnicas foram muito importantes: a indentação e o riscamento.

A técnica de indentação vem sendo usada desde 1900, como um meio de medição de dureza que, de forma comparativa, é a medida da resistência de um material a uma deformação local e permanente ou escoamento plástico (CHAO, 1991).

O teste de indentação consiste em pressionar um indentador duro na superfície do material estudado, a uma determinada taxa de penetração. O indentador pode ser “afiado”, como Knoop e Vickers, ou “cego”, como Brinell (esfera de aço). O indentador do tipo Vickers é semelhante à ferramenta de diamante de ponta única usada no torneamento de ultraprecisão. Por isso, o estudo do início e propagação de trincas através da indentação é útil para a usinagem de ultraprecisão. Um diagrama esquemático da iniciação e propagação de trincas durante o carregamento e descarregamento em um teste de indentação é ilustrado na Figura 2.8.

Durante o ciclo de carregamento, o indentador começa um escoamento plástico e introduz uma zona de deformação irreversível.

Em certo ponto, sob certa carga crítica, há o desenvolvimento de trincas médias que, com o aumento da penetração, propagam de forma estável e subsuperficialmente. No ciclo de descarregamento, com a retirada progressiva do indentador, há o aparecimento de trincas laterais originadas na base da zona plástica.

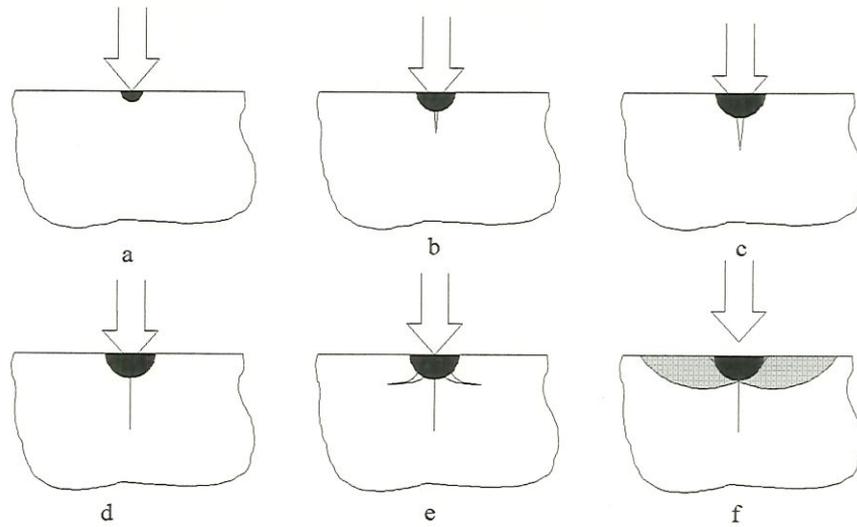


FIGURA 2.8- Esquema de iniciação e propagação de trincas durante o carregamento (a, b, c) e descarregamento (d, e, f) em um teste de indentação (LAWN & EVANS, 1977 in CHAO, 1991)

Estas trincas continuam a se estender até que se complete o ciclo de descarregamento, podendo interceptar a superfície. Na usinagem, quando a profundidade de usinagem é grande, as trincas laterais podem se estender à superfície e causar lascamento (Figura 2.9).

Vários pesquisadores (CHAO, 1991; LEUNG, LEE & LU, 1998; SHIMADA et al, 1995) observaram a presença de escoamento plástico, a transição e a fase de fratura de materiais frágeis. Estes pesquisadores perceberam que, até determinadas cargas críticas, e por consequência, profundidade de penetração crítica, o escoamento era plástico; vencidas estas cargas, ocorria fratura do material. A Figura 2.10 mostra o efeito da carga aplicada na incidência de trincas no silício monocristalino

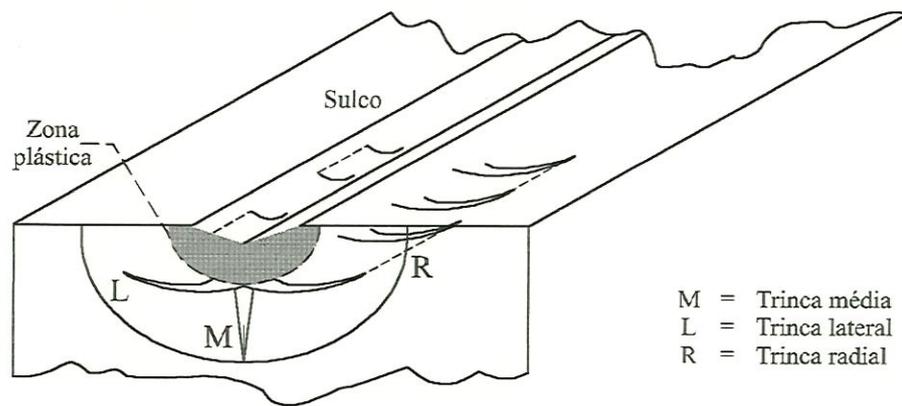


FIGURA 2.9- Tipos de trincas que podem surgir durante a usinagem de materiais frágeis (DUDUCH, 1993)

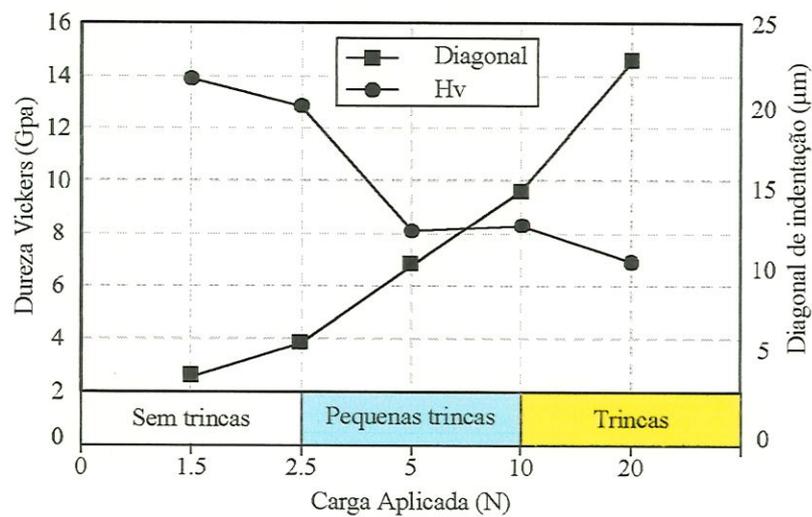


FIGURA 2.10 – Efeito da carga aplicada na indentação em silício monocristalino (LEUNG, LEE & LU, 1998)

No riscamento, também foi observada a influência da carga aplicada e da profundidade de penetração (CHAO, 1991; LEUNG, LEE & LU, 1998). Segundo os pesquisadores, a deformação plástica torna-se energeticamente favorável à medida

que a quantidade de deformação diminui e existe um volume limite (“threshold”) abaixo do qual o material irá se deformar, mas não fraturar. A Figura 2.11 mostra um sulco deixado por um indentador em uma amostra de silício monocristalino.

A formação do cavaco no torneamento com diamante difere dinamicamente e geometricamente da deformação produzida pela indentação e riscamento. Entretanto, as similaridades existentes entre os processos e o grande corpo de dados em indentação concernente à quantidade limitada de deformação plástica que precede o início de fratura frágil, demonstram a viabilidade da remoção dúctil de materiais frágeis no torneamento de ultraprecisão, quando profundidades de usinagem combinadas com condições de usinagem (geometria e forma da ferramenta, avanço e velocidade de corte) forem convenientemente aplicadas, levando ao desenvolvimento de modelos de corte para tais materiais.

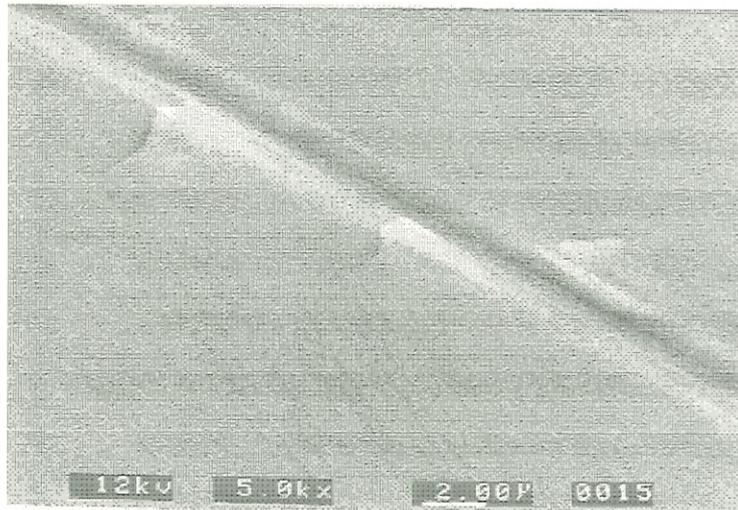


FIGURA 2.11 – Riscamento em silício monocristalino (CHAO, 1991)

### 2.1.5- Modelos de Corte para Materiais Frágeis

#### 2.1.5.1- Modelo de BLAKE (1988)

A hipótese básica para a usinagem dúctil de materiais frágeis é que pode ser alcançada deformação plástica em um pequeno volume de controle na interface ferramenta-peça antes que ocorra fratura. Dos estudos de LAWN & EVANS (1977), a carga crítica em um indentador de diamante para a iniciação de fratura pode ser definida como:

$$P_c = \frac{\Omega K_c^4}{H^3} \quad (1)$$

onde H é a dureza Vickers,  $K_c$  é a tenacidade à fratura e  $\Omega$  é uma função de E/H, onde E é o módulo de elasticidade. Com isso, a profundidade crítica de penetração  $t_c$ , por um indentador para o início de trinca, segundo LAWN & EVANS (1977), pode ser escrita:

$$t_c = \Psi (E/H) (K_c/H)^2 \quad (2)$$

onde  $\Psi$  é uma constante adimensional dependente da geometria da indentação. O termo  $(K_c/H)^2$  aparece por causa das necessidades dimensionais e a razão E/H é similar para qualquer material cerâmico, porém, a tenacidade à fratura e a dureza aparecem como propriedades principais do material.

A Figura 2.12 mostra a geometria de corte ortogonal para torneamento. A profundidade de usinagem nominal ( $a_p$ ) é definida como a diferença de altura entre as superfícies final usinada e inicial.

Uma zona de deformação plástica é formada à frente da ferramenta. Pela Figura 2.12, que mostra apenas a profundidade de usinagem  $a_p$ , parece que, para obter-se um regime dúctil durante a usinagem, basta que  $a_p$  seja menor que  $t_c$ .

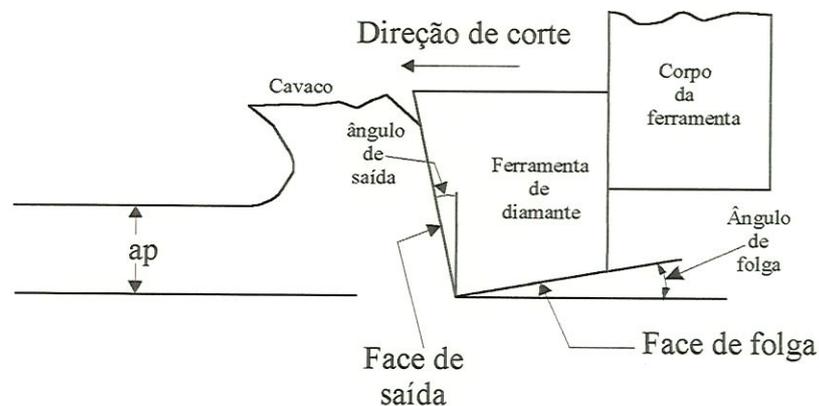


FIGURA 2.12- Geometria de corte ortogonal da usinagem

BLAKE (1988) avalia que  $t_c$  poderia ser usado na usinagem de ultraprecisão, com  $t_c = h_D$ , onde  $t_c$  seria uma profundidade crítica de corte para determinados parâmetros de usinagem, abaixo da qual não ocorrem danos por fratura. Entretanto, uma avaliação mais cuidadosa da geometria da ferramenta é necessária para identificar-se o parâmetro de profundidade. Uma geometria de corte real é mostrada na Figura 2.13. A área sombreada é a seção transversal real do cavaco.

Assim, BLAKE (1988) realizou ensaios de recuo rápido, onde o perfil da ferramenta era deixado sobre a peça através do recuo rápido da placa do eixo-árvore, criando uma região denominada de ombro não-cortado (“uncut shoulder”).

A Figura 2.14 mostra a geometria de corte bi-dimensional da Figura 2.13, num plano normal à direção de corte.

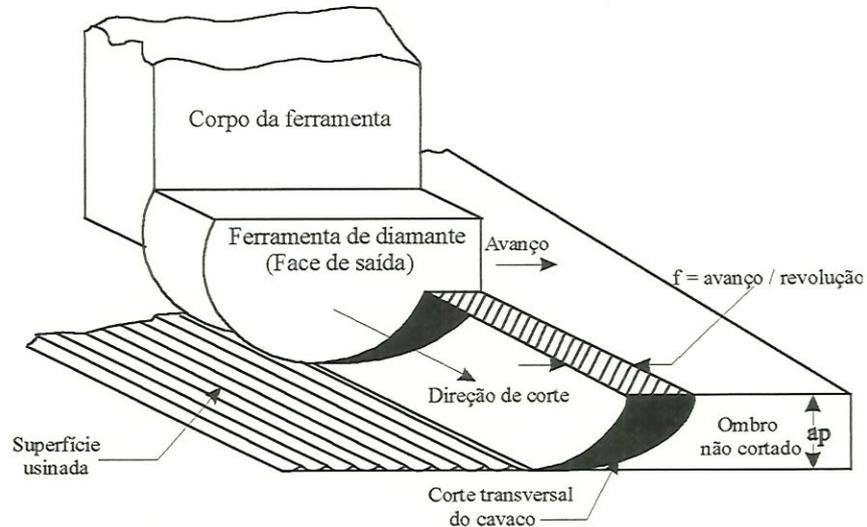


FIGURA 2.13- Geometria de corte para o torneamento de ultraprecisão. A combinação dos movimentos de corte e avanço produzem a seção transversal do cavaco projetada sobre o ombro não-cortado (BLAKE & SCATTERGOOD, 1990)

Na figura 2.14, pode-se ver a região do ombro não-cortado, a espessura nominal de corte,  $h_D$ , que varia em função da posição angular  $\theta$  ao longo da ponta da ferramenta ( $h_D$  é zero na linha de centro da ferramenta e máximo no topo do ombro não-cortado,  $h_{m\acute{a}x}$ ).

Entretanto, a geometria da seção transversal do cavaco está distorcida. A Figura 2.15 mostra esta geometria em escala real (proporcional). A largura  $w$  do cavaco é muito maior do que sua espessura e a variação de  $\theta$  ao longo da ponta da ferramenta é pequena, com  $h_D=0$  para  $\theta=0$  e  $h_D=h_{m\acute{a}x}$  para  $\theta=\theta_{m\acute{a}x}$ .

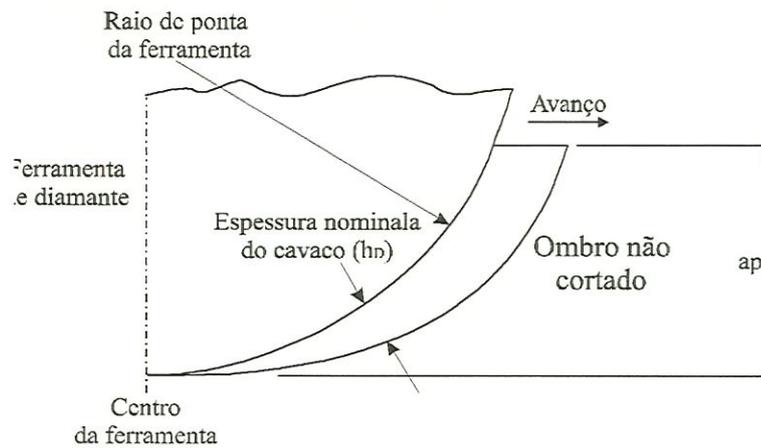


FIGURA 2.14- Geometria de corte vista num plano normal à direção de corte, mostrando a espessura nominal variável do cavaco

(BLAKE & SCATTERGOOD, 1990)

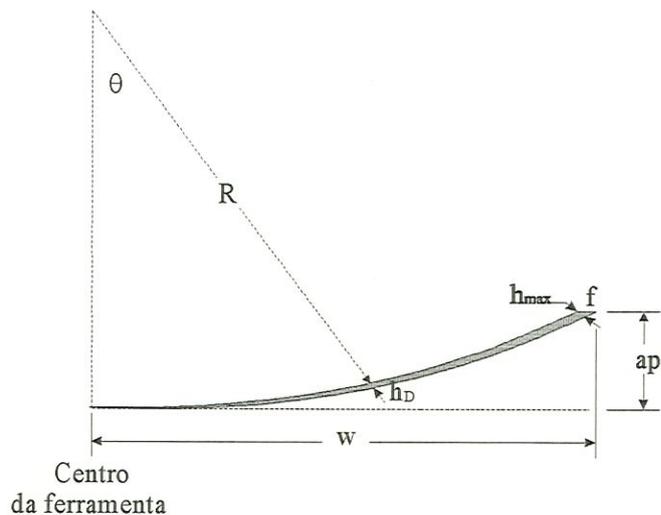


FIGURA 2.15- Vista da seção transversal do cavaco em escala real, mostrando a variação de  $h_D$  em função de  $\theta$  ao longo da ferramenta

(BLAKE & SCATTERGOOD, 1990)

Analisando a região do ombro, BLAKE (1988) observou a presença de danos induzidos através de microfraturas (“pittings”) pela aresta lateral de corte, onde

$h_D$  se aproxima de  $h_{m\acute{a}x}$ , e não na linha de centro da ferramenta, onde  $h_D$  se aproxima de zero.

Segundo o autor, as observações das transições de defeitos de microfaturas na região do ombro sugerem um modelo para usinagem no regime dúctil, como pode ser visto na Figura 2.16. Para dados parâmetros de usinagem, existe uma espessura crítica de cavaco,  $h_D=h_c$ , abaixo da qual não ocorre fratura.

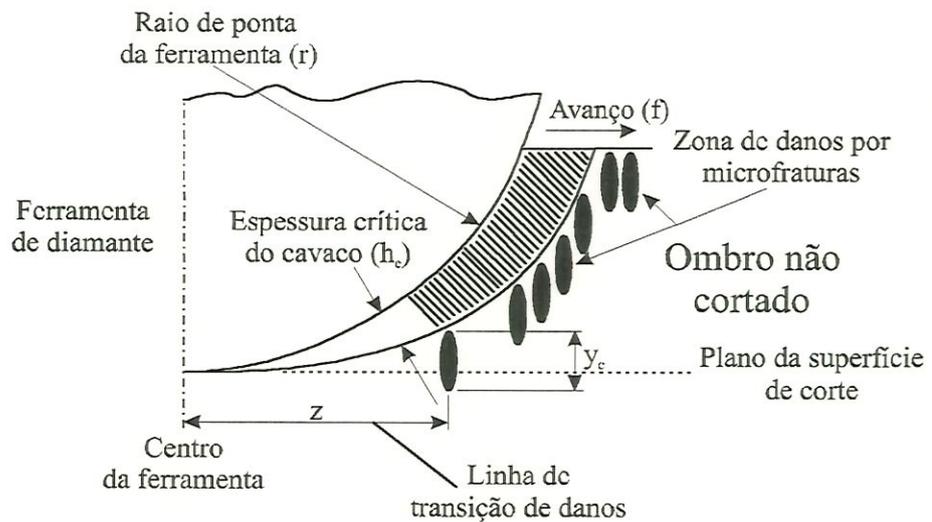


FIGURA 2.16- Modelo para usinagem dúctil. Para  $h_D > h_c$ , a zona de danos se forma ao longo da ponta da ferramenta. O corte dúctil sem fratura ocorre somente ao longo da porção abaixo da seção transversal do cavaco, onde  $h_D < h_c$ . A profundidade da zona danificada é denotada por  $y_c$  (BLAKE & SCATTERGOOD, 1990)

Pode-se observar que, para  $h_D < h_c$ , ocorre uma resposta dúctil ao longo da ponta da ferramenta, enquanto que, para  $h_D > h_c$ , ocorre fratura, resultando na zona de microfaturas mostradas na Figura 2.16.

Uma linha de transição  $z$  bem definida pode ser observada entre a zona de microfraturas e o centro da ferramenta,  $h_D=h_c$  define a condição de transição de fraturas, com  $h_c$  emergindo como parâmetro de espessura crítica. O avanço  $f$  é importante pois muda a posição  $\theta$  na qual  $h_D=h_c$ . Com o aumento de  $f$ ,  $h_c$  move-se abaixo da ponta da ferramenta, fazendo com que a zona danificada de profundidade  $y_c$  reproduza-se abaixo do plano da superfície de corte, apresentando “pittings” introduzidos por microfraturas. Assim, segundo BLAKE (1988), o material removido na região do ombro, acima de  $h_c$ , é retirado por uma combinação de plasticidade e microfratura.

A relação entre  $h_c$  e  $z$  é determinada como:

$$h_c=f(z+f)/r \quad (3)$$

onde  $f \ll 1$  e  $z \gg 1$  para os testes. A linha de transição dos danos para a região dúctil que determina o valor de  $z$  foi definida pelo critério de que a posição média da linha seria ajustada pelo terceiro “pit” observado sobre o ombro, em relação ao centro da ferramenta.

Portanto, BLAKE (1988) observou que uma resposta dúctil durante o torneamento com diamante de materiais frágeis deve existir apenas na ponta da ferramenta, onde a espessura do cavaco se aproxima de zero. Fratura pode continuar ocorrendo na região do ombro, mas na medida que estas fraturas não ultrapassem o plano da superfície de corte, uma superfície livre de fraturas pode ser gerada. KUNZ et al (1996) também observaram este fenômeno torneando amostras de Si (100). Neste trabalho, os autores notaram que, ultrapassada determinada espessura crítica de

corte  $h_c$ , trincas resultavam do mecanismo de remoção frágil e estendiam-se a determinada profundidade de danos subsuperficiais,  $y_c$ . A remoção dúctil de material ocorreria quando  $y_c$  não atingisse o plano da superfície de corte (Figura 2.16). Ou seja, diminuindo-se a profundidade de usinagem, talvez a parcela de remoção frágil de material diminuísse, diminuindo, deste modo,  $y_c$ . Quando  $y_c$  não atinge mais o plano da superfície de corte, significa que há uma transição para o modo de remoção dúctil. Logo, pode-se concluir que o material é removido através da combinação de mecanismos de microplasticidade e fratura.

#### 2.1.5.2- Modelo de BLACKLEY (1991)

BLACKLEY & SCATTERGOOD (1991) desenvolveram um novo modelo, baseado no modelo de BLAKE (1988), com um novo parâmetro, o de profundidade de danos subsuperficiais,  $y_c$ . Este parâmetro é importante porque  $y_c$  move-se ao longo da região do ombro não-cortado em combinação com  $h_c$ , quando diferentes avanços são usados. A nova geometria para o modelo está ilustrada na Figura 2.17.

Quando pequenos avanços são usados,  $h_c$  localiza-se na região superior do ombro e o defeito subsuperficial não afeta a superfície final de corte. Isto ocorre porque os danos subsuperficiais são removidos com os passes subsequentes da ferramenta. Entretanto, quando o avanço é aumentado,  $h_c$  move-se em direção à região abaixo do ombro e a profundidade de dano  $y_c$  começará a reproduzir-se na superfície acabada. O modelo de BLAKE (1988) omitia  $y_c$  e não explicava uma aparente mudança com o avanço no valor calculado de  $h_c$ . É importante notar que o

parâmetro  $h_c$  representa uma espessura crítica de corte para a iniciação da fratura e, por outro lado,  $y_c$  representa a propagação média da fratura depois da iniciação.

O novo modelo foi derivado de modo que  $h_c$  e  $y_c$  puderam ser obtidos usando-se os parâmetros de usinagem conhecidos, ou seja, o raio de ponta da ferramenta ( $r$ ) e avanço ( $f$ ), além da localização da transição dúctil-frágil,  $z$ .

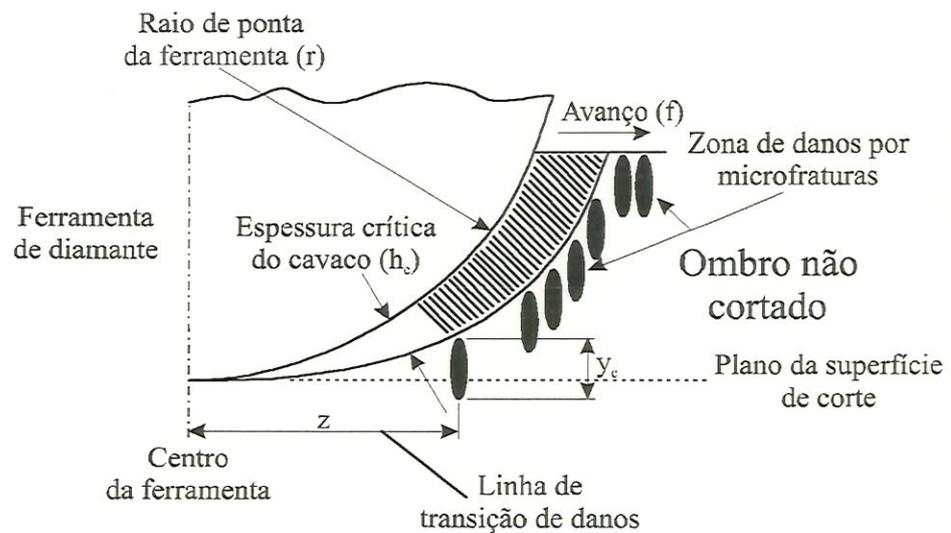


FIGURA 2.17- Modelo de corte de BLACKLEY (1991) mostrando um novo parâmetro, o de profundidade de danos subsuperficiais  $y_c$

(BLACKLEY & SCATTERGOOD, 1991)

A Figura 2.17 deve ser considerada cuidadosamente. A derivação completa da equação que se segue é feita no Apêndice de BLACKLEY & SCATTERGOOD (1991):

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

Um gráfico de  $(z_{ef}^2 - f^2)/r^2$  versus  $1/f^2$  resultará em uma linha reta, onde  $h_c$  será a inclinação e  $y_c$  poderá ser obtido da intersecção. Valores de  $h_c$  e  $y_c$  são parâmetros representativos das condições de usinagem e geometria da ferramenta.

Quando se tem  $z_{ef}=0$  na equação (4), determina-se um valor limite para a taxa de avanço,  $f_{\max}$ :

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

onde  $f_{\max}$  é o avanço máximo no qual a transição dúctil/frágil move-se sobre o plano de corte. Este parâmetro depende do número de “pits” observado para marcar esta posição, ou seja, em  $f_{\max}$  a quantidade de “pitting” sobre a superfície equipara-se com o número mínimo de “pits” usado para estabelecer a linha de transição de danos na região do ombro não-cortado.

Assim, o uso de ensaios de recuo rápido e medições da transição dúctil/frágil na região do ombro é um procedimento determinístico que prova ser útil no estabelecimento de um critério de usinabilidade de materiais frágeis.

## 2.2- Emissão Acústica (EA)

### 2.2.1- Conceitos e Histórico

Emissão Acústica pode ser definida como uma onda elástica transiente gerada por uma rápida liberação de energia proveniente de uma ou mais fontes de

deformação ou fratura localizadas em um material (BEATTIE, 1983). Esta energia liberada é associada com uma abrupta redistribuição de tensões internas, tendo como consequência, a propagação de ondas de tensão através da estrutura do material. Já KLAIBER, DORNFELD & LIU (1990) definem emissão acústica como ondas de tensão de alta frequência e baixa amplitude, que resultam de uma rápida liberação de energia de deformação em um material.

O primeiro trabalho de vanguarda em EA foi feito na década de 50 por Joseph Kaiser, na Universidade Técnica de Munique (LIPTAI et al, 1971). Kaiser analisou ruídos emitidos pela deformação de materiais e observou que este fenômeno envolvia processos irreversíveis, mais tarde denominado de Efeito Kaiser, onde emissões não eram geradas durante a fase de recarregamento do material até que a tensão excedesse seu maior valor prévio. Na condição de técnica passiva de teste não destrutivo, na década seguinte, a EA foi muito utilizada em extensa gama de aplicações, como testes de vazamento em vasos de pressão, programas de manutenção e integridade estrutural na aeronáutica e monitoramento de deterioração de materiais compósitos, entre outros (LICHT, 1979; LORD JR., 1975). Somente na década de 70, no Japão, a EA foi usada pela primeira vez em aplicações em máquinas ferramentas. Atualmente, é usada com sucesso em sistemas de monitoramento de ferramenta (desgaste e quebra), formação do cavaco e análise do estado do processo de corte (DORNFELD, 1994).

### 2.2.2- Mecanismos de Geração de Sinais de EA

Como visto, EA pode ser definida como ondas de tensão elástica geradas por uma rápida liberação de energia em materiais sob deformação ou fratura, ou ambos. Ou seja, é gerada por um processo dinâmico pelo qual o material tenta retornar ao estado de equilíbrio (BEATTIE, 1983).

As principais fontes de geração de EA são (Figura 2.18):

- zona primária de deformação (zona de cisalhamento);
- zona secundária de deformação (interface ferramenta-cavaco);
- zona terciária (atrito entre o flanco da ferramenta e a superfície usinada);

Tendo como fonte secundárias:

- a quebra do cavaco e o enrolamento de cavacos contínuos na face da ferramenta ou peça-obra;
- lascamento ou quebra da ferramenta.

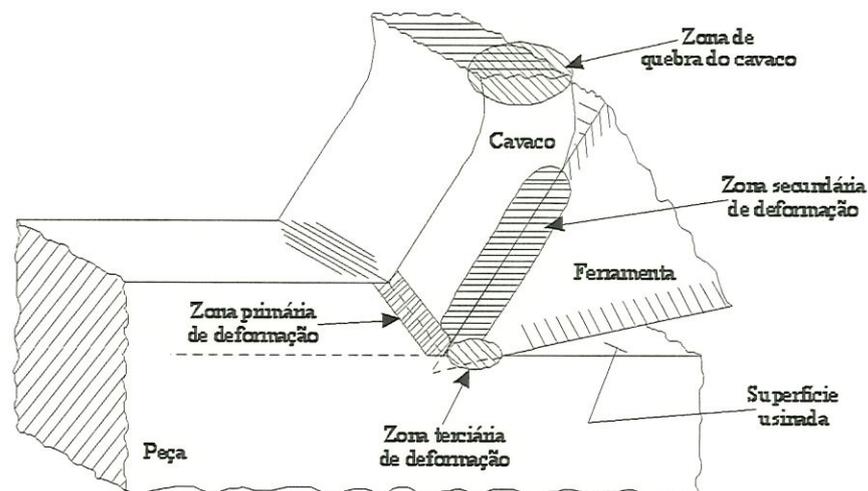


FIGURA 2.18 – Principais fontes de geração de EA

Entretanto, a zona de deformação primária é a maior fonte de EA, produzindo cerca de 75% do sinal total (SAINI & PARK, 1996).

Segundo BEATTIE (1983), o fenômeno de EA pode ser gerado por um grande número de mecanismos. Alguns destes são: fratura dos cristais, nucleação e crescimento de trincas, mecanismos envolvendo deslocamentos, fraturas de inclusões em um material, transformações de fase em sólidos e descargas elétricas. Todos estes mecanismos são caracterizados por um rápido movimento coletivo de um grupo de átomos. BEATTIE (1983) também afirma que movimentos de átomos de forma individual não irão produzir EA.

Os sinais de EA podem ser divididos em dois tipos (Figura 2.19): i) de emissão contínua e ii) pulsos (“bursts”), que geralmente se apresentam na forma de senóides decrescentes devido à ressonância entre as estruturas e os transdutores (LICHT, 1979). Geralmente, durante o processo de usinagem, o primeiro tipo é gerado por deformação plástica, enquanto que o segundo por fratura (KANNATEY-ASIBU JR & DORNFELD, 1981).

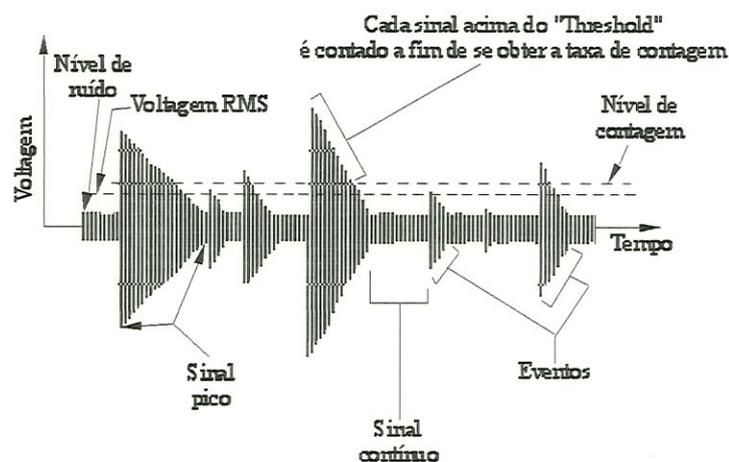


FIGURA 2.19 – Tipos de sinais de EA

Em geral, acima de 50kHz, o comprimento dos pulsos usualmente excedem o intervalo de tempo entre eles. A superposição dos pulsos produz continuamente ondas acústicas que são chamadas de emissões contínuas, que possuem uma

amplitude usualmente muito menor do que a de um pulso (BEATTIE, 1983). Ou seja, como também afirma LIU (1991), toda atividade de EA é fundamentalmente composta por pulsos distribuídos randomicamente.

### 2.2.3- Sinal de Emissão Acústica: Conceitos e Métodos de Processamento

É importante salientar a diferença entre Emissão Acústica e Sinal de Emissão Acústica. A primeira é uma onda acústica gerada por um material e a segunda é um sinal elétrico produzido por um sensor em resposta a esta onda.

O sensor de EA, que é um transdutor piezoelétrico, pode ser definido como um dispositivo que gera um sinal elétrico quando é estimulado por uma onda acústica, gerada por rearranjos estruturais. Esta onda acústica é a ligação entre a fonte destes rearranjos e o sensor.

Na forma primitiva, ondas são basicamente senoidais. Entretanto, durante a propagação, elas freqüentemente sofrem consideráveis mudanças durante seu espalhamento, que é causado por defeitos estruturais, múltiplas reflexões nas interfaces e refração, fenômeno que ocorre quando há mudança no meio de propagação. As conseqüências de tais fenômenos podem ser vistas na Figura 2.20.

Todos estes fatores modificam consideravelmente a forma de onda por mudanças de fase, atenuações de amplitude e repetições de ondas (através de reflexões), ao ponto de a forma final da onda ser mais bem descrita como um processo randômico, e não senoidal, tornando a identificação da fonte do sinal difícil tarefa.

Para tentar atenuar estes efeitos no processo de usinagem, mais especificamente no torneamento, o sensor deve ser fixado o mais próximo possível da ponta da ferramenta (BEATTIE, 1983; WASCHKIES, SKLARCZYK & HEPP, 1994), geralmente no porta-ferramentas, e deve ser aplicado um fluido na interface entre o sensor e a superfície onde está sendo fixado, para que se possa obter um nível maior de sinal (BEATTIE, 1983). A regra mais prática é usar uma fina camada de algum fluido viscoso que umideça ambas superfícies.

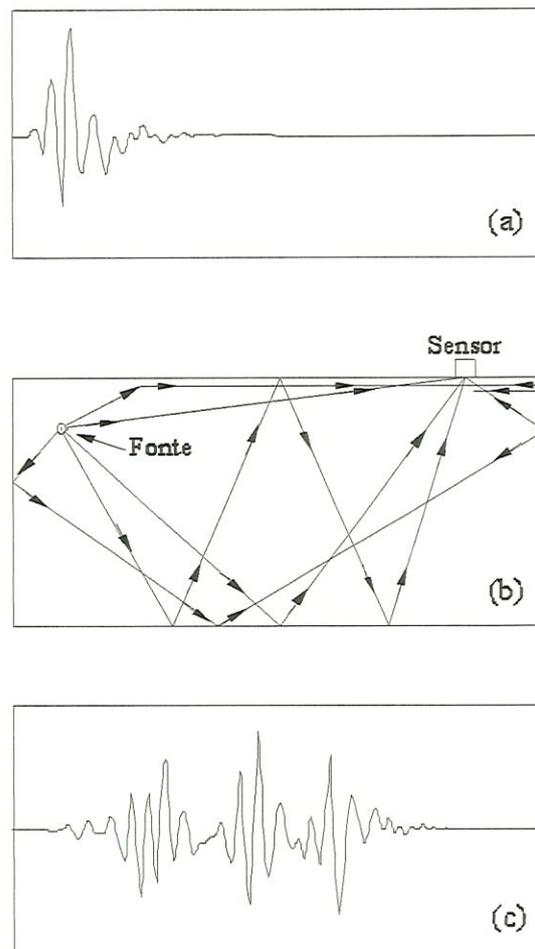


FIGURA 2.20 – Efeitos dos múltiplos trajetos percorridos por um sinal de EA. a) Onda inicial; b) Diferentes trajetos para se alcançar o sensor; c) A forma da onda no sensor (BEATTIE, 1983)

Para análise do sinal, as características mais importantes são a taxa de repetição média, a amplitude individual do pulso, a energia dos pulsos e o conteúdo de frequência, tanto dos pulsos individuais como o conteúdo médio. Devido às características randômicas dos sinais, nestas análises são frequentemente utilizadas técnicas estatísticas, das quais as mais usadas são:

- i) *Contagem e Taxa de Contagem*: consiste na gravação de sinais, cuja amplitude excede um certo nível (limite) “threshold” de voltagem. Este é considerado um dos mais fáceis e úteis métodos para análise de EA. Na prática, o sinal é amplificado e enviado a um contador eletrônico. Quando o contador soma continuamente sem ser zerado, o sinal de saída é denominado contagem total; se o contador é zerado depois de um período de tempo, a máxima contagem para cada período é denominada taxa de contagem. O contador de EA é uma excelente medida qualitativa, porém, muito pobre em termos quantitativos. Um grande problema na utilização deste método é a adequação do nível de voltagem “threshold” aos níveis atuais de EA. O ajuste em um certo nível fixo de “threshold” pode fazer com que sinais de EA ultrapassem em muito este nível, o que é prejudicial, por exemplo, no monitoramento de quebra de ferramentas.
- ii) *Análise de Distribuição de Amplitude*: é a indicação do número de sinais cuja amplitude está compreendida em uma faixa pré-determinada. A distribuição de amplitudes de emissão é uma característica do material e do mecanismo de deformação, e sua medição pode revelar detalhes do processo de deformação que possam estar obscuros (KANNATEY-ASIBU JR & DORNFELD, 1981).

- iii) *Análise Espectral*: o espectro de frequência de um sinal é composto de um número infinito de parâmetros (cada frequência tem sua própria amplitude). Ele ajuda na caracterização das fontes de ruído, mostrando a contribuição de cada frequência na potência total. O melhor procedimento matemático conhecido para calcular o espectro de frequência é o algoritmo de Transformada Rápida de Fourier (“Fast Fourier Transform”- FFT), que é frequentemente usada no processamento de sinal de EA;
- iv) *Valor RMS do Sinal*: um dos métodos mais significativos para analisar EA é a medição do conteúdo de energia dos sinais de EA. A taxa com que a energia é transmitida pelo sinal pode ser diretamente correlacionada com a taxa de geração de energia pela fonte original de EA. Uma maneira simples de medir tal energia é a avaliação da voltagem RMS (“root mean square”) dos sinais. Segundo LIU (1991), a voltagem RMS de um sinal pode ser escrita como:

$$EA_{RMS}(t) = \left[ \int_{-\infty}^t v^2(\tau)w(t-\tau)d\tau \right]^{1/2} \quad (6)$$

onde  $t$  é o tempo,  $\tau$  é a variável de controle para o tempo e  $w(t)$  é uma função imposta ao sinal  $v(t)$ . Para a maioria dos voltímetros RMS disponíveis no mercado,  $w(t)$  é uma função passa-baixa exponencial de janela móvel, expressa por:

$$w(t) = \frac{1}{RC} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (7)$$

onde RC é a constante de tempo que determina a frequência de corte do filtro passa-baixa (R é a resistência e C a capacitância do circuito passa-baixa). A análise do sinal de  $EA_{RMS}$  será utilizado neste trabalho.

## 2.3- Monitoramento do Processo de Usinagem através da EA

### 2.3.1- Sistemas de Monitoramento

Com a competição mundial e as tendências da indústria atual focadas na automação e integração da manufatura, pesquisas estão sendo direcionadas ao desenvolvimento de avançadas metodologias para o controle e monitoramento em processos de manufatura. Um esquema de monitoramento confiável pode fornecer informações úteis sobre o estado do processo, e transmiti-las para que o operador ou controlador automático tome decisões (INASAKI, 1998; LEEM, 1997).

Segundo TÖNSHOFF et al (1988), os principais objetivos das pesquisas em controle e monitoramento são: segurança, prevenção de defeitos na máquina, prevenção de rejeição de peças, prevenção de tempo inativo na máquina e otimização dos recursos disponíveis da máquina e material. Um projeto avançado de sensor, aliado a tecnologias de processamento de sinal, permite informações melhoradas sobre as condições do processo, possibilitando um controle e otimização do processo. Já BYRNE et al (1995) afirmam que o foco do monitoramento pode ser tanto na

máquina (monitoramento de diagnóstico e desempenho), na ferramenta (estado de desgaste, lubrificação e alinhamento), na peça (geometria e dimensões, características da superfície e rugosidade, tolerância e defeitos metalúrgicos), como no processo em si (formação de cavaco, temperatura, consumo de energia). Existem diversos tipos de sensores disponíveis para o monitoramento em um ambiente de usinagem, como pode ser visto na Figura 2.21.

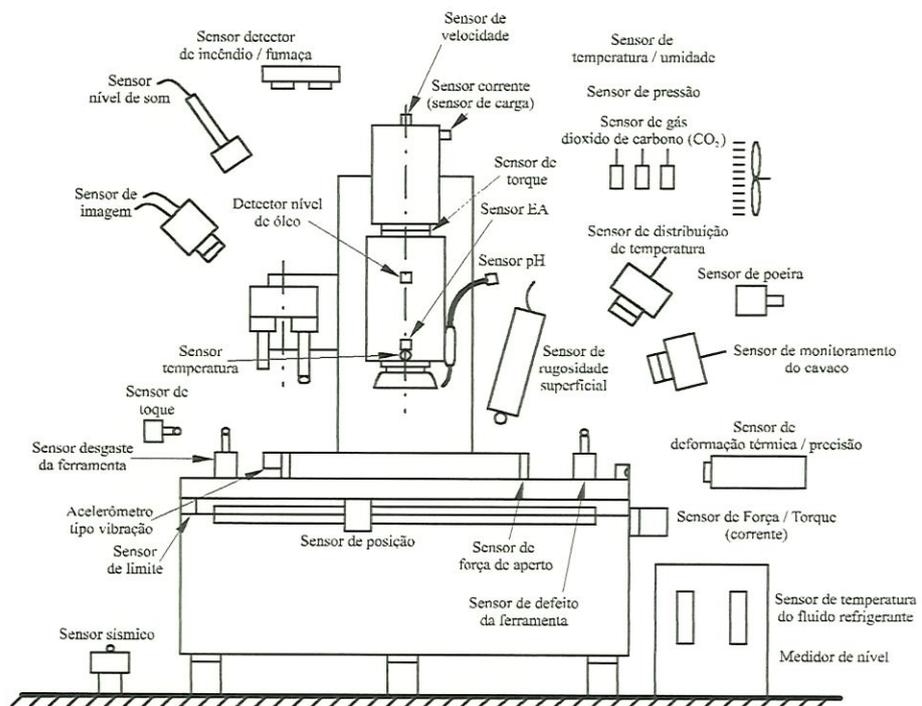


FIGURA 2.21- Tipos de sensores existentes em um ambiente de manufatura  
(TÖNSHOFF et al, 1988)

Entretanto sensores para o monitoramento do processo devem reunir os seguintes requisitos, segundo TÖNSHOFF et al (1988):

- ter capacidade de medir o mais próximo possível do ponto de usinagem;
- não reduzir a rigidez dinâmica e estática da máquina-ferramenta;

- não restringir espaço de trabalho e parâmetros de corte;
- ser livre de desgaste e manutenção, ter facilidade na troca (se necessária) e baixo custo;
- ter resistência à sujeira, cavacos e influências mecânicas, eletromagnéticas e térmicas;
- ter funcionamento independente da ferramenta e peça;
- permitir transmissão de sinal confiável, por exemplo, de componentes de máquinas fixos para rotativos.

Portanto, apenas uma fração de sensores que estão disponíveis no mercado são adequados para o monitoramento do estado do processo por razões técnicas.

Em relação aos sistemas de sensores para o monitoramento do processo, ainda segundo TÖNSHOFF et al (1988), pode-se distinguir entre sistemas contínuos e intermitentes e sistemas de medição diretos e indiretos. No caso de sensores de medição contínua, a variável é medida durante todo o tempo de usinagem; o sistema de medição intermitente grava a variável medida apenas durante intervalos do processo de usinagem. Sistemas de medição diretos empregam a quantidade real da variável medida, por exemplo, desgaste de ferramenta, enquanto sistemas de medição indiretos medem quantidades auxiliares adequadas, como componentes de força de corte e deduzem a quantidade real via correlações determinadas empiricamente.

Processos de medição direta possuem alto nível de exatidão, enquanto métodos indiretos são menos complexos e mais adequados para aplicações práticas. Medições contínuas possibilitam a detecção contínua de todas as mudanças do sinal de medição e assegura que até distúrbios inesperados do processo, como quebra da

ferramenta, sejam respondidos imediatamente. Medição intermitente é dependente das interrupções do processo de usinagem ou intervalos especiais de medição, que geralmente impõem perdas de tempo e, conseqüentemente, altos custos (BLUM, SUZUKI & INASAKI, 1988; BYRNE et al, 1995; MORIWAKI, 1984).

Os sensores mais usados são de força, potência e emissão acústica. Em uma pesquisa realizada na Alemanha em 1995, onde foram pesquisados 1161 sistemas instalados (com ênfase na indústria automobilística), o sensor de EA se destacou, sendo o mais usado (Figura 2.22).

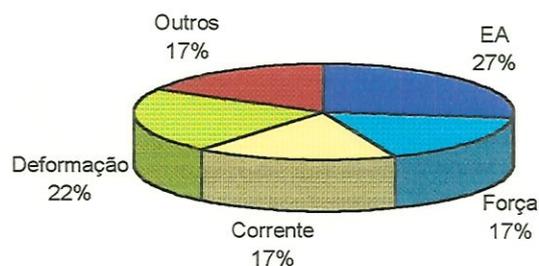


FIGURA 2.22- Sensores mais usados em ambiente de manufatura

(BYRNE et al, 1995)

### 2.3.2- Emissão Acústica no Monitoramento da Usinagem

O uso do sensoriamento baseado em EA para o monitoramento de processos de manufatura vem sendo discutido desde a descoberta da EA na década de 50. Pesquisas ao longo das últimas décadas têm estabelecido a eficácia das metodologias de sensoriamento baseadas em EA no monitoramento da condição da máquina-ferramenta e análise do processo (DORNFELD, 1994; MORIWAKI, 1983).

Vários autores propuseram modelos quantitativos de EA (DIEI & DORNFELD, 1987; KANNATEY-ASIBU JR & DORNFELD, 1981; SAINI & PARK, 1996; TETI & DORNFELD, 1989).

DIEI & DORNFELD (1987) propuseram um modelo quantitativo do pico da voltagem de  $EA_{RMS}$ , incorporando os efeitos do material da ferramenta e a área da superfície fraturada. O modelo, derivado dos resultados da mecânica da fratura elástica linear e da propagação de ondas de tensão em sólidos, mostrou boa concordância com resultados experimentais derivados de torneamento e fresamento. Outros trabalhos em torneamento, como os de KANNATEY-ASIBU JR & DORNFELD (1981), TETI & DORNFELD (1989) e SAINI & PARK (1996), mostraram as correlações entre os parâmetros de corte e nível de EA, incorporando ao modelo as propriedades do material usinado e geometria da ferramenta, indicando a possibilidade de utilização dos modelos de EA no monitoramento de desgaste da ferramenta

Trabalhos com ênfase no estado da ferramenta (desgaste, trinca e quebra) foram realizados por diversos autores, como HEIPLE et al (1994), INASAKI, AINDA & FUKUOKA (1987), LAN & DORNFELD (1984), RAVINDRA, SRINIVASA & KRISHNAMURTHY (1997) e WASCHKIES, SKLARCZYK & HEPP (1994), onde observaram mudanças nas características do sinal em relação a diferentes tipos de desgaste ocorridos na ferramenta (desgaste, trinca e quebra). Quando ocorria desgaste de cratera, o nível de sinal de EA diminuía, devido à mudança do ângulo de saída efetivo. Com desgaste de flanco e quebra da ferramenta, o sinal aumentava, sendo que na quebra surgiam picos de sinal (“bursts”). DINIZ, LIU & DORNFELD (1992), usaram diferentes parâmetros de EA para monitorar a variação

da rugosidade superficial causada por desgaste na ferramenta de corte, durante torneamento de acabamento de aço 1045. Os resultados mostraram que a EA pode ser um bom caminho para se monitorar o crescimento da rugosidade superficial em operações de acabamento. No estabelecimento do fim de vida da ferramenta, a EA se mostrou útil também, pois o sinal apresenta um crescimento acentuado para operações de acabamento e uma queda acentuada para operações de desbaste a medida que o fim de vida da ferramenta está próximo (DINIZ & PIGARI, 1996).

A técnica de EA foi usada também na investigação da microplasticidade e da formação de cavacos (FISHER & LALLY, 1967; SUKVITTAYAWONG & INASAKI, 1991; UEHARA & KANDA, 1984). Nestes trabalhos, os autores lidam com a natureza da EA que é radiada do ponto de corte no corte de metais e também com a relação entre o mecanismo de formação de cavaco e os sinais de EA, a fim de se obterem características suficientes para possibilitar o monitoramento em tempo real do estado de corte.

A EA vem sendo usada amplamente na retificação (AKBARI et al, 1995; BIFANO & YI, 1992; HUNDT et al, 1994; OLIVEIRA, J.F.G., DORNFELD, D.A., WINTER, B., 1994; WEBSTER, DONG & LINDSAY, 1996; WEBSTER, MARINESCU & BENNETT, 1994), com resultados bastantes encorajadores, onde é empregada no monitoramento do estado do processo, estado de desgaste do rebolo e na detecção do contato peça/rebolo. O Laboratório de Retificação da USP/EESC vem obtendo resultados bastante positivos neste aspecto.

Outros processos que vêm utilizando esta técnica são usinagem por jato abrasivo (WILLIAMS, 1998), onde os sinais de EA são correlacionados com a taxa de fluxo volumétrico e diâmetro de orifícios obtidos, o processo de furação (DONG,

AU & MARDAPITTAS, 1994), onde o estado da EA é útil para o entendimento do mecanismo do processo de furação e das características do processo tribológico atuante, e o processo de lapidação (CHANG, HASHIMURA & DORNFELD, 1996) e polimento (DORNFELD & LIU, 1993), onde a viabilidade do uso de EA para o monitoramento deste processo é estabelecida.

### 2.3.3- Monitoramento da Usinagem de Ultraprecisão através de Emissão Acústica

Uma das dificuldades fundamentais na utilização da usinagem de ultraprecisão, é a falta de entendimento total dos mecanismos básicos do processo. Este problema se torna ainda maior para usinagem de materiais frágeis. Segundo JASINEVICIUS (1998), para se otimizar o processo de usinagem de tais materiais, é preciso elucidar os parâmetros de usinagem necessários e os mecanismos envolvidos na relação remoção de material/danos superficiais e subsuperficiais operantes durante o processo de corte. Como EA é um fenômeno intrínseco do material e o torneamento com diamante se aproxima muito de um processo ideal, espera-se que a correlação entre as características da zona de deformação e a energia de EA sejam próximas. Logo, a fim de se minimizarem os erros de usinagem e aumentar a eficácia do processo, um esquema de controle e monitoramento é necessário.

Apesar de ser uma técnica relativamente nova, o monitoramento na usinagem de ultraprecisão parece ser muito promissor (KO & CHO, 1994; LIU, 1991). O monitoramento do sinal de EA gerada durante uma operação deste tipo de usinagem mostrou-se muito sensível a elementos de remoção de material, como contato por

atrído, deformação plástica, micro-trincas, fraturas, entre outros. Além destas características, EA possui outras vantagens, como baixo custo, alta sensibilidade, flexibilidade na montagem, instalação e processamento simples, tornando-se uma técnica com grande potencial de aplicação, tanto na usinagem convencional como na de ultraprecisão. Por exemplo, pode ser visto na Figura 2.23 a diferença entre o sinal  $EA_{RMS}$  medido no torneamento com diamante e no convencional, obtidos em um torneamento excêntrico, onde é gerada uma profundidade de usinagem de variação senoidal.

Mesmo com tantas vantagens, existem ainda poucos trabalhos em que esta técnica de monitoramento tenha sido empregada na usinagem de ultraprecisão, mais especificamente no torneamento com diamante. CHOI & CHOI (1997), GAO & FRIEDRICH (1994), KLAIBER et al (1990), LIU (1991) E LIU & DORNFELD (1996) são alguns autores que aplicaram o monitoramento de EA na usinagem de materiais dúcteis, como alumínio e cobre.

No trabalho realizado por LIU (1991) em alumínio (também LIU & DORNFELD, 1996), o autor propôs um modelo quantitativo para estimar a energia de EA liberada no torneamento com diamante, que contém a energia das zonas de corte primária (I), secundária (II) e terciária (III). Na zona terciária é considerado o fenômeno de sulcamento (“ploughing”). As áreas de interesse na geração de EA e a simplificação do processo da zona terciária em um processo de laminação (“rolling”) podem ser vistos na Figura 2.24, onde  $t_0$  é a profundidade de usinagem nominal,  $\delta$  é a profundidade de penetração da aresta de corte e  $U$  é a velocidade.

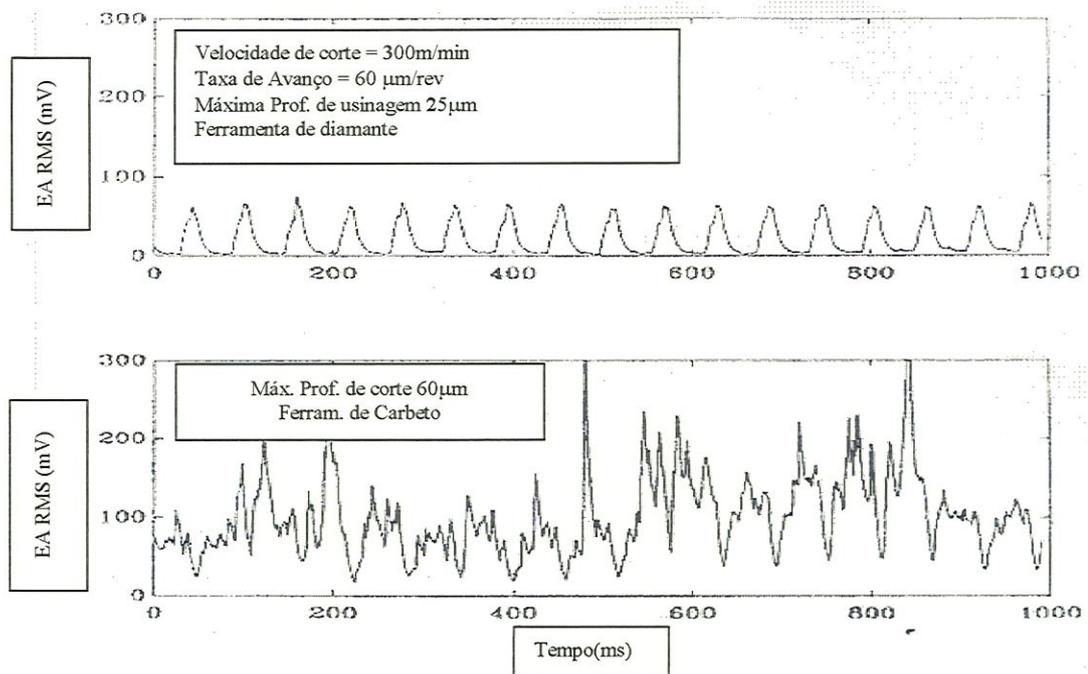


FIGURA 2.23- Diferença de sinal de  $EA_{RMS}$  entre a usinagem de ultraprecisão e a convencional (LIU, 1991).

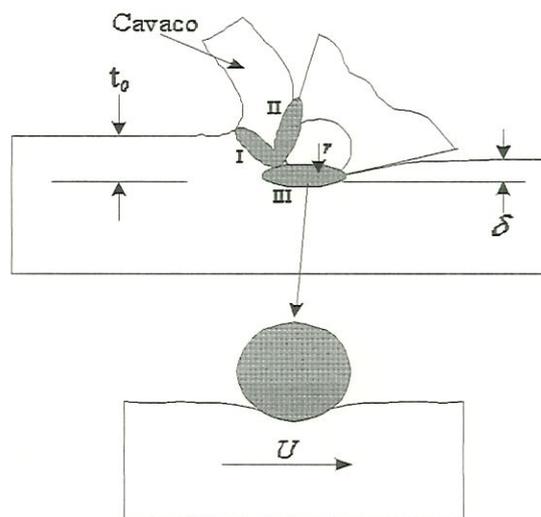


FIGURA 2.24 - As áreas de interesse na geração de EA e a simplificação do processo da zona terciária em um processo de laminação (“rolling”) (LIU, 1991).

Segundo LIU (1991), quando a espessura de corte é da mesma ordem de magnitude do raio da aresta de corte (Figura 2.25), a deformação plástica sob a aresta arredondada não pode ser desprezada como uma fonte de EA. Isto é, o mecanismo de “ploughing” na zona terciária deve ser considerado no modelamento da energia de EA liberada na usinagem de ultraprecisão.

Mesmo em profundidades muito pequenas, como  $a_p < 100\text{nm}$ , o autor observou um certo nível de sinal de EA, e que este nível aumentava à medida que se aumentava a espessura de corte (Figura 2.26).

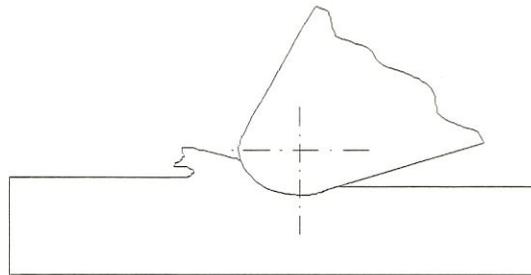


FIGURA 2.25 – Ilustração da usinagem de ultraprecisão quando a profundidade de usinagem é menor ou do mesmo tamanho que o raio da aresta de corte.

Os parâmetros do modelo que correlaciona os parâmetros de corte com o nível de energia de EA, incluem propriedades dos materiais como dureza, resistência ao cisalhamento, coeficiente de encruamento e módulo de Young, e condições de corte como avanço, profundidade e velocidade, e geometria da ferramenta, como raio de ponta e raio da aresta de corte.

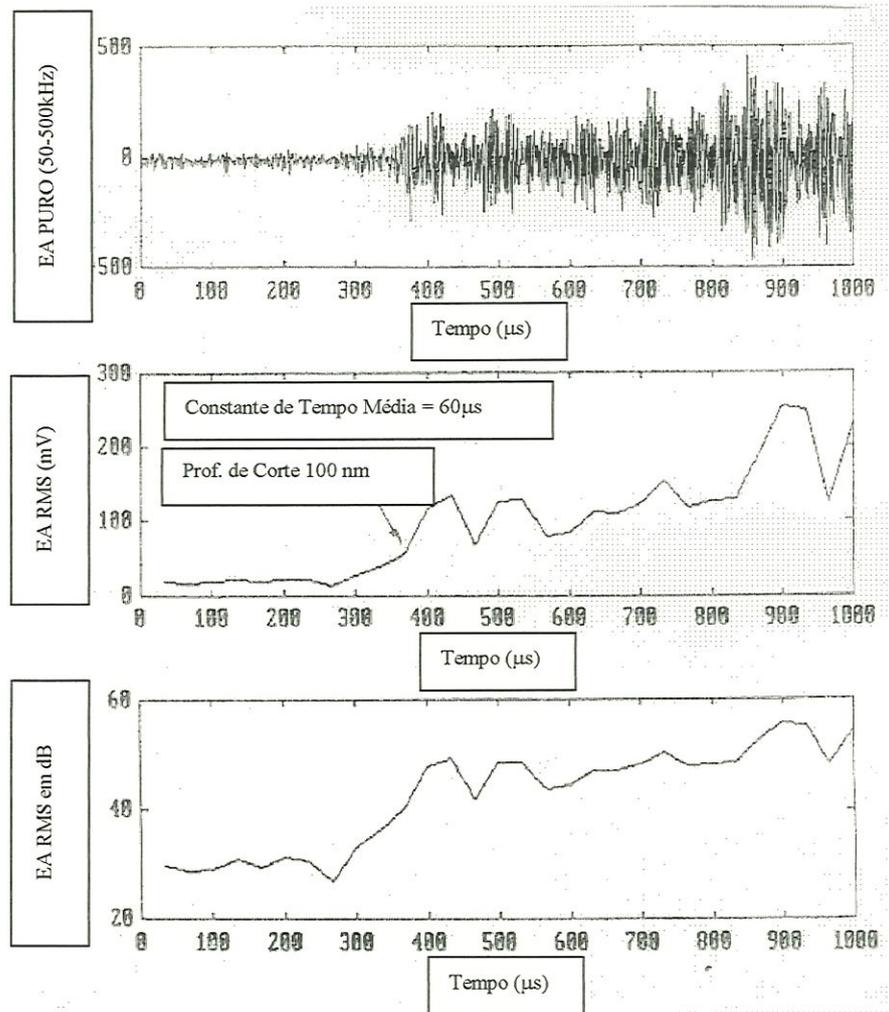


FIGURA 2.26- Sinal de EA durante o torneamento de ultraprecisão, com o aumento da profundidade de usinagem (LIU, 1991).

As derivações completas das equações que se seguem podem ser encontradas em LIU (1991) ou LIU & DORNFELD (1996). As energias liberadas nas zonas primária e secundária são, respectivamente:

$$\dot{W}_1 \propto \tau_s \frac{\alpha}{\cos(\phi - \alpha) \sin \phi} AU \quad (8)$$



$$\dot{W}_2 \propto \tau_s \frac{\text{sen } \beta}{\cos(\phi + \beta - \alpha) \text{sen } \phi} \frac{\text{sen } \phi}{\cos(\phi - \alpha)} AU \quad (9)$$

onde  $\tau_s$  é a tensão de cisalhamento,  $\alpha$  é o ângulo de saída,  $\phi$  é o ângulo de cisalhamento,  $U$  é a velocidade de corte paralela à superfície de trabalho,  $A$  é a área de corte normal à velocidade de corte,  $\beta$  é o ângulo de atrito.

A energia liberada na zona terciária, incluindo o fenômeno de “ploughing”, é:

$$\dot{W}_3 = \min\left(2\tau_s \frac{\sqrt{1 - (1-d)^2} \theta_2 \text{sen } \theta_1 U}{\text{sen } \theta_2 \text{sen}(\theta_2 - \theta_1)}\right) \quad (10)$$

onde  $d$  é a profundidade de usinagem, e  $\theta$  é determinado na formulação do processo de laminação (ver LIU, 1991).

Logo, a taxa total de energia de EA no torneamento com diamante pode ser escrita como:

$$EA_{RMS}^2 \propto \dot{W}_{\text{todos}} = \int_0^L [C_1 \dot{W}_1(x) + \dot{W}_2(x) + \dot{W}_3(x)] dx \quad (11)$$

onde  $C_1$  é um fator de atenuação, já que há dispersão de certa quantidade de emissão acústica na interface ferramenta/peça.

Para analisar o modelo, o autor propôs uma metodologia especial chamada torneamento excêntrico, para coletar uma faixa de valores de profundidade de usinagem de décimos de micrometros. A profundidade de usinagem varia de forma

senoidal. Os resultados obtidos foram consistentes com os valores estimados. Muitos métodos de condicionamento foram usados para caracterizar a resposta de EA no torneamento com diamante, como sinal  $EA_{RMS}$ , espectrograma do sinal de EA puro, desvio-padrão do sinal  $EA_{RMS}$  e  $EA_{RMS}$  do sinal puro filtrado com filtro passa-banda.

As análises feitas por LIU (1991) mostraram alta sensibilidade do sinal de EA a pequenas profundidades de usinagem, em alguns casos menores que 100nm.

Com EA, a mudança do mecanismo de remoção de “ploughing” para corte propriamente dito pôde ser observada através da diminuição dos componentes de alta frequência e do aumento drástico na resposta em outras faixas de frequência. Isto significa que o sinal de EA é um bom candidato para o monitoramento do torneamento com diamante.

Outros autores também estudaram a sensibilidade da EA no torneamento de ultraprecisão. KLAIBER et al (1990) também observaram a sensibilidade de EA para pequenas mudanças na profundidade de usinagem avaliadas durante a usinagem, através da variação da potência do sinal de EA. Os autores já indicavam uma possível influência do efeito de “ploughing” nos mecanismos de geração de superfície e do sinal de EA. Observaram ainda que o aumento da profundidade de usinagem e avanço, assim como no trabalho de LIU (1991), aumentava o sinal de  $EA_{RMS}$ .

GAO & FRIEDRICH (1994) também observaram a influência dos parâmetros de corte no sinal de  $EA_{RMS}$ . Através de uma faixa de valores para avanço, profundidade e velocidade de corte e ângulos de saída da ferramenta, notaram que os níveis de EA variavam à medida que os parâmetros de entrada de corte também eram variados, como pode ser visto na Figura 2.27.

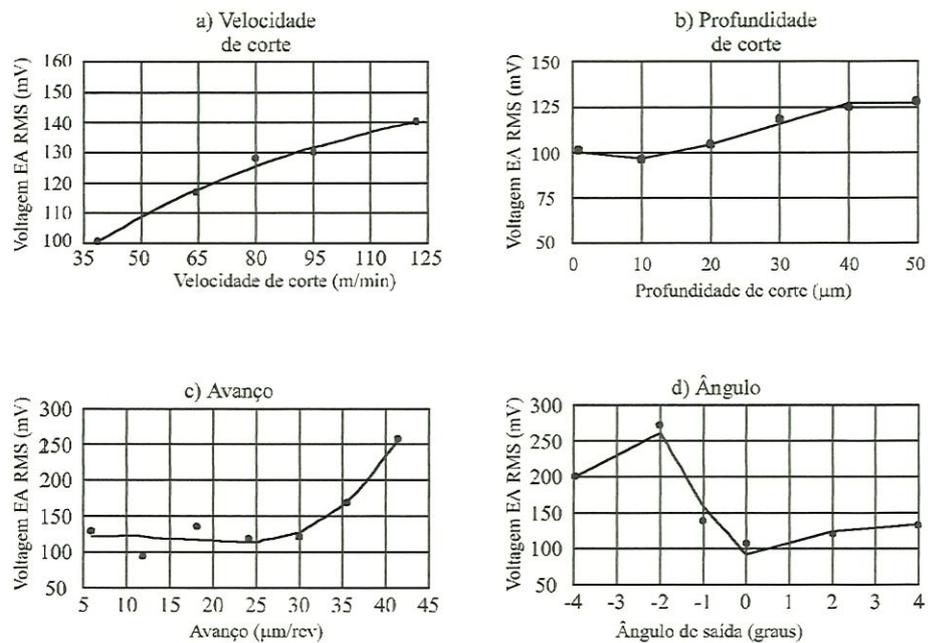


FIGURA 2.27- Influência dos parâmetros de corte no sinal EA<sub>RMS</sub> (GAO & FRIEDRICH, 1994)

Assim como nos outros trabalhos em torneamento de ultraprecisão, os autores verificaram que, torneando uma peça de alumínio 6061-T6 com uma ferramenta Compax TPG 321, o valor de EA<sub>RMS</sub> aumenta quase que linearmente com o aumento da velocidade de corte (Figura 2.27.a). Similar ao teste de velocidade de corte, o valor EA<sub>RMS</sub> mostrou uma tendência de aumento com o aumento da profundidade de usinagem e avanço. No caso do avanço, o aumento tornou-se mais evidente para avanços maiores que 30 μm/rev (Figuras 2.27.b e 2.27.c). Um resultado interessante foi o obtido com os ângulos de saída da ferramenta. Para valores positivos, o valor EA<sub>RMS</sub> aumenta quase linearmente com o aumento do ângulo; já para valores de ângulos negativos, os autores verificaram que, para a faixa de -4° a -2°, o valor EA<sub>RMS</sub> aumenta e, na faixa de -2° a -1°, o valor cai bruscamente (Figura 2.27.d). Segundo os

autores, uma possível explicação a esta variação poderia ser que, com a mudança do ângulo de saída, a profundidade de usinagem muda simultaneamente de uma pequena parcela. Mas, devido à inconsistência dos resultados, os próprios autores ressaltam a necessidade de mais experimentos para se esclarecer o fenômeno. Ainda segundo eles, a razão da escolha do sinal  $EA_{RMS}$  como um indicador para o monitoramento do processo de torneamento com diamante é que ele fornece uma medida direta do volume de energia do sinal.

Deste modo, segundo GAO & FRIEDRICH (1994), pelo uso do sinal de EA como um índice, pode-se estabelecer um controle adaptativo para melhor monitorar o processo de torneamento de ultraprecisão.

Portanto, com o potencial demonstrado com o uso da EA no monitoramento do torneamento de ultraprecisão de metais, torna-se interessante a proposta de testar esta técnica no torneamento de materiais frágeis, uma vez que as condições de corte encontram-se em torno de valores submicrométricos.

A complexidade dos mecanismos de remoção e a diversidade das propriedades mecânicas entre os materiais frágeis restringe a seleção adequada das condições de usinagem de valores dimensionalmente muito pequenos, os quais são difíceis de serem obtidas em máquinas convencionais e com ferramentas que não possuam afiação adequada para estas dimensões de corte. Logo, para o torneamento de materiais frágeis, segundo SANCHEZ (1997), o sistema de monitoramento deve ter capacidade suficiente para detectar o modo de remoção, o qual está relacionado à formação de trincas em escalas reduzidas.

Entre os processos onde a EA foi utilizada no monitoramento de materiais frágeis, podemos citar a retificação (AKBARI et al, 1995; BIFANO & YI, 1992),

indentação (AKBARI et al, 1994; BERGNER, 1996, TANIKELLA & SCATTERGOOD, 1995) e riscamento (AKBARI et al, 1993; COELHO et al, 1996; MOON, LEE & DORNFELD, 1999; SANCHEZ, 1997).

Na retificação de materiais frágeis, BIFANO & YI (1992) retificaram corpos de vidro e germânio com rebolos de grãos bastante finos (4 a 8 $\mu$ m), em ligante metálico (bronze), sob taxas de mergulho de 2 a 150nm/rev do rebolo, em uma máquina de ultraprecisão. Os ensaios realizados mostraram, para as mesmas condições de usinagem, a diminuição da energia específica de EA, definida como a razão entre a energia de EA e a correspondente taxa de remoção de material, com o aumento da taxa de remoção do material, que proporciona um aumento da retificação em modo frágil. Em um trabalho de AKBARI et al (1995), os autores observaram que na retificação em modo frágil, o nível de  $EA_{RMS}$  é maior que no modo dúctil, indicando que a energia e amplitude de EA aumenta quando existe mais material sofrendo trincas (maior atividade frágil). Entretanto, face à inconsistência destes resultados (ambos os trabalhos), os autores recomendam investigações adicionais, até mesmo em relação ao efeito de cada parâmetro de corte no nível de sinal de EA.

A indentação pode ser considerada o modelo de interação mais simples entre uma ferramenta de diamante e uma superfície, assemelhando-se à interação ferramenta/peça. Em contraste com a indentação, no riscamento é acrescentado movimento linear ao longo do contato entre o indentador e a peça. Este modelo dos ensaios de riscamento permite melhor aproximação tanto do torneamento com diamante, no entendimento dos mecanismos de remoção, quanto de outros processos onde há mecanismos de remoção de material, como retificação, lapidação e polimento.

Na indentação de vidro, TANIKELLA & SCATTERGOOD (1995) conseguiram identificar os pontos de iniciação de trincas média, radial e lateral durante o ciclo de carregamento e descarregamento, através do monitoramento de EA. A correlação entre a carga de indentação e o sinal de EA para um indentador Vickers concordou com observações de seqüências de iniciação de trincas usando-se um microscópio óptico. BERGNER (1996) conseguiu identificar a ocorrência de eventos de fratura durante o carregamento com um indentador Vickers de uma amostra de silício monocristalino, não observáveis de outra forma. Também identificou sinais referentes à formação de trincas laterais no vidro. AKBARI et al (1994), durante testes de indentação em material cerâmico (alumina), correlacionaram diferentes tipos de sinais com observações microscópicas, a fim de identificar deformação plástica ou fenômeno de trincamento (fratura frágil). Verificaram que a EA gerada por trincas era de alta amplitude, longa duração e alta frequência, comparada com a gerada durante deformação plástica. A Figura 2.28 mostra um esquema dos resultados obtidos nesse trabalho. Segundo os autores, este método de monitoramento é eficaz na determinação do limite de carga para o surgimento de trincas.

No riscamento de silício, MOON, LEE & DORNFELD (1999) investigaram o comportamento do sinal de EA, tanto o bruto como o RMS. Os autores identificaram três regimes de corte no sinal: em vazio, modo dúctil e modo frágil, com aumento do sinal a medida que ocorria a transição do modo de remoção dúctil para frágil. AKBARI et al (1993) observaram que as atividades de EA aumentavam com o aumento da carga de riscamento, onde havia a mudança do modo dúctil para frágil. Além disso, os eventos de alta amplitude eram de alta energia também, podendo,

portanto, ser relacionados ao grau de defeitos e trincas da peça. Fora este aumento de atividades de EA provocados por aumento na remoção frágil, os autores verificaram que no modo dúctil, os eventos tinham duração menor que  $60\mu\text{s}$ , enquanto que no modo frágil, os eventos tinham longa duração, concordando com ensaios de indentação feitos no mesmo tipo de material.

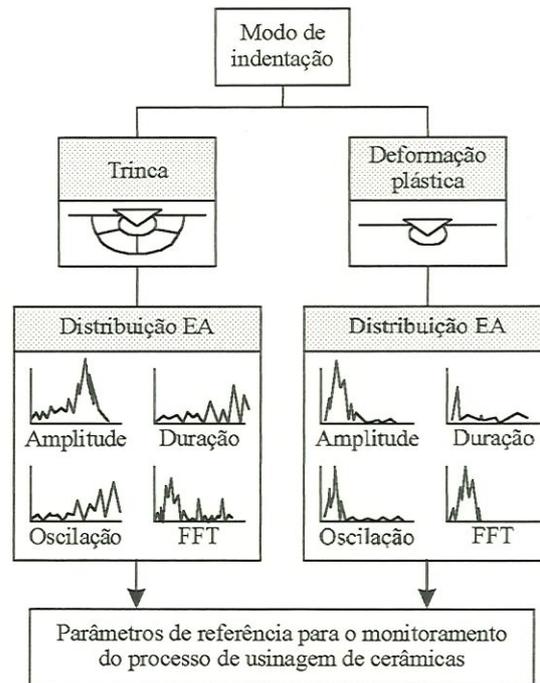


FIGURA 2.28 – Parâmetros de referência para o monitoramento do processo de usinagem de cerâmicas (AKBARI et al, 1994).

SANCHEZ (1997) também observou que o nível de EA e os defeitos aumentavam com o aumento da profundidade de riscamento. Em seu trabalho, os maiores níveis de energia de  $EA_{RMS}$  observados correspondiam aos maiores defeitos superficiais, os quais estavam presentes na faixa de frequências em torno de 2kHz dos maiores espectros (sinal RMS), no riscamento em alumina. Esses defeitos superficiais eram causados por trincas, com lascamentos laterais. No riscamento em vidro,

SANCHEZ (1997) observou um comportamento geral próximo ao da alumina, principalmente quanto à taxa de crescimento dos sinais com o aumento gradativo do número de passes do riscador e intensidade de carga. Assim como na alumina, no vidro as cargas de menores intensidades geraram menor acúmulo de defeitos e remoção por fratura, mantendo os sinais de EA em níveis próximos aos do início do riscamento. Já para as cargas mais altas, notaram-se sinais de amplitudes maiores e crescimento abrupto de EA, como pode ser visto na Figura 2.29, correspondendo a defeitos severos observados, como lascamentos.

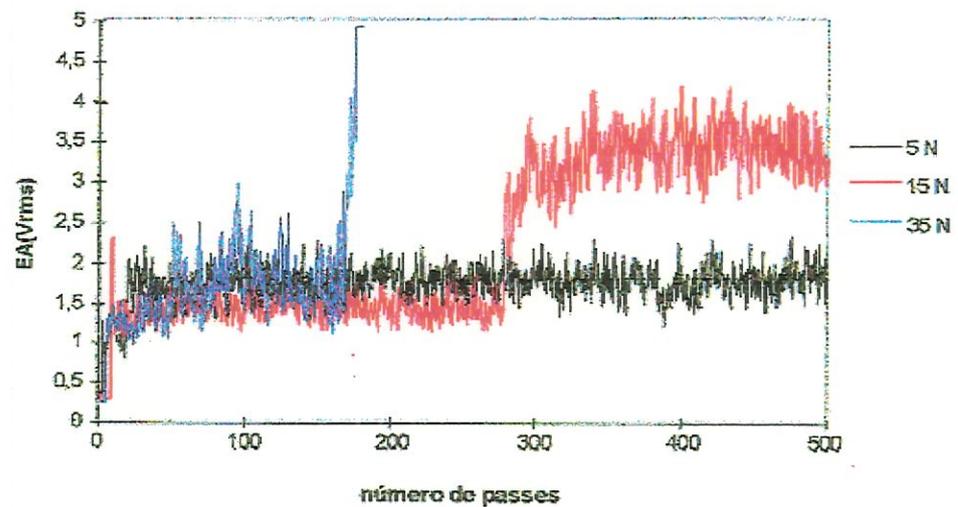


FIGURA 2.29 – Variação da EA em relação à variação da intensidade de carga (SANCHEZ, 1997)

Como pôde ser observado nos trabalhos citados, retificação, indentação e riscamento de materiais frágeis, parece haver uma tendência de aumento dos níveis de EA, à medida que se aumenta o fenômeno de remoção frágil. As altas amplitudes e níveis de energia indicam um processo onde o surgimento de trincas predomina.

Apesar da falta de resultados em torneamento de materiais frágeis, a utilização da EA em outros processos oferece segurança para que o monitoramento do torneamento com diamante de materiais frágeis através da EA seja estudado. A necessidade de se obterem dados sobre estas duas técnicas relativamente novas, é o maior incentivo deste trabalho.

## 2.4- Considerações Finais

Uma das dificuldades fundamentais na utilização da usinagem de ultraprecisão, é a falta de um entendimento total sobre os mecanismos básicos do processo. Este problema se torna ainda maior para usinagem de materiais frágeis. É preciso elucidar os parâmetros de usinagem necessários e os mecanismos envolvidos na relação remoção de material/danos superficiais e subsuperficiais operantes durante o processo de corte. Como EA é um fenômeno intrínseco do material e o torneamento com diamante se aproxima muito de um processo ideal, espera-se que a correlação entre as características da zona de deformação e a energia de EA sejam próximas.

Os trabalhos realizados pelos pesquisadores citados, demonstram que o sinal de EA gerada durante o torneamento de ultraprecisão de materiais dúcteis mostrou-se muito sensível a elementos de remoção de material, como atrito, “ploughing” e corte propriamente dito. As análises feitas por LIU (1991), por exemplo, mostraram alta sensibilidade do sinal de EA a pequenas profundidades de usinagem, em alguns casos menores que 100nm.

Com EA a mudança do mecanismo de remoção por “ploughing” para corte propriamente dito pode ser observada através da diminuição dos componentes de alta frequência e do aumento drástico na resposta em outras faixas de frequência. Isto significa que o sinal de EA é um bom candidato para o monitoramento do torneamento com diamante.

Em trabalhos de retificação, indentação e riscamento de materiais frágeis, parece haver uma tendência de aumento dos níveis de EA, à medida que se aumenta o fenômeno de remoção frágil. As altas amplitudes e níveis de energia indicam um processo onde o surgimento de trincas predomina.

A grande motivação deste trabalho vem do interesse em se conhecer o comportamento da EA quando um material frágil é torneado com ferramenta de diamante, em uma máquina-ferramenta de ultraprecisão. A intenção é apresentar, pela primeira vez, sinais de EA obtidos do torneamento de ultraprecisão de uma amostra de silício monocristalino em três regimes de corte distintos: dúctil, dúctil/frágil e totalmente frágil.

Foram usinadas amostras de silício monocristalino com ferramenta de ponta única de diamante com determinada geometria e parâmetros de corte. O sinal de emissão acústica emitido durante o processo foi correlacionado com o acabamento e integridade superficial da peça, obtidos através de rugosímetro e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Também foi investigado o comportamento do sinal de emissão acústica em relação à variação dos seguintes parâmetros: avanço e profundidade de usinagem.

Assim, acredita-se que o trabalho trará um melhor entendimento do comportamento da EA durante o torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis, investigando-se a viabilidade do monitoramento da usinagem de tais materiais.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA EXPERIMENTAL

#### 3.1- Planejamento de Experimentos

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

Neste trabalho, procurou-se analisar o comportamento dos sinais de EA obtidos no *torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis*.

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

Os parâmetros de corte variados no experimento foram o avanço por revolução ( $f$ ) e a profundidade de usinagem ( $a_p$ ). Tais parâmetros foram escolhidos e combinados de modo que três modos distintos de remoção foram obtidos: totalmente dúctil, dúctil/frágil e totalmente frágil. A escolha dos parâmetros foi baseada na

extensa gama de resultados já obtidos no Laboratório de Engenharia de Precisão (EESC/USP). A Tabela 3.1 mostra os parâmetros de corte utilizados.

TABELA 3.1 – Parâmetros de corte utilizados.

Parâmetros de corte	
$f(\mu\text{m/rev})$	$a_p(\mu\text{m})$
1	1
2,5	5
3	10

A velocidade do eixo-árvore foi mantida constante em 1000rpm. A combinação entre os parâmetros resultou num planejamento com 18 experimentos, com 2 réplicas cada, totalizando 36 ensaios de usinagem.

Os ensaios consistiam em usinar a amostra de silício monocristalino com determinada condição de corte, através de Ensaios de “Recuo Rápido”. O ensaio consiste no recuo rápido da placa de fixação (eixo-árvore), imprimindo o perfil da ferramenta na peça, criando uma região denominada ombro não-cortado (“uncut shoulder”) (mais detalhes ver item 2.1.5).

O aparato experimental, representado na Figura 3.1, consiste basicamente do Torno ASG 2500 de ultraprecisão e do sistema de aquisição, que envolve o sensor (montado sobre o porta-ferramentas), a unidade de monitoramento SENSIS BM 12 (detalhada mais adiante) e um computador com um cartão de aquisição de dados DAQ Card 700, da NATIONAL INSTRUMENTS. Quanto à posição de fixação do sensor, foram realizados testes precedentes aos ensaios principais, a fim de se definir o melhor local a ser fixado, que foi o porta-ferramentas (Figura 3.2).

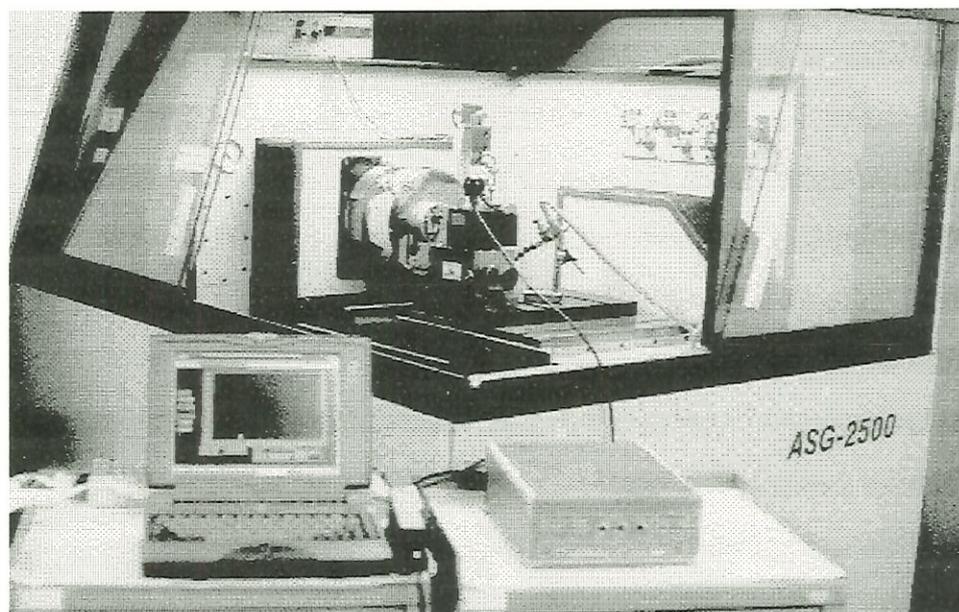


FIGURA 3.1 – O torno ASG2500 e o sistema de aquisição de sinal.

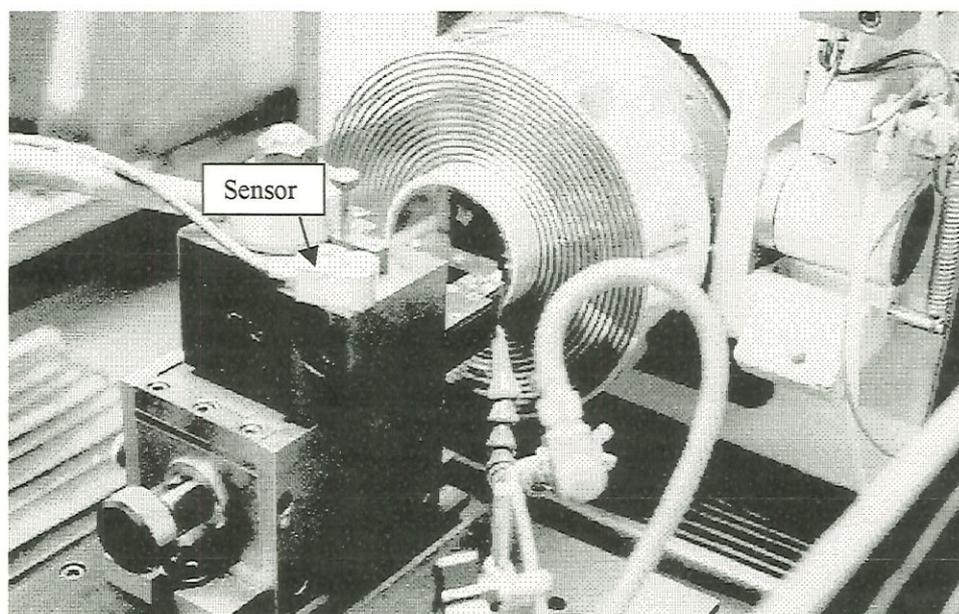


FIGURA 3.2 – Detalhe da fixação do sensor de EA fixado sobre o porta-ferramentas.

Com os resultados obtidos, procurou-se correlacionar os sinais de EA com o modo de remoção atuante, bem como o comportamento da EA face a variação de

alguns parâmetros de corte. As condições da superfície foram analisadas através da rugosidade superficial média (Ra) (obtidas através do perfilômetro mecânico Form Talysurf) e das imagens obtidas na Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

### 3.2 – Características e Preparação da Amostra de Silício

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

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

Propriedades	Valor
Ponto de Fusão (°C)	1420
Densidade $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2328
Dureza H (GPa)	10
Módulo de Young (E) (GPa)	(100): 129,5
	(111): 186,5
Módulo de Cisalhamento (G) (GPa)	(100): 79,0
	(111): 57,5

As amostras de silício utilizadas têm orientação cristalográfica (100) e (111), todas tipo p. Uma amostra (100) possui 76,2mm de diâmetro, sendo que as outras duas ((100) e (111)) possuem seções de 13mm x 13mm.

Todas as amostras eram previamente polidas. A rugosidade superficial medida da amostra polida (6,0nm) através do Form Talysurf é mostrada na Figura 3.3.

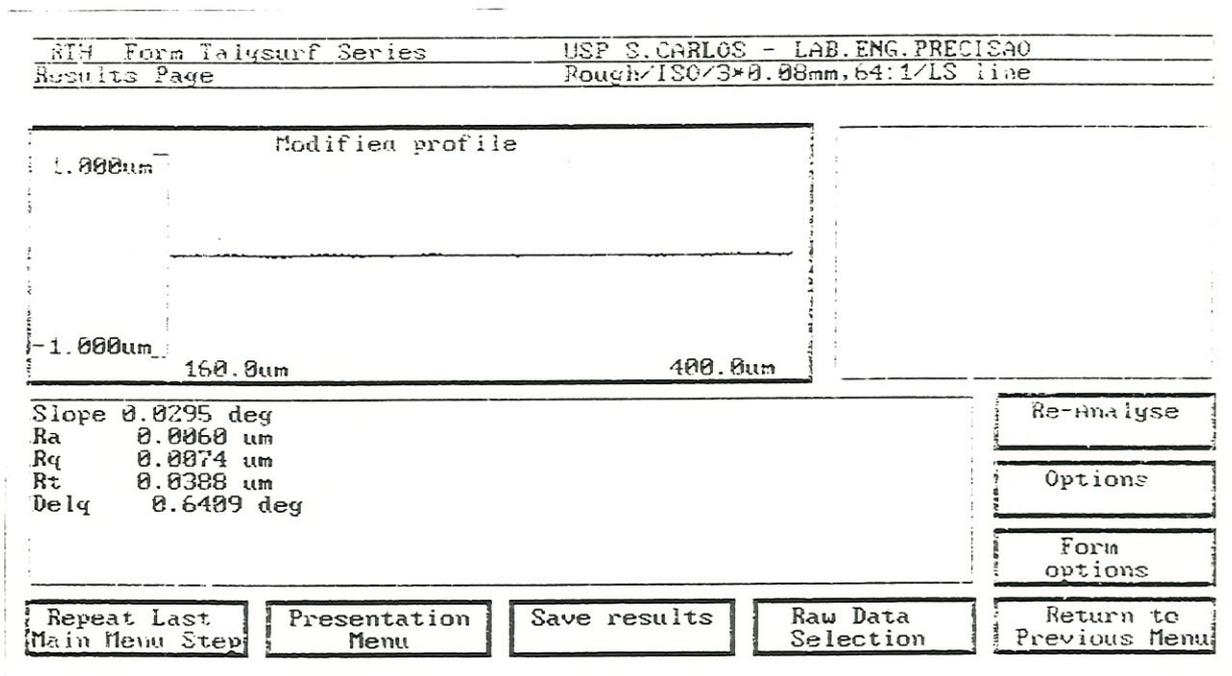


FIGURA 3.3 – Medição da Rugosidade Superficial através do perfilômetro Form Talysurf da amostra polida.

As amostras de silício foram coladas com esmalte sintético em suportes de alumínio previamente torneados, Figura 3.4, de forma a se obter bom acabamento superficial. Tomou-se grande cuidado na colagem de tais amostras para se evitar desvios de forma e paralelismo. Mesmo assim, antes que os sinais de EA fossem coletados, foi torneada uma superfície de referência e, a partir desta, foram coletados

os sinais de EA. A superfície foi torneada para correção de eventuais erros de planicidade e paralelismo.



FIGURA 3.4 – As amostras de silício usinadas.

### 3.3 – O Torno ASG 2500

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

precisão de posicionamento). Um Controle Numérico Computadorizado (CNC) ALLEN BRADLEY 8200 é utilizado para controlar simultaneamente os deslocamentos dos eixos X e Z da máquina. Neste ponto, vale a pena ressaltar que não existe superposição dos eixos, com o objetivo de se evitar a propagação dos erros de posicionamento. As posições dos eixos são monitoradas por transdutores interferométricos a laser, da HEWLETT-PACKARD, com retroalimentação ao controlador. Os deslocamentos dos eixos são suportados por guias hidrostáticas. Também a fixação das peças a serem usinadas é especial, presas à placa através de vácuo (cerca de 70kPa), como pode ser visto na Figura 3.5.

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

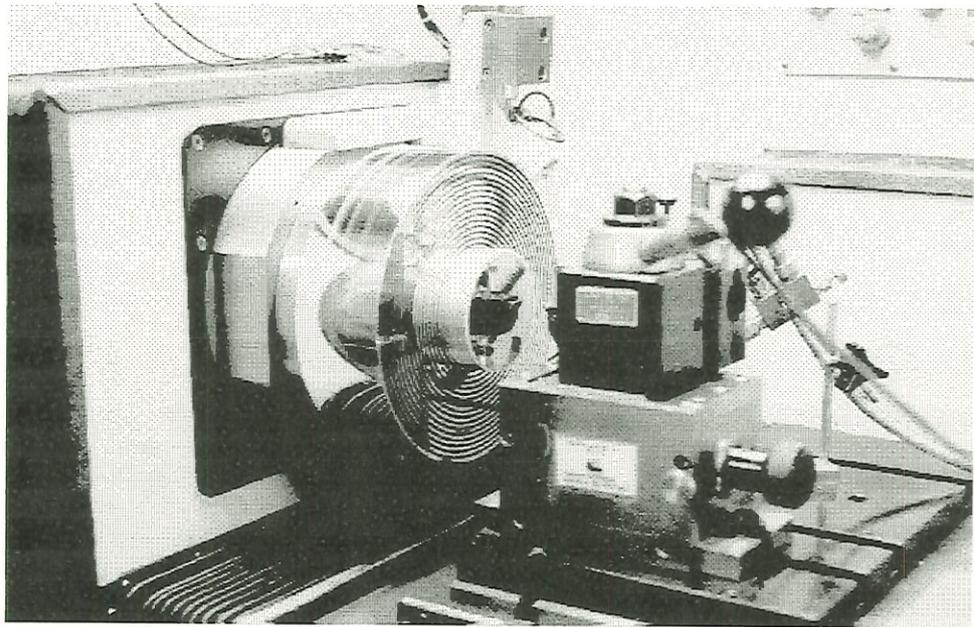


FIGURA 3.5 – A amostra de silício fixada. A fixação no eixo-árvore se dá através de vácuo.

### 3.4 – A Ferramenta de Diamante: Características Geométricas

A ferramenta de diamante monocristalino é uma das peças fundamentais na usinagem de ultraprecisão. Junto com mancais aerostáticos, controle ultrapeciso de posicionamento e elevada rigidez, preenchem os requisitos necessários a este tipo de usinagem, onde acabamentos superficiais de ordem nanométrica são freqüentes.

As vantagens e desvantagens, bem como os tipos de materiais que podem ser usinados com este tipo de ferramenta e os tipos de desgastes existentes foram citados no item 2.1.2.

A ferramenta utilizada foi uma CO30MG da CONTOUR FINE TOOLING (EUA) e suas principais características geométricas estão listadas na Tabela 3.3.

TABELA 3.3 – Características geométricas da ferramenta de diamante CO30MG.

Ferramenta CO30MG	
Ângulo de saída $\gamma$ (graus)	-2,5
Ângulo de folga $\alpha$ (graus)	12
Raio de ponta $r_p$ (mm)	0,776

Para efeito de comparação, foram feitas MEV da ferramenta antes e depois dos ensaios, a fim de indentificar desgastes na aresta de corte. Estas micrografias serão apresentadas no próximo capítulo.

### 3.5 – O Sistema de Aquisição e o Sensor de Emissão Acústica BM 12

Como característica principal da EA, pode-se citar altas frequências dos sinais, sendo menos sensíveis a ruídos e vibrações de baixa frequência presentes no ambiente de manufatura. Por outro lado, devido a esta característica, é necessário que as taxas de aquisição e capacidade de memória dos equipamentos utilizados sejam muito maiores do que as utilizadas para outros tipos de sistemas de monitoramento, como força e aceleração (MARINELLI FILHO, 1997). Uma possível solução para este tipo de problema é a utilização do sinal RMS (“root mean square” – raiz média quadrática) da EA, que será utilizado neste trabalho.

O esquema do banco de ensaios está ilustrado na Figura 3.6, onde pode ser visto o Torno ASG 2500, o CNC ALLEN BRADLEY 8200 e o sistema de aquisição de sinais, com um “LapTop” PENTIUM 100 MHz e uma unidade de monitoramento SENSIS modelo BM 12.

O sistema de aquisição é composto de um sensor piezoelétrico e , como citado, de um computador com um cartão de aquisição DAQ Card 700, da NATIONAL INSTRUMENTS (com máxima velocidade de aquisição de 100kS/s, ou seja,  $1 \times 10^5$  pontos por segundo), e de um aparelho SENSIS BM 12. Com esta montagem os sinais gerados pelo sensor são amplificados, filtrados (filtro de frequência passa-alta 2,5kHz) e calculados seus valores RMS com constante de tempo de aproximadamente 70ms.

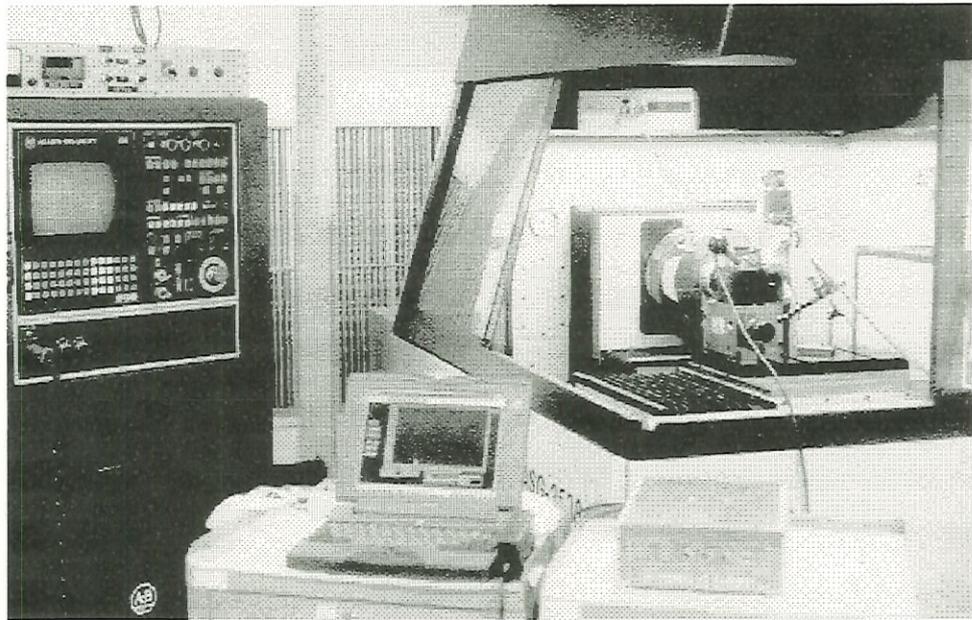


FIGURA 3.6 – Detalhe do aparato experimental, onde pode ser visto o torno ASG2500, o CNC ALLEN BRADLEY 8200 e o sistema de aquisição de sinais, constituído do LapTop PENTIUM 100Mhz e da unidade de monitoramento SENSIS BM12.

Os dados são transferidos para o computador com o auxílio do software “LABVIEW” (também da NATIONAL INSTRUMENTS). Com o auxílio do “EXCEL” são analisados e dispostos na forma de gráfico de EA pelo número de pontos obtidos.

A unidade de monitoramento SENSIS BM 12 pode ser vista na Figura 3.7. Na parte inferior do aparelho, pode ser observado uma seqüência de leds que permite avaliar o nível de ruído externo, a intensidade e amplificação do sinal, bem como seu comportamento geral.

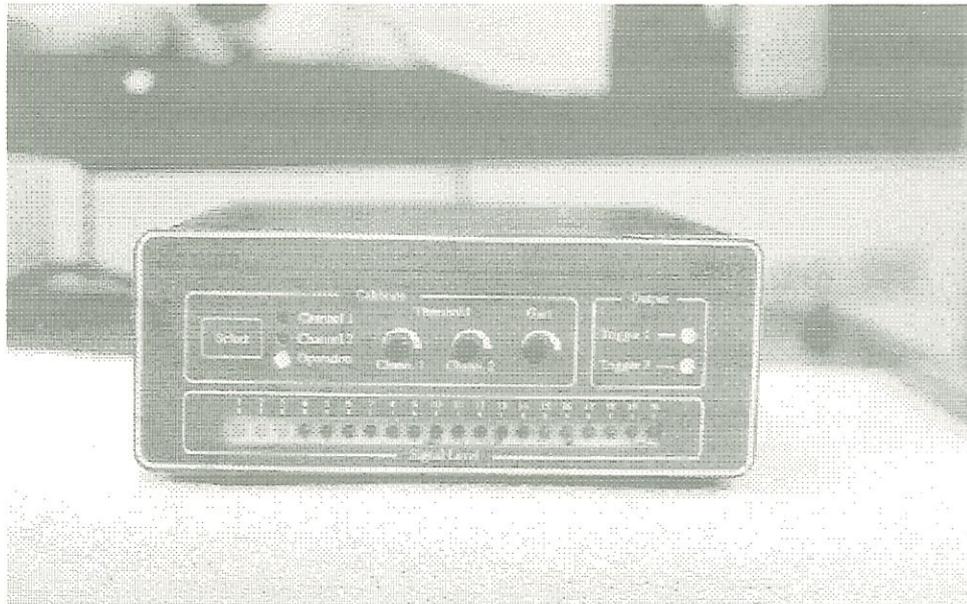


FIGURA 3.7 – Unidade de monitoramento SENSIS BM12.

O SENSIS BM 12 é totalmente analógico, composto por um circuito para a amplificação do sinal bruto de EA (40dB ou 60dB), onde podem ser acoplados filtros de frequência, definindo-se a faixa que se deseja operar. O cálculo do valor RMS da EA já filtrado e amplificado é feito pelo circuito principal. Os valores exatos das constantes de tempo, utilizadas neste cálculo não são acessíveis ao usuário, mas podem ser avaliadas pela observação do comportamento do sinal através da seqüência de leds (MARINELLI FILHO, 1997). Por exemplo, se o sinal é muito lento, os valores da constante de tempo estão elevados.

Na aquisição dos sinais de EA, devido ao tipo de sensor utilizado, aparecerá uma série de outros sinais, denominados ruídos. Estes ruídos são provenientes de sons resultantes das partes móveis da máquina, circuito pneumático etc.

Assim, antes de se começarem a captar os sinais de EA gerados durante o torneamento do silício monocristalino, foram realizados alguns ensaios a fim de se calibrar o aparelho. Com ganho pré-fixado em 40dB, algumas séries de torneamento

foram realizadas para se definir o melhor ganho e o tipo de filtro adequado. O filtro que mostrou-se mais adequado aos ensaios foi o de 2,5kHz e após a calibração do ganho o potenciômetro de ajuste foi lacrado.

### 3.6 – Análise do Acabamento e Integridade Superficial: Form Talysurf e Microscopia Eletrônica da Varredura (MEV)

Foram utilizadas duas técnicas de caracterização para a análise dos resultados: perfilometria mecânica através do Form Talysurf e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

O aparelho Form Talysurf (fabricado pela RANK TAYLOR HOBSON), instalado no Laboratório de Engenharia de Precisão (EESC-USP), é um perfilômetro mecânico capaz de obter medidas de rugosidade com resolução de até 4nm. O principal parâmetro medido é a rugosidade média,  $R_a$ , definida como a média aritmética das distâncias do perfil até a linha média, normalmente calculada através do método dos mínimos quadrados. Matematicamente pode ser expressa por:

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} \quad (12)$$

onde  $y_i$ ,  $i=1,2,\dots,n$  são pontos discretos ao longo do perfil.

A rugosidade média será correlacionada com o nível de sinal  $E_{A_{RMS}}$  emitido e com os parâmetros de corte empregados. A Figura 3.8 mostra o processo de

medição da rugosidade média em uma amostra de silício, através do aparelho Form Talysurf.

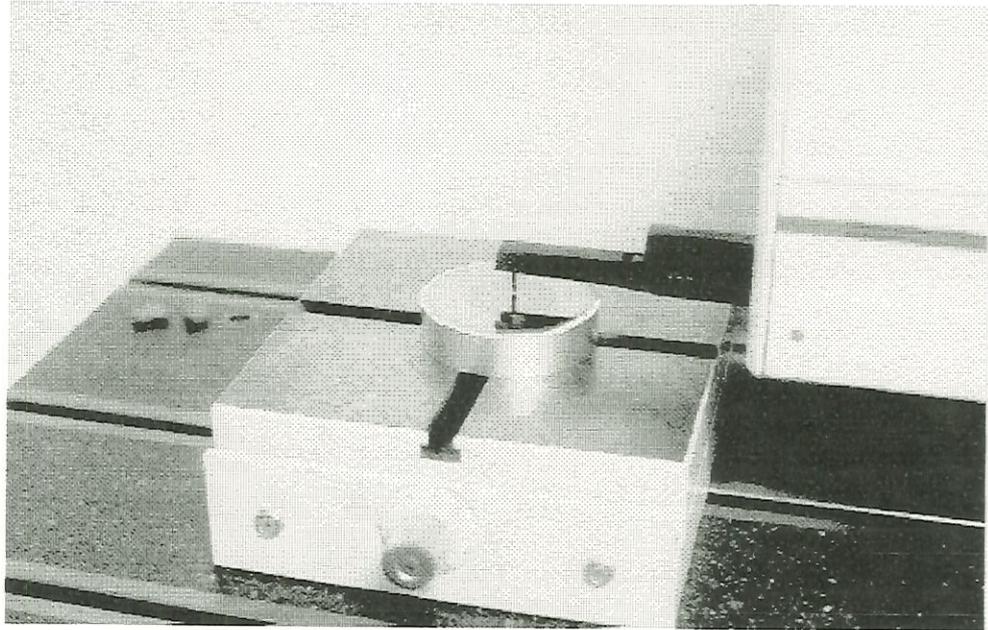


FIGURA 3.8 – Medição da rugosidade através do Talysurf.

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

A MEV foi utilizada no intuito de se observar a topografia e morfologia da superfície usinada, bem como sua integridade superficial, mostrando a existência ou

não de trincas e a região dos ombros não-cortados, possibilitando uma análise do tipo de remoção ocorrida (dúctil, dúctil/frágil, frágil), a fim de se correlacionar com os sinais de EA obtidos.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios de torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis serão apresentados e discutidos neste capítulo. Para tanto, serão mostrados gráficos e micrografias obtidas através de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), além dos resultados obtidos no rugosímetro Form Talysurf, verificando-se os níveis de EA atingidos e o estado da superfície usinada.

#### 4.1- Análise do Comportamento do Sinal de EA nos Modos de Remoção Atuantes no Torneamento de Ultraprecisão de Materiais Frágeis

Para um melhor entendimento, os resultados serão discutidos em grupos, onde variou-se o avanço e manteve-se a profundidade de corte constante. Este procedimento baseia-se no fato de que o avanço possui maior influência no acabamento final da superfície usinada, se comparado com a profundidade de corte, como visto na revisão bibliográfica (item 2.1.5).

O gráfico da Figura 4.1 mostra o nível de  $EA_{RMS}$  num corte em vazio, ou seja, sem que houvesse remoção de material e interação entre a peça e a ferramenta. A finalidade foi a de se diagnosticar o nível de ruído presente, oriundo de partes móveis da máquina, circuitos pneumáticos entre outros (item 3.5). O nível médio de  $EA_{RMS}$  atingido foi de 0,4V. Com o desligamento do fluido refrigerante, caiu para 0,3V.

Assim, puderam-se distinguir os sinais provenientes dos ruídos daqueles vindos do corte propriamente dito.

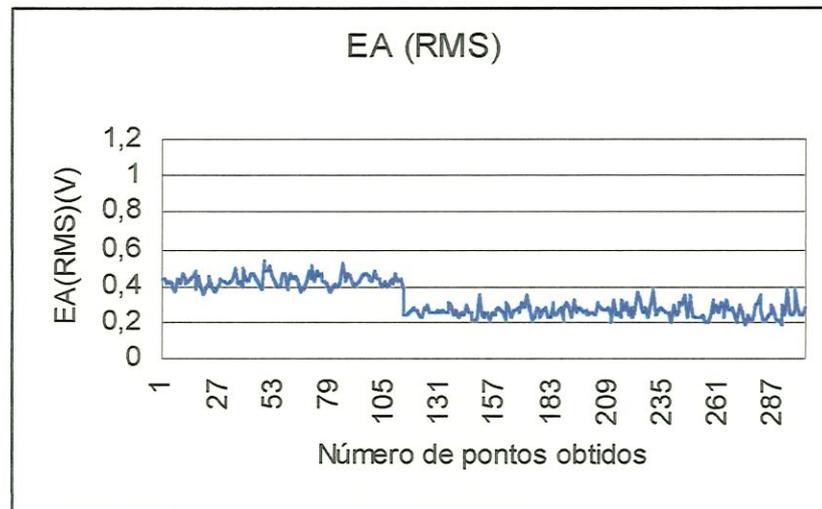


FIGURA 4.1 – Nível de  $EA_{RMS}$  em um corte em vazio.

As Figuras 4.2 e 4.3 mostram os gráficos de  $EA_{RMS}$  obtidos com avanço de  $1\mu\text{m}/\text{rev}$  e  $2,5\mu\text{m}/\text{rev}$ , respectivamente, ambas com profundidade de corte de  $1\mu\text{m}$ .

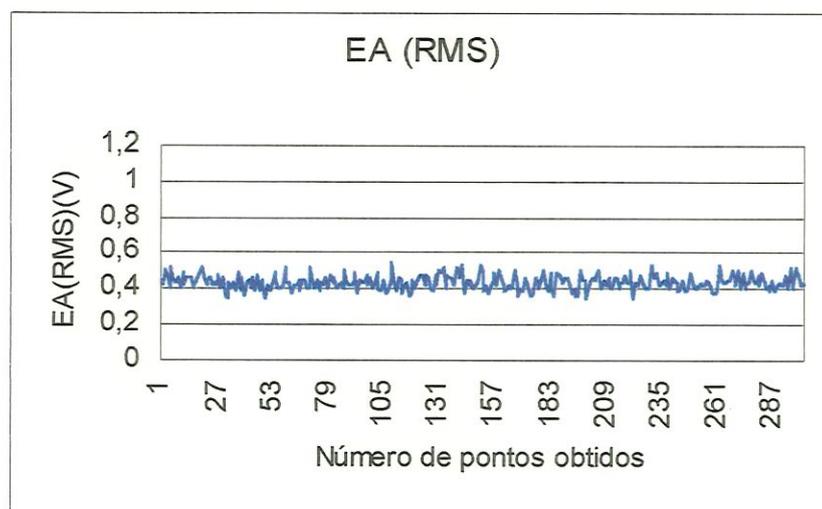


FIGURA 4.2 – Nível de  $EA_{RMS}$  obtido com  $f=1\mu\text{m}/\text{rev}$  e  $a_p=1\mu\text{m}$ .

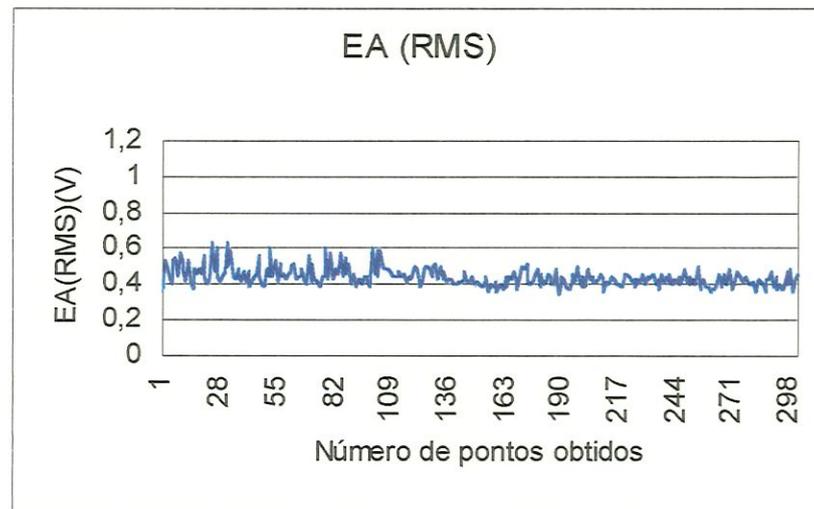


FIGURA 4.3 – Nível de  $EA_{RMS}$  obtido com  $f=2,5\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=1\mu\text{m}$ .

O nível médio de  $EA_{RMS}$  é de  $0,410\text{V}$  com avanço de  $1\mu\text{m/rev}$  e  $0,434\text{V}$  com  $2,5\mu\text{m/rev}$ . As características dos sinais diferem pouco entre si. Podemos notar que na parte inicial do gráfico da Figura 4.3, há uma região com maiores amplitudes de  $EA_{RMS}$  (cerca de  $0,2\text{V}$ ), se comparada com o resto do gráfico e com o da Figura 4.2. Nota-se o aparecimento de picos maiores no sinal, diferenciando-se do restante do gráfico, onde o sinal apresenta uma aparência mais uniforme, com amplitudes na faixa de  $0,1\text{V}$ . Estes picos podem provavelmente terem sido gerados pelo aparecimento de trincas médias subsuperficiais durante a usinagem. Esta por sua vez, podem ser remanescentes do material, surgidas durante o pré-processamento ou remanescentes de passes anteriores da usinagem, como discutido anteriormente (item 2.1.3). Além disso, apesar destas condições de corte teoricamente promoverem remoção dúctil de material, sabe-se que uma resposta dúctil durante o torneamento com diamante existe apenas na ponta da ferramenta, onde a espessura do cavaco se aproxima de zero. Ou seja, trata-se de uma combinação de plasticidade e

microfratura (concordando com BLAKE 1988 e KUNZ et al, 1996). Isto poderia justificar o comportamento do sinal em condições de remoção dúctil, que apresenta vários picos ao longo do sinal contínuo.

As Figuras 4.4 e 4.5 são micrografias referentes às mesmas condições de corte dos gráficos 4.2 e 4.3, respectivamente. Nas duas micrografias observa-se, na parte de cima a região do ombro não cortado, e na parte de baixo a superfície final. Esta situação se repete nas demais micrografias apresentadas posteriormente. Na MEV da Figura 4.4 (com  $1\mu\text{m}/\text{rev}$  e  $1\mu\text{m}$ ), pode-se observar uma superfície isenta de trincas, assim como a região do ombro não cortado. Cabe explicar que os pontos que aparecem na foto são provenientes de sujeira aderida à superfície da amostra.

Já na MEV da Figura 4.5 ( $f=2,5\mu\text{m}/\text{rev}$  e  $a_p=1\mu\text{m}$ ), observa-se o surgimento de trincas no ombro, porém em pequeno número. Os “pittings” que aparecem na superfície provavelmente são trincas remanescentes de passes anteriores de usinagem.

Apesar da aparente relação entre os níveis de  $EA_{\text{RMS}}$  apresentados e as superfícies usinadas, a diferenciação entre o nível de sinal proveniente do corte propriamente dito do ruído presente é de difícil visualização para as condições de corte dúctil apresentadas até aqui ( $f=1\mu\text{m}/\text{rev}$  e  $f=2,5\mu\text{m}/\text{rev}$ , ambas com  $a_p=1\mu\text{m}$ ). Enquanto para a primeira condição de corte o nível médio foi de 0,410V, para a segunda 0,434V, o nível de ruído atingiu 0,400V. Uma análise visual pelo gráfico também torna-se confusa neste caso. Isto pode ser relacionado ao fato de que, nestas condições, a taxa de remoção de material é muito pequena. Conseqüentemente, a energia liberada na forma de EA também é menor e os valores RMS (“root mean square”) do sinal não se mostram tão úteis na identificação do fenômeno ocorrido.

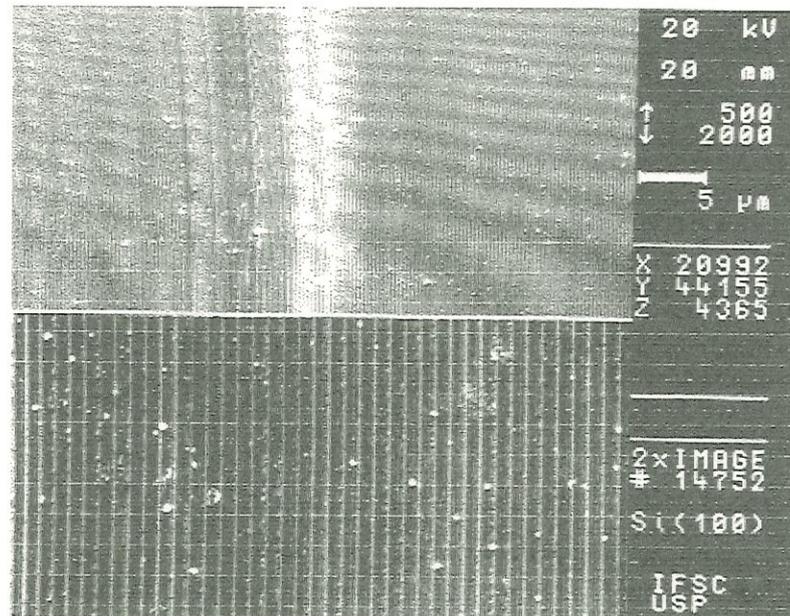


FIGURA 4.4 – MEV da superfície obtida com  $f=1\mu\text{m}/\text{rev}$  e  $a_p=1\mu\text{m}$ . A parte de cima mostra a região do ombro não cortado e a de baixo a superfície gerada (a mesma situação se repetirá nas próximas fotos).

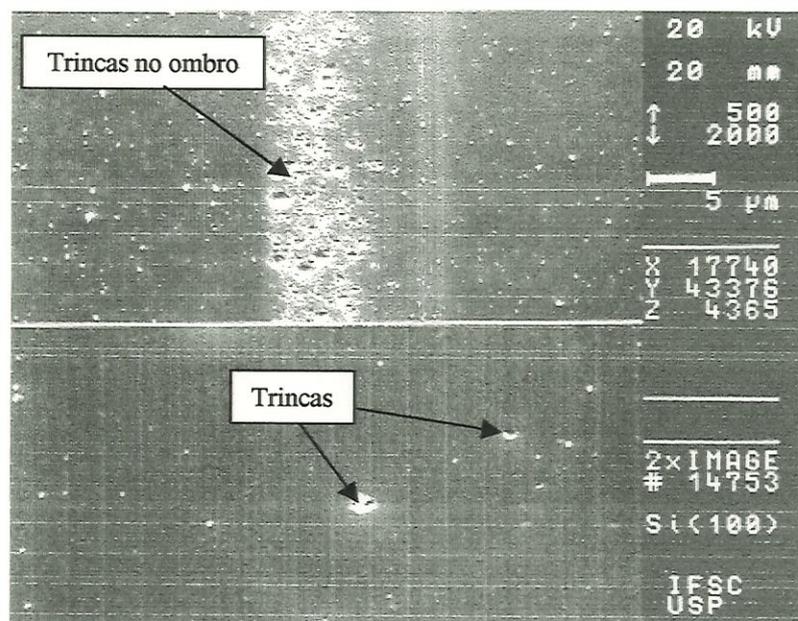


FIGURA 4.5 – MEV da superfície obtida com  $f=2,5\mu\text{m}/\text{rev}$  e  $a_p=1\mu\text{m}$ .

Os baixos níveis de  $EA_{RMS}$  para estas condições podem ser creditados a menor energia dissipada pelos mecanismos de deformação plástica e fratura (este último às vezes inexistente) e à pequena interação entre a ferramenta de diamante e a amostra de silício. Neste caso, seria necessário a investigação das informações contidas no sinal bruto de EA. Entretanto, para tanto seria necessário maior taxa de aquisição do sinal e a memória dos equipamentos também deveriam ser muito maiores do que às utilizadas com sinais RMS. Neste trabalho, utilizou-se apenas o sinal RMS pois, como enfatizado anteriormente, trata-se de um trabalho inédito investigativo do comportamento da EA durante o torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis.

Voltando à discussão inicial, ainda com profundidade de corte de  $1\mu\text{m}$ , a Figura 4.6 mostra o nível de  $EA_{RMS}$  obtido com avanço de  $3\mu\text{m}/\text{rev}$ . A MEV correspondente pode ser vista na Figura 4.7.

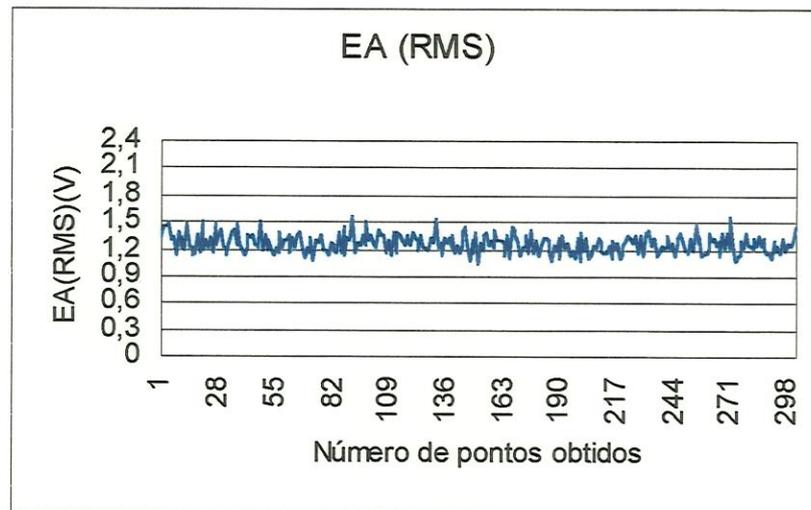


FIGURA 4.6 – Nível de  $EA_{RMS}$  obtido com  $f=3\mu\text{m}/\text{rev}$  e  $a_p=1\mu\text{m}$ .

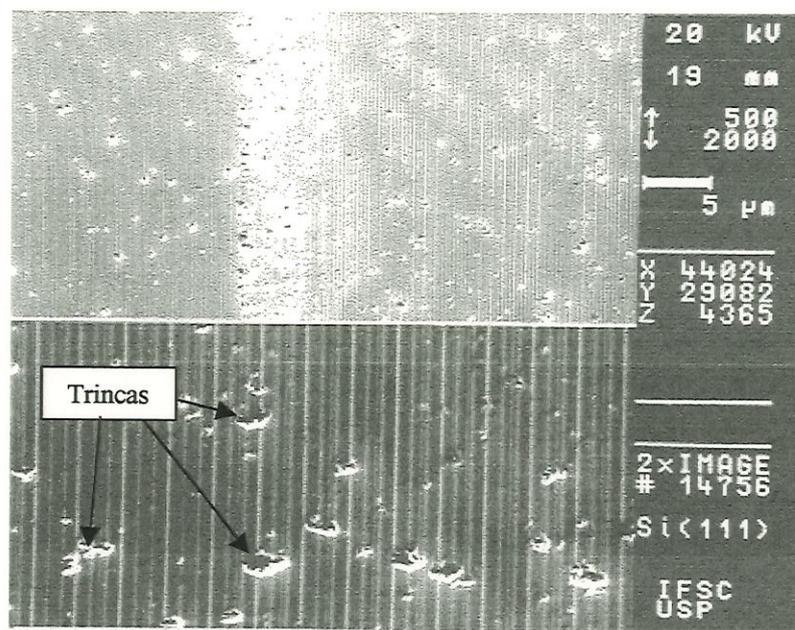


FIGURA 4.7 – MEV da superfície obtida com  $f=3\mu\text{m}/\text{rev}$  e  $a_p=1\mu\text{m}$ .

Nota-se um grande aumento no nível de sinal  $EA_{\text{RMS}}$  se comparado com o obtido nas condições de corte anteriores. O nível médio é 1,373V, cerca de 0,9V maior. A amplitude do sinal também é maior, cerca de 0,4V. Estes resultados são condizentes com o acabamento da superfície usinada, que apresenta maior concentração de trincas que as superfícies anteriormente analisadas. Deste modo, pode-se inferir que a elevação da  $EA_{\text{RMS}}$  pode ser creditado basicamente ao aumento de energia despendida pelos mecanismos de fratura com o aumento da taxa de remoção.

Resultado semelhante é observado com o aumento da profundidade de corte para  $5\mu\text{m}$ , mantendo-se o avanço ainda em  $3\mu\text{m}/\text{rev}$ . O nível médio de  $EA_{\text{RMS}}$  atinge 1,730V e a amplitude cerca de 0,5V (Figura 4.8), encontrando-se uma superfície com um maior número de fraturas do que a encontrada com profundidade de corte de  $1\mu\text{m}$ .

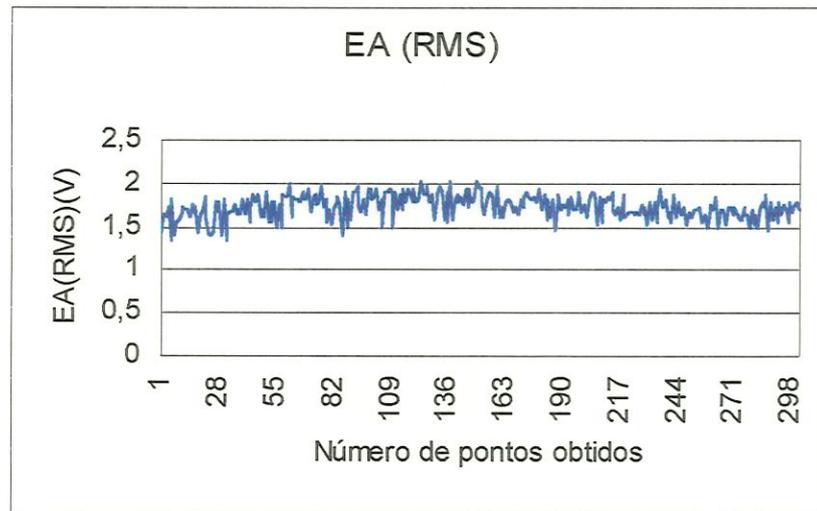


FIGURA 4.8 – Nível de  $EA_{RMS}$  obtido com  $f=3\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=5\mu\text{m}$ .

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam os níveis de  $EA_{RMS}$  obtidos com profundidade de corte de  $5\mu\text{m}$  e avanço de  $1\mu\text{m/rev}$  e  $2,5\mu\text{m/rev}$ , respectivamente.

As respectivas micrografias estão apresentadas nas figuras 4.11 e 4.12.

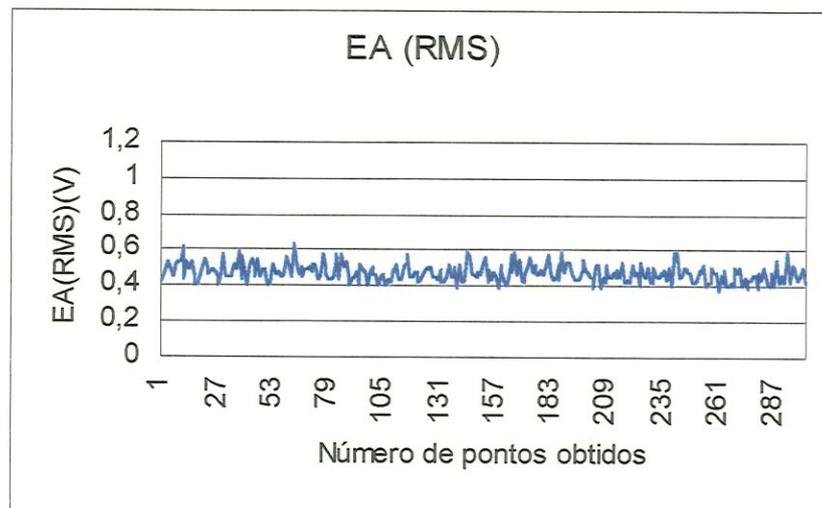


FIGURA 4.9 – Nível de  $EA_{RMS}$  obtido com  $f=1\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=5\mu\text{m}$ .

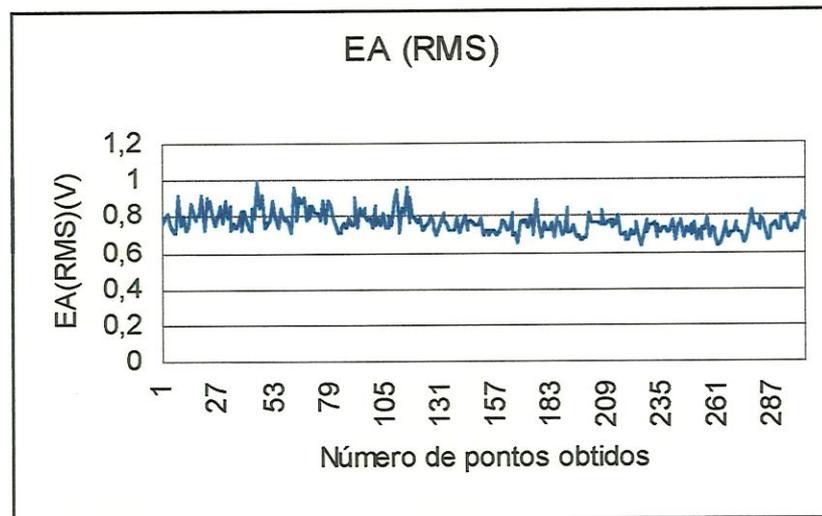


FIGURA 4.10 – Nível de  $EA_{RMS}$  obtido com  $f=2,5\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=5\mu\text{m}$ .

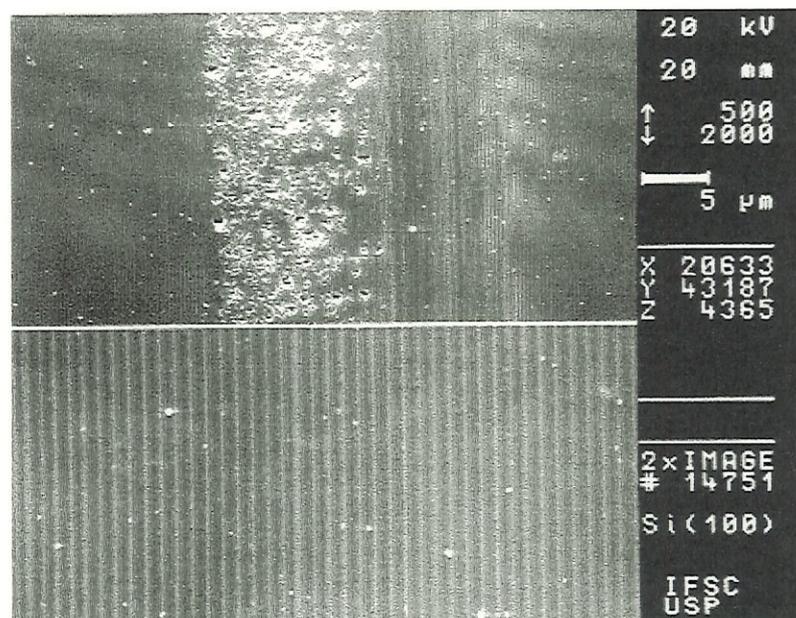


FIGURA 4.11 – MEV da superfície obtida com  $f=1\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=5\mu\text{m}$ .

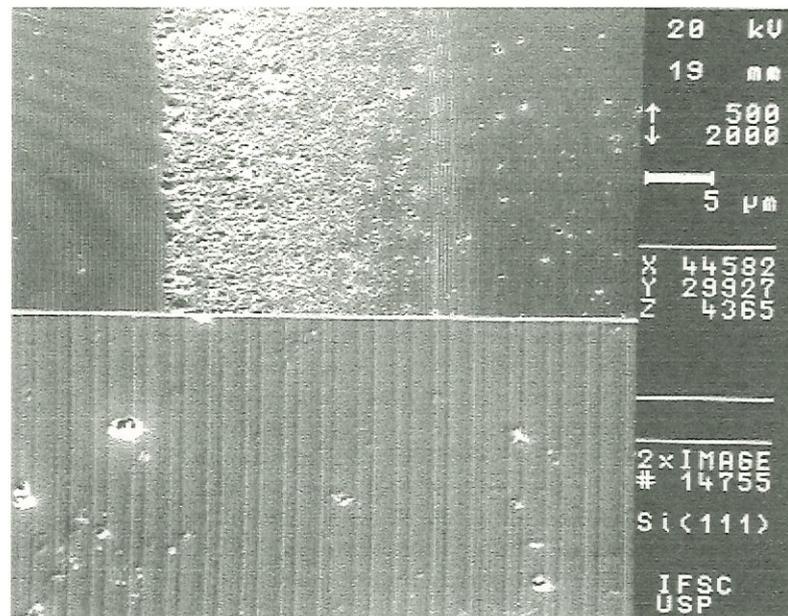


FIGURA 4.12 – MEV da superfície obtida com  $f=2,5\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=5\mu\text{m}$ .

Para a primeira condição ( $1\mu\text{m/rev}$  e  $5\mu\text{m}$ , Figuras 4.9 e 4.11) a superfície apresenta-se livre de trincas, como na condição  $1\mu\text{m/rev}$  e  $1\mu\text{m}$ , mas com um nível médio de  $EA_{\text{RMS}}$  maior,  $0,453\text{V}$  contra  $0,410\text{V}$ . O sinal também apresenta-se mais irregular, com maior número de picos e uma maior amplitude média, se comparado com o sinal obtido anteriormente. Analisando-se as duas micrografias correspondentes (4.4 e 4.11), pode-se observar maior presença de trincas na região do ombro não cortado para a condição com  $5\mu\text{m}$  de profundidade de corte.

Entretanto, as duas superfícies geradas não apresentam trincas superficiais ou “pittings”. Assim, pode-se inferir que o número de trincas presentes na região do ombro não cortado exerce influência na geração do sinal de EA, contribuindo principalmente para o aparecimento de picos no sinal, aumentando sua amplitude média.

A Figura 4.12 mostra micrografia da superfície obtida com  $2,5\mu\text{m}/\text{rev}$  de avanço e  $5\mu\text{m}$  de profundidade. O nível médio atingido de  $E_{\text{RMS}}$  foi de  $0,771\text{V}$ . O sinal apresenta regiões com maiores concentrações de picos, com amplitudes atingindo cerca de  $0,3\text{V}$ , maior que a máxima amplitude atingida com a mesma taxa de avanço, mas com profundidade de corte de  $1\mu\text{m}$ , que foi de  $0,2\text{V}$  ( a superfície mostrada na Figura 4.12 apresenta um maior número de trincas tanto no ombro não cortado como na superfície). A diferença pode ser creditada basicamente à maior ocorrência de fratura, tanto na superfície gerada como na região do ombro não cortado, este apresentando um número bem maior de trincas do que o obtido com a condição de menor profundidade de corte. A elevação do nível de sinal de  $E_{\text{RMS}}$  também sofre influência das mudanças das condições de corte, ou seja, a variação do avanço e da profundidade de corte altera o sinal de EA.

Comparando-se os gráficos 4.13 e 4.14 (sinais obtidos das condições  $f=1\mu\text{m}/\text{rev}$  e  $f=2,5\mu\text{m}/\text{rev}$ , ambas com  $a_p=10\mu\text{m}$ ), pode-se observar que tanto o nível médio de  $E_{\text{RMS}}$ , bem como sua amplitude, são maiores para a segunda condição apresentada. Para  $f=1\mu\text{m}/\text{rev}$ ,  $E_{\text{RMS}}$  é de  $0,625\text{V}$  e para  $f=2,5\mu\text{m}/\text{rev}$ ,  $0,993\text{V}$ . Analisando-se as micrografias correspondentes (4.15 e 4.16, respectivamente), observa-se que para a primeira condição a superfície se apresenta livre de trincas, estas aparecendo somente na região do ombro. Para a segunda condição, há trincas maiores no ombro, e em maior número, e o surgimento de algumas trincas na superfície. Esta situação é condizente com o nível e características dos sinais apresentados, que é maior para a segunda condição, além de apresentar maior número de picos ao longo do sinal. Novamente, a energia despendida pelo mecanismo de fratura frágil parece ser a causa do aumento e mudança da

característica do sinal de EA, a despeito da variação das condições de corte (avanço e profundidade de corte).

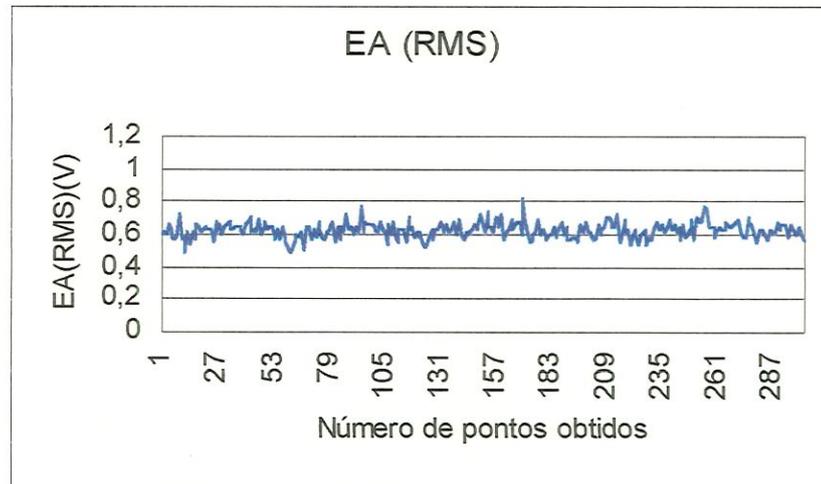


FIGURA 4.13 – Nível de  $EA_{RMS}$  obtido com  $f=1\mu\text{m}/\text{rev}$  e  $a_p=10\mu\text{m}$ .

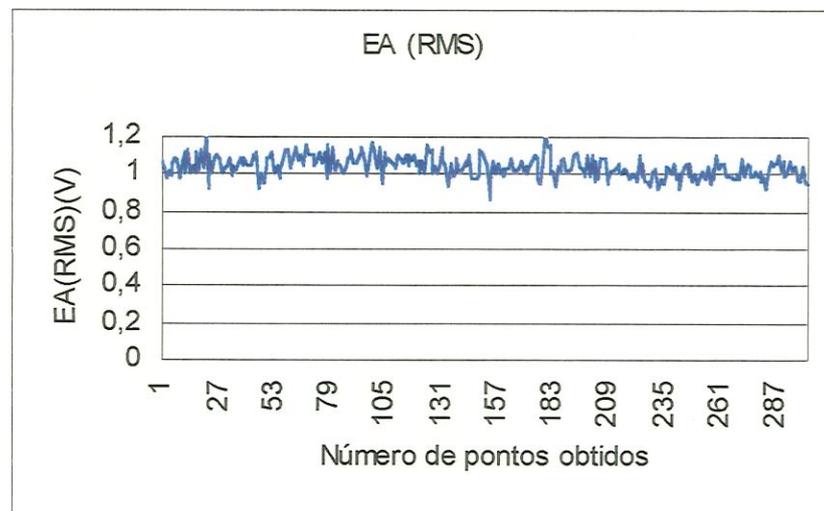


FIGURA 4.14 – Nível de  $EA_{RMS}$  obtido com  $f=2,5\mu\text{m}/\text{rev}$  e  $a_p=10\mu\text{m}$ .

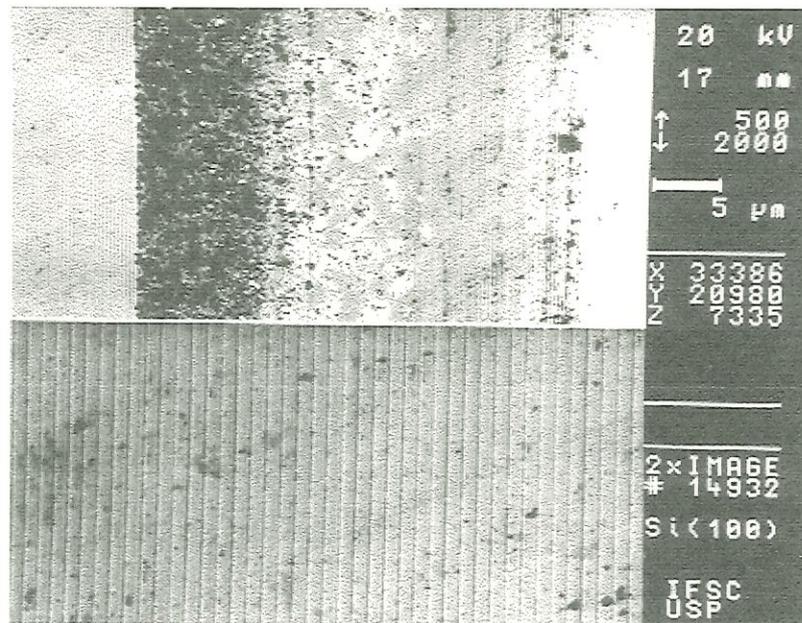


FIGURA 4.15 – MEV da superfície obtida com  $f=1\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=10\mu\text{m}$ .

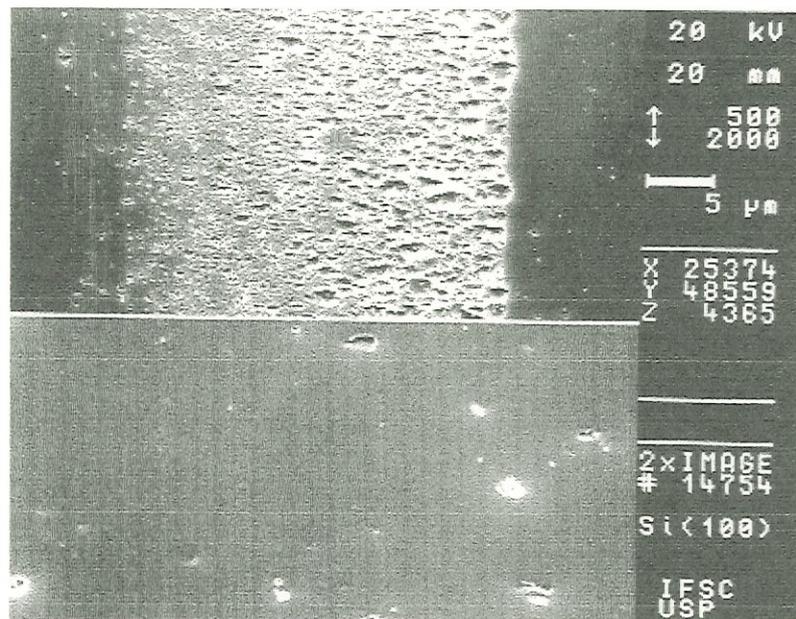


FIGURA 4.16 – MEV da superfície obtida com  $f=2,5\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=10\mu\text{m}$ .

A Figura 4.17 mostra o nível de  $EA_{RMS}$  atingido com  $f=3\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=10\mu\text{m}$ .

A micrografia correspondente é mostrada na Figura 4.18. Nota-se um sinal com

vários picos, com amplitude de cerca de 0,6V e  $EA_{RMS}$  de 2,430V, resultados coerentes com o estado da superfície, que apresenta tanto o ombro como a superfície repletas de trincas. Portanto, mais uma vez a EA reflete a formação de defeitos na peça usinada.

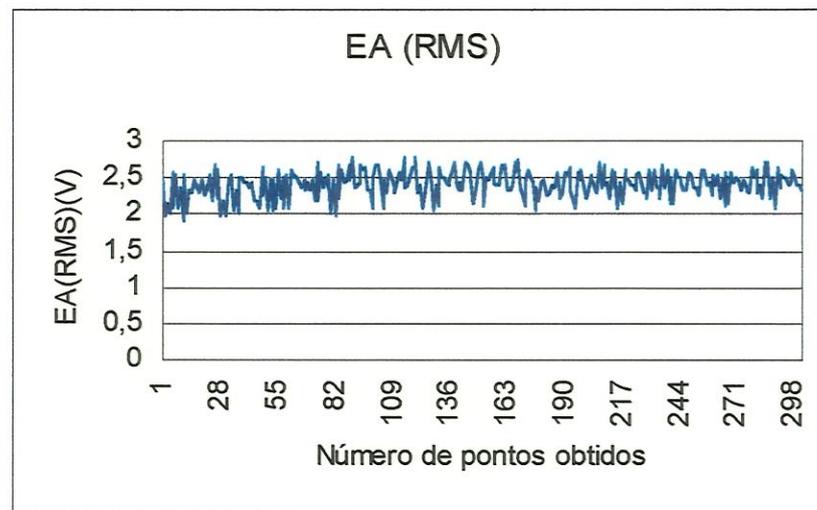


FIGURA 4.17 – Nível de  $EA_{RMS}$  obtido com  $f=3\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=10\mu\text{m}$ .

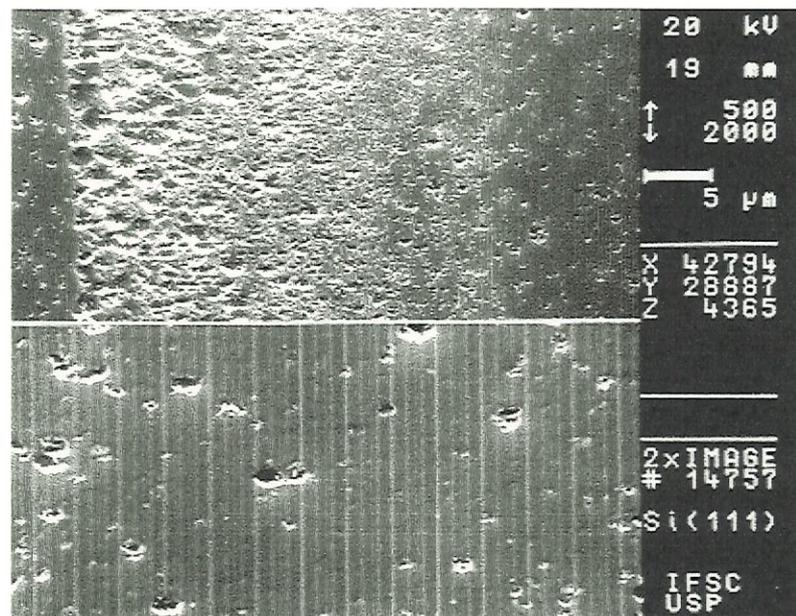


FIGURA 4.18 – MEV da superfície obtida com  $f=3\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=10\mu\text{m}$ .

Os ensaios até agora apresentados foram realizados com determinada amostra e calibração, ou seja, sem que se mexesse na posição e calibração do sensor. A fim de verificar se o comportamento da EA se mantinha o mesmo, outra amostra de silício foi usinada, com nova calibração e ajuste do sensor. O local fixado não foi alterado, apenas o ajuste do ganho. Assim, o novo nível de ruído ficou em 0,749V (Figura 4.19). Para um corte dúctil ( $f=1\mu\text{m}/\text{rev}$  e  $a_p=1\mu\text{m}$ ) o sinal  $EA_{\text{RMS}}$  foi de 0,786V (Figura 4.20). Pode-se observar que, como nos ensaios anteriores, a diferenciação do corte dúctil do nível de ruído é de difícil visualização.

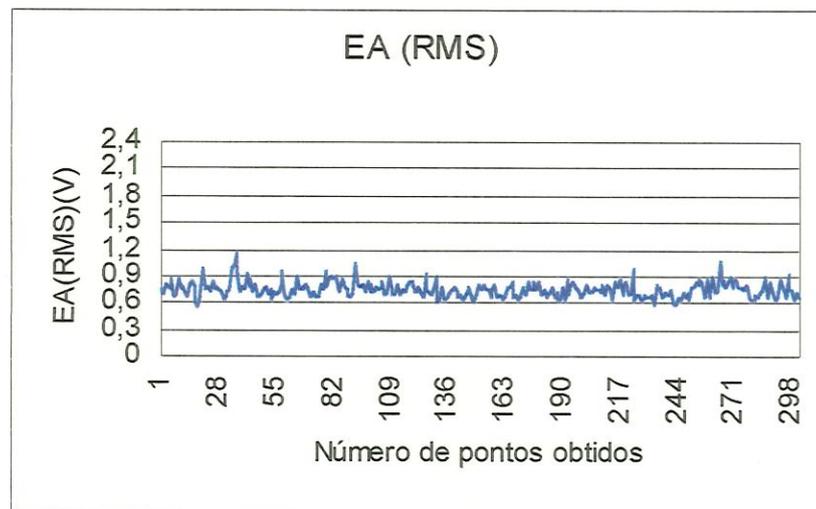


FIGURA 4.19 – Nível de  $EA_{\text{RMS}}$  em um corte em vazio com nova calibração.

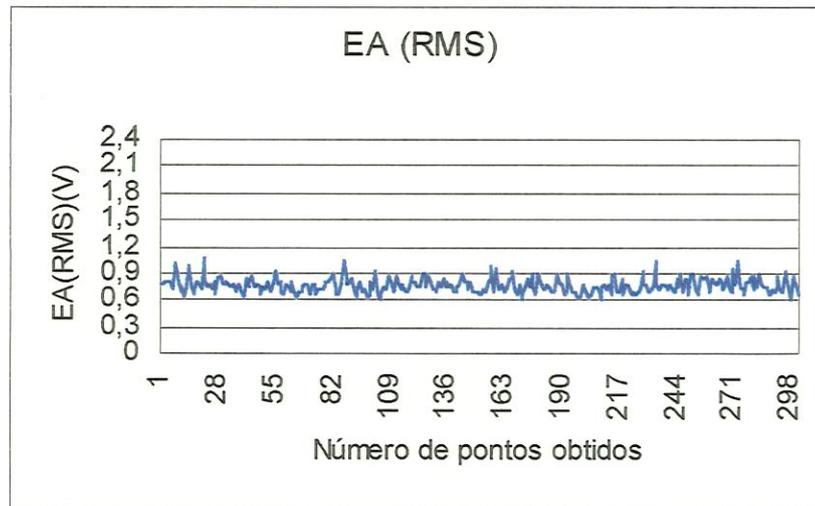


FIGURA 4.20 – Nível de  $EA_{RMS}$  obtido com  $f=1\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=1\mu\text{m}$  para a nova calibração.

Com profundidade de corte mantida em  $10\mu\text{m}$ , o avanço foi variado em 1, 2,5 e  $7,5\mu\text{m/rev}$ , obtendo-se três superfícies diferentes. Os níveis  $EA_{RMS}$  para as três condições são apresentadas nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23, respectivamente.

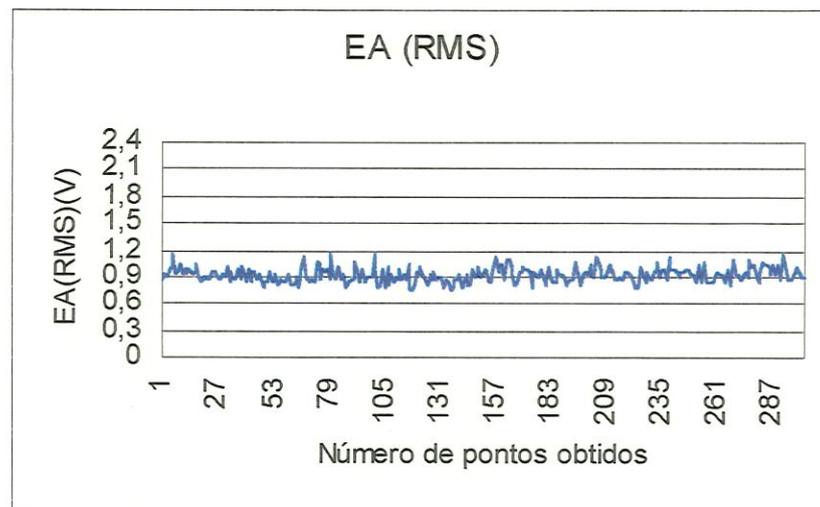


FIGURA 4.21 – Nível de  $EA_{RMS}$  obtido com  $f=1\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=10\mu\text{m}$  para a nova calibração.

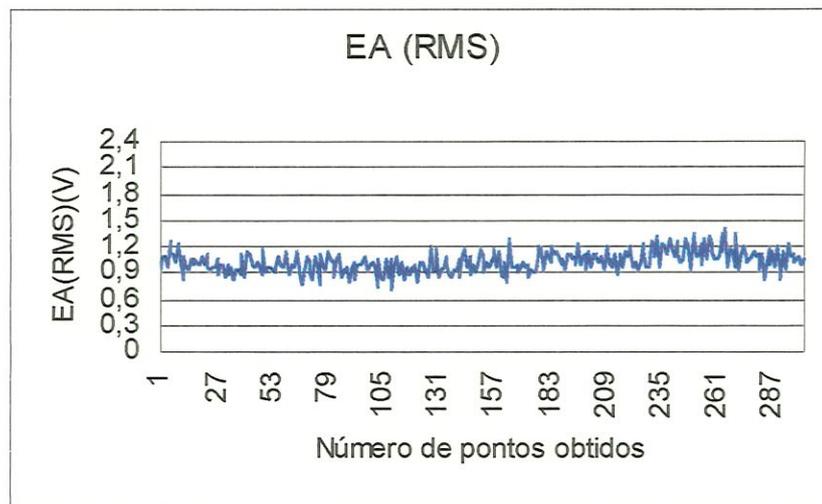


FIGURA 4.22 – Nível de  $EA_{RMS}$  obtido com  $f=2,5\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=10\mu\text{m}$  para a nova calibração.

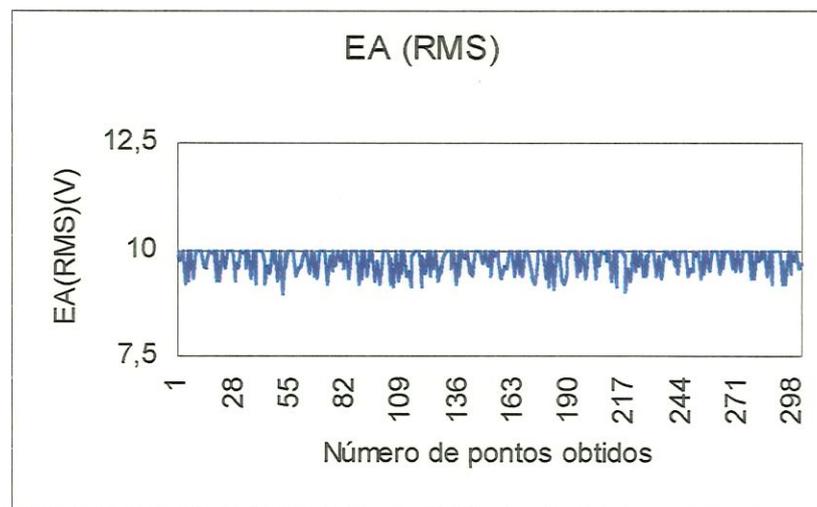


FIGURA 4.23 – Nível de  $EA_{RMS}$  obtido com  $f=7,5\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=10\mu\text{m}$  para a nova calibração.

Os níveis obtidos são 0,981V, 1,238V e 9,719V. Observa-se que, como nos testes anteriores, na medida que se aumenta a parcela de atividade frágil no corte, aumenta o número de picos no sinal, representando um aumento no número de

trincas na superfície final. A MEV da Figura 4.24 mostra a superfície gerada com  $7,5\mu\text{m}/\text{rev}$ , com remoção totalmente frágil. Nota-se grande presença de trincas, responsável pelo alto nível de  $EA_{\text{RMS}}$  e alta amplitude, esta por volta de  $2V$ .

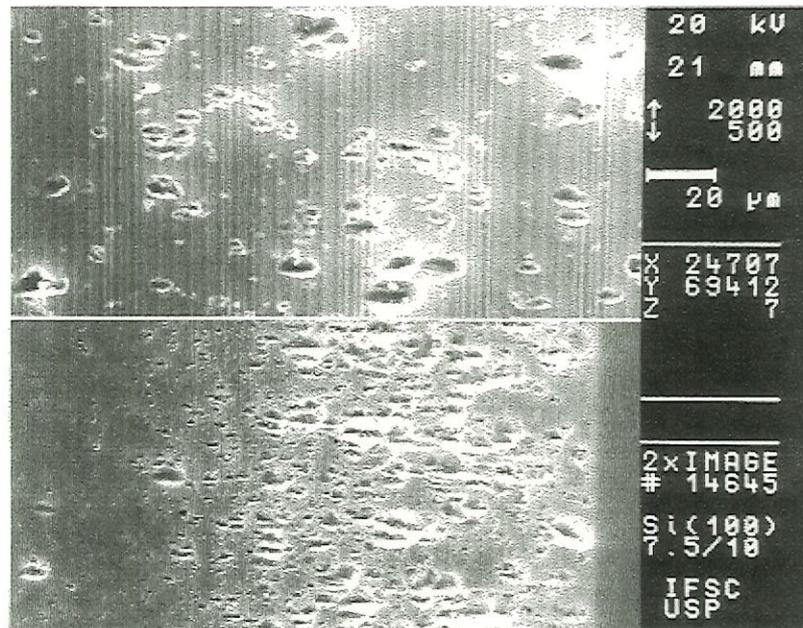


FIGURA 4.24 – MEV da superfície obtida com  $f=7,5\mu\text{m}/\text{rev}$  e  $a_p=10\mu\text{m}$ .

Para as demais condições de corte o comportamento da  $EA_{\text{RMS}}$  foi o mesmo obtido nos ensaios com as outras amostras, com aumento do nível de EA a medida que se aumenta a remoção frágil de material.

A Tabela 4.1 apresenta a rugosidade superficial e o nível de  $EA_{\text{RMS}}$  correspondente obtido durante os cortes.

TABELA 4.1 – Variação da rugosidade superficial  $R_a$  e da  $EA_{RMS}$  com a variação dos parâmetros de corte.

Condições de corte $f(\mu\text{m/rev}) / a_p(\mu\text{m})$	$R_a$ (nm)	$EA_{RMS}(V)$
1/1	9,6	0,410
1/5	13,6	0,453
1/10	15,1	0,625
2,5/1	11,7	0,434
2,5/5	14,7	0,771
2,5/10	16,1	0,993
3/1	36,0	1,373
3/5	37,7	1,730
3/10	39,6	2,430
7,5/10	43,6	9,719

Através da tabela nota-se que com a degradação da superfície, ou seja, com o aumento do número de trincas na superfície, há o aumento do nível de sinal  $EA_{RMS}$ . Observam-se níveis de  $R_a$  e  $EA$  baixos para condições de remoção dúcteis (próximas ao  $R_a$  da superfície polida, de 6,0nm), contrastando com os níveis obtidos para a remoção frágil, tendo valores altos tanto para  $R_a$  como para  $EA$ . Os dados da Tabela 4.1 foram plotados no gráfico 4.25 para melhor visualização da variação  $R_a \times EA$ .

Os gráficos apresentados a seguir, 4.26 e 4.27, mostram a variação da  $EA_{RMS}$  versus avanço e profundidade de corte, respectivamente.

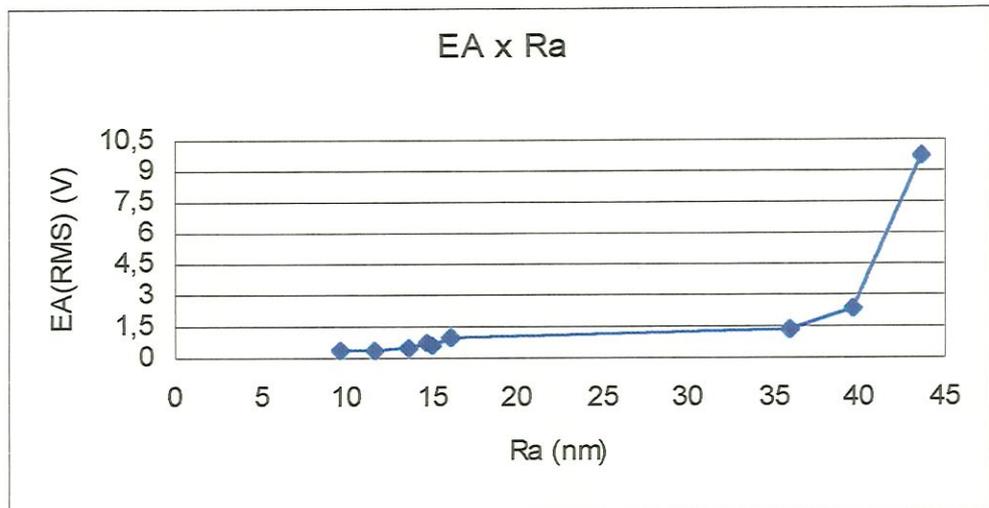


FIGURA 4.25 – Variação do nível de  $EA_{RMS}$  com a rugosidade superficial Ra.

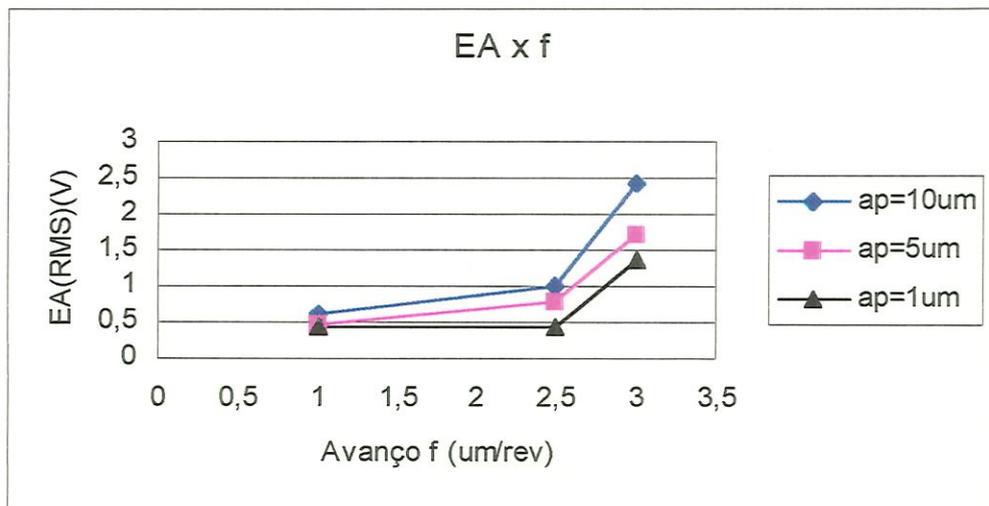


FIGURA 4.26 – Variação do nível de  $EA_{RMS}$  com o avanço por revolução.

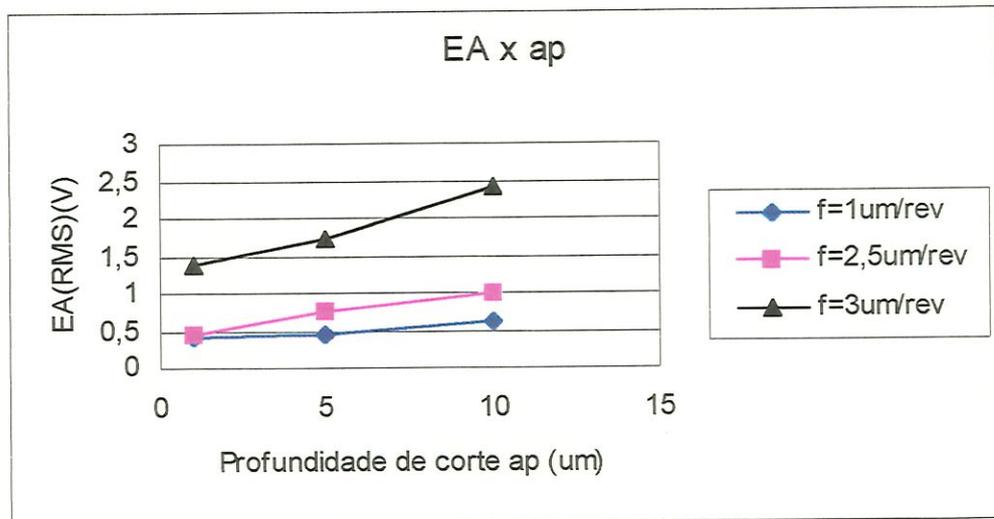


FIGURA 4.27 – Variação do nível de  $EA_{RMS}$  com a profundidade de corte.

Nota-se através da Figura 4.26 que à medida que se varia o modo de remoção, com transição do regime dúctil para frágil, o nível de  $EA_{RMS}$  aumenta. Como exemplo, têm-se as condições  $f=2,5\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=1\mu\text{m}$  e  $f=2,5\mu\text{m/rev}$  e  $a_p=5\mu\text{m}$ . Através das micrografias referentes (4.5 e 4.12 respectivamente) vemos maior número de trincas para a segunda condição do que para a primeira. Pode-se inferir também que este aumento está relacionado ao aumento da taxa de remoção. Variações nesta taxa leva a mudanças, bruscas ou não, nos mecanismos básicos de deformação e corte do material, refletindo no sinal emitido.

Pelo gráfico da Figura 4.27 observa-se a dificuldade de se diferenciar as condições de remoção dúcteis utilizadas através da  $EA_{RMS}$ . À medida que se aumenta a taxa de remoção e, por consequência o mecanismo de remoção frágil, a visualização do regime atuante através do sinal RMS torna-se mais fácil. Nota-se, por exemplo, que para avanço fixado em  $f=1\mu\text{m/rev}$  (linha azul) a EA cresce mais suavemente, sugerindo que o mecanismo de remoção não envolve grande quantidade

de trincas (até mesmo inexistente), ao contrário da condição  $f=3\mu\text{m}/\text{rev}$  (linha preta), onde a presença de trincas é constante e numerosa.

#### 4.2- Análise da Influência do Desgaste da Ferramenta de Diamante Monocristalino no Sinal de EA

A Figura 4.28 mostra um detalhe da ponta da ferramenta de diamante monocristalino utilizada. As MEVs apresentadas nas Figuras 4.29 e 4.30 mostram detalhes da ferramenta antes e depois dos ensaios, onde observam-se as faces de saída e de folga e a aresta de corte. Na Figura 4.29 tem-se idéia do grau de afiação da ferramenta. Já a Figura 4.30 mostra o desgaste da aresta de corte decorridos os ensaios.

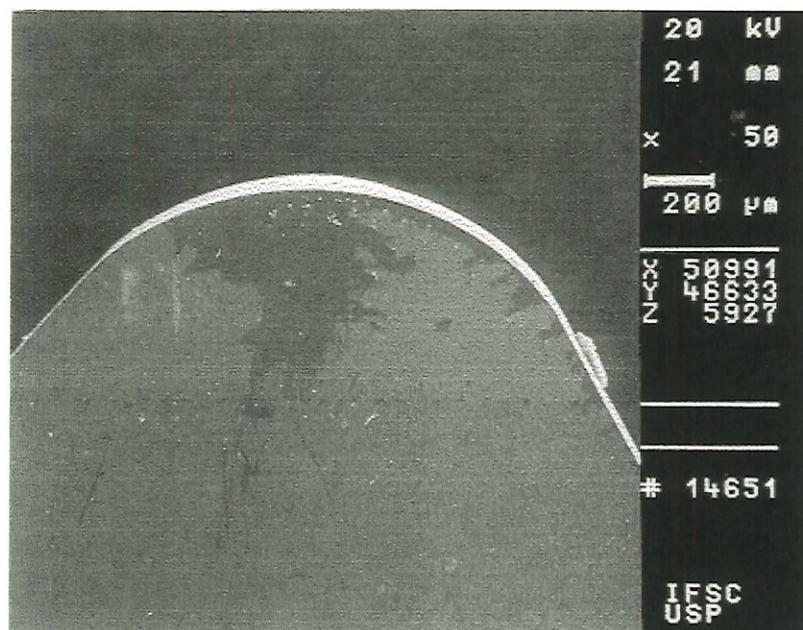


FIGURA 4.28 – Detalhe da ponta da ferramenta de diamante monocristalino.

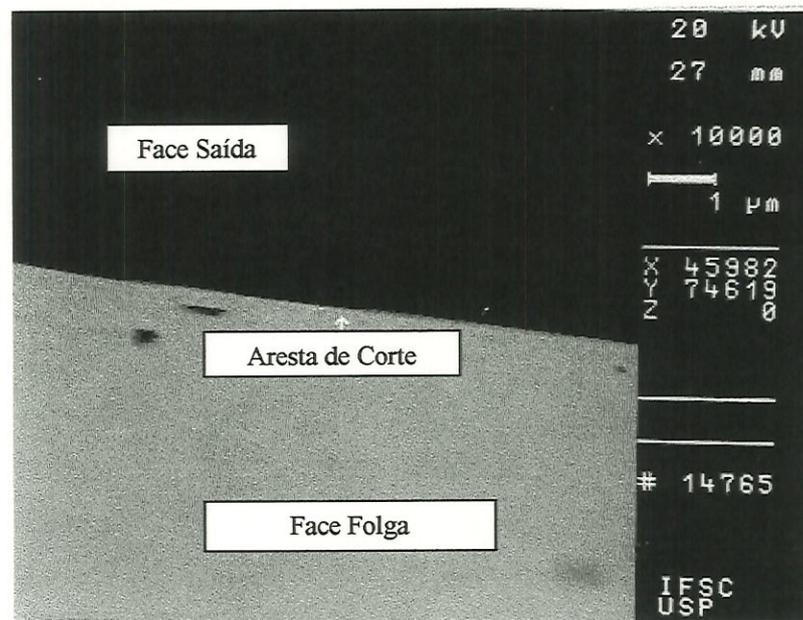


FIGURA 4.29 – MEV da ferramenta de diamante, mostrando a face de saída, a de folga e o estado de afiação da aresta de corte antes dos ensaios.

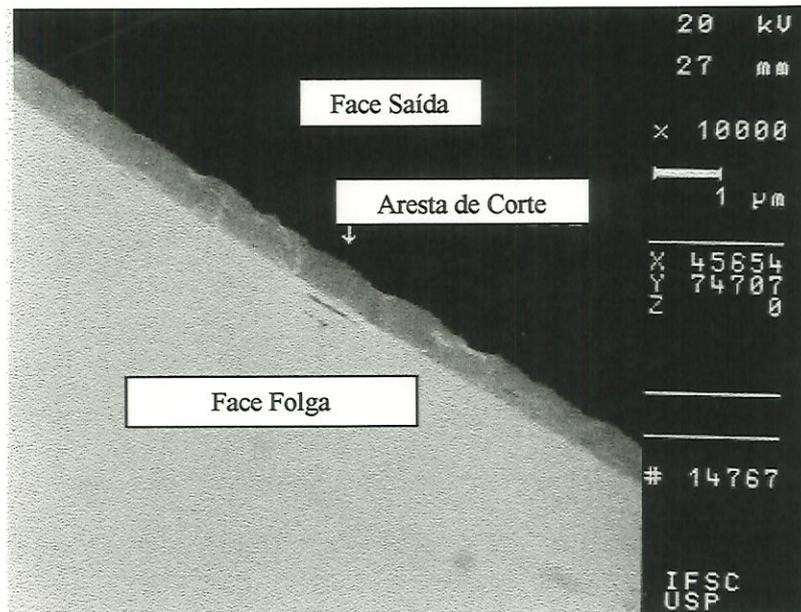


FIGURA 4.30 – MEV da ferramenta de diamante após os ensaios, mostrando o desgaste da aresta de corte.

A influência real do desgaste da ferramenta no nível de  $EA_{RMS}$  não fica claro neste trabalho, mas podem-se fazer algumas inferências sobre o assunto. Na usinagem em geral, o sinal de EA tende a diminuir com o desgaste tipo cratera e aumentar com desgaste de flanco ocorrendo, às vezes, de o sinal se tornar constante devido à atuação dos dois tipos de desgaste. Na ferramenta de diamante monocristalino podem ocorrer os desgastes de flanco e face (cratera) ou progressivo e microlascamentos (item 2.1.2). Pela MEV da Figura 4.30, observa-se desgaste progressivo da aresta, com seu “achatamento” (criando maior área de contato) e microlascamentos. Esta maior área de contato provoca maior atrito com a superfície usinada, além de maior força de corte. Conseqüentemente, há mudança no mecanismo de remoção nesta região, se comparada com o fenômeno que ocorre com a aresta afiada. Portanto, acredita-se que o *desgaste na ferramenta viria a aumentar o nível de  $EA_{RMS}$*  nos ensaios realizados. Apesar disso, nos ensaios, tomou-se o cuidado de deixar as condições mais severas de usinagem, e portanto as mais propensas a danificar a ferramenta ( $f=3\mu\text{m}/\text{rev}$  com  $a_p=5\mu\text{m}$  e  $10\mu\text{m}$  e  $f=7,5\mu\text{m}/\text{rev}$  e  $a_p=10\mu\text{m}$ ), por último, para tentar minimizar o efeito do desgaste no nível de EA. E para estas condições mais severas de remoção, acredita-se que a influência do desgaste no nível de EA não é tão atuante, já que para estas condições os níveis de  $EA_{RMS}$  obtidos foram altos e bastante distintos entre si, se comparados com os níveis obtidos na remoção dúctil e dúctil/frágil.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSÕES

### 5.1- Conclusões

A usinagem de ultraprecisão de materiais frágeis desperta grande interesse na indústria óptica e eletrônica, impulsionando as pesquisas tanto na área acadêmica como na industrial. O aperfeiçoamento desta tecnologia é prioritário para se atingir a produção econômica de produtos fabricados a partir de tais materiais, o que acarreta uma crescente busca por qualidade e produtividade industrial. Para tanto, é preciso que o estado do processo possa ser conhecido e dominado, despertando o interesse em pesquisas no monitoramento do processo de usinagem.

Este trabalho apresentou um estudo inicial do uso da Emissão Acústica (EA) durante o torneamento com ferramenta de ponta única de diamante de materiais frágeis, visando analisar o comportamento do sinal durante o processo e investigar sua viabilidade no monitoramento da usinagem de ultraprecisão de tais materiais.

Baseado nas etapas desenvolvidas e resultados obtidos, podem-se apresentar as seguintes conclusões:

- O nível de  $EA_{RMS}$  aumenta a medida que aumenta o mecanismo de remoção frágil do material, assim como a amplitude do sinal, apresentando uma característica irregular, com maior número de picos;
- A energia despendida pelo mecanismo de fratura frágil tem maior influência no aumento e mudança da característica do sinal;



- Baixos níveis de  $EA_{RMS}$  estão relacionados à menor energia dissipada por mecanismos de remoção dúctil e altos níveis de  $EA_{RMS}$  estão relacionados à maior energia dissipada por mecanismos de remoção frágil;
- As trincas geradas apenas na região do ombro não cortado influem na geração do sinal de  $EA_{RMS}$ ;
- O comportamento do sinal de  $EA_{RMS}$  no corte de materiais frágeis se mostrou o mesmo (aumento do nível de sinal a medida que se transita do modo de remoção dúctil para frágil), ainda que mudada a calibração e ajuste do aparato;
- O sinal de  $EA_{RMS}$  não se mostrou tão útil na detecção de cortes totalmente dúcteis (que geram baixo nível de sinal, devido à baixa taxa de remoção), confundindo-se com o nível de ruído do aparato utilizado;
- A influência do avanço e da profundidade de corte separadamente no nível de sinal não é claro. Sabe-se que aumentando-se a taxa de remoção (intimamente ligada a estes dois parâmetros), eleva-se o nível de sinal;

Tanto a usinagem de ultraprecisão como a EA no monitoramento de processos de ultraprecisão são técnicas recentes, ainda carentes de maior número de resultados. No Brasil, este problema é ainda mais marcante, pois apenas dois grupos de pesquisa estudam a usinagem de ultraprecisão, sendo que o Laboratório de Engenharia de Precisão da EESC/USP é um deles. Portanto, a publicação de resultados na área é necessária e urgente.

## 5.2- Sugestões para Trabalhos Futuros

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

- Utilizar outras técnicas de EA, como sinal bruto (puro), e obter os espectros de frequência;
- Utilizar outras técnicas de monitoramento no torneamento de ultraprecisão, como força de corte, aliadas à EA, para efeito de comparação;
- Utilizar a EA no monitoramento da retificação de ultraprecisão de materiais frágeis;
- Monitorar a usinagem de ultraprecisão de outros tipos de materiais, tanto frágeis como dúcteis, através da EA.

## BIBLIOGRAFIA

### 6.1 – Bibliografia Citada

- AKBARI, J.; SAITO, Y.; HANAOKA, T.; ENOMOTO, S. (1993). Detection of cutting mode during scratching of ceramics using acoustic emission. *International Journal of Japan Society of Precision Engineering*, v.27, n.1, p.35-40.
- AKBARI, J.; SAITO, Y.; HANAOKA, T.; ENOMOTO, S. (1994). Acoustic emission and deformation mode in ceramics during indentation. *JSME International Journal*, v.37, n.4, p.488-494.
- AKBARI, J.; SAITO, Y.; HANAOKA, T.; ENOMOTO, S. (1995). Using acoustic emission for monitoring of grinding process of fine ceramics. *JSME International Journal, Series C*, v.38, n.1, p.175-180.
- BEATTIE, A.G. (1983). Acoustic emission, principles and instrumentation. *Journal of Acoustic Emission*, v.2, n.1, p.95-128.
- BERGNER, F. (1996). High-frequency acoustic emission induced by indentation fracture in brittle materials. *Acustica*, v.82, p.498-503.

- BIFANO, T.G.; YI, Y. (1992). Acoustic emission as an indicator of material-removal regime in glass micro-machining. *Precision Engineering*, v.14, n.4, p.219-228.
- BLACKLEY, W.S.; SCATTERGOOD, R.O (1990). Crystal orientation dependence of machining damage – a stress model. *Journal of the American Ceramic Society*, v.73, n.10, p.3113-3115.
- BLACKLEY, W.S.; SCATTERGOOD, R.O (1991). Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials. *Precision Engineering*, v.13, n.2, p.95-103.
- BLACKLEY, W.S.; SCATTERGOOD, R.O (1994). Chip topography for ductile-regime machining of germanium. *Journal of Engineering for Industry*, v.116, p.263-266.
- BLAKE, P.N.; SCATTERGOOD, R.O. (1990). Ductile-regime machining of germanium and silicon. *Journal of American Ceramic Society*, v.73, n.4, p.949-957.
- BLOUGH, C.G.; ROSSI, M.; MACK, S.K.; MICHAELS, R.L. (1997). Single-point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements. *Applied Optics*, v.36, n.20, p. 4648-4654.

- BLUM, T.; SUZUKI, I.; INASAKI, I. (1988). Development of a condition monitoring system for cutting tools using an acoustic emission sensor. *Bulletin of Japan Society of Precision Engineering*, v.22, n.4, p.301-308.
- BYRNE, G.; DORNFELD, D.; INASAKI, I.; KETTELER, G.; KÖNIG, W.; TETL,R. (1995). Tool condition monitoring.- The status of research and industrial application. *Annals of the CIRP*, v.44, n.2, p.541-567.
- CHANG, Y.P.; HASHIMURA, M.; DORNFELD, D.A. (1996). An investigation of the AE signals in the lapping process. *Annals of the CIRP*, v.45, n.1, p.331-334.
- CHAO, C.L. (1991). Investigation of the machine glasses and other normally brittle materials in the ductile regime. *PhD Thesis*, Cranfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science, 203p.
- CHOI, G.H.; CHOI, G.S. (1997). Experimental study on AE from precision diamond machining. *KSME International Journal*, v.11, n.6, p.605-610.
- COELHO, R.T.; SANCHEZ, L.E.A.; OLIVEIRA, J.F.G.; SELEGHIM JR, P. (1996). An investigation into the behaviour of ceramic materials under scratching test using acoustic emission. *Proceedings of the International Manufacturing Engineering Conference*, Connecticut, USA, Aug.7-9, p.41-43.

- DIEI, E.N.; DORNFELD, D.A. (1987). A model of tool fracture generated acoustic emission during machining. *Journal of Engineering for Industry* v.109, p.227-233.
- DINIZ, A.E.; DORNFELD, D.A.; LIU, J.J. (1992). Correlating tool life, tool wear and surface roughness by monitoring acoustic emission in finish turning. *Wear*, v.152, p.395-407.
- DINIZ, A.E.; PIGARI, A. (1996). Monitoramento do desgaste da ferramenta no processo de torneamento usando emissão acústica. *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*, v.18, n.3, p.227-238.
- DONG, W.P.; JOE AU, Y.H.; MARDAPITTAS, A. (1994). Characteristics of acoustic emission in drilling. *Tribology International*, v.27, n.3, p.169-170.
- DORNFELD, D.A.; LIU, J.J. (1993). Abrasive texturing and burnishing process monitoring using acoustic emission. *Annals of the CIRP*, v.42, n.1, p.397-400.
- DORNFELD, D.A. (1994). In process recognition of cutting states. *JSME International Journals, Series C*, v.37, n.4, p.638-650.
- DUDUCH, J.G. (1993). Some critical aspects of machine design and performance for the machining of brittle materials. *PhD Thesis*, Cranfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science, 168p.

- FISHER, R.M.; LALLY, J.S. (1967). Microplasticity detected by an acoustic technique. *Canadian Journal of Physics*, v.45, p.1147-1159.
- GAO, R.X.; FRIEDRICH, C.R. (1994). Acoustic emission measurement for the in-process monitoring of diamond turning. *IEEE*, v.7, p.757-760, may (10-12).
- HEIPLE, C.R.; CARPENTER, S.H.; ARMENTROUT, D.L.; McMANIGLE, A.P. (1994). Acoustic emission from single point machining: source mechanisms and signal changes with tool wear. *Materials Evaluation*, v.3, p.590-596.
- HUNDT, W.; LEUENBERGER, F.R.; GYGAX, P. (1994). An approach to monitoring of the grinding process using acoustic emission technique. *Annals of the CIRP*, v.43, n.1, p.295-298.
- INASAKI, I.; AIDA, S.; FUKUOKA, S. (1987). Monitoring system for cutting tool failure using an acoustic emission sensor. *JSME International Journal*, v.30, n.261, p.523-528.
- INASAKI, I. (1998). Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes. *Ultrasonics*, v.36, p.273-281.
- JASINEVICIUS, R.G. (1998). Influência da transição de fase sobre os limites de ductilidade observados no torneamento de ultraprecisão do silício

monocristalino. *Tese (Doutorado)*, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 173p.

KANNATEY-ASIBU JR, E.; DORNFELD, D.A. (1981). Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting. *Journal of Engineering for Industry*, v.103, p.330-340.

KLAIBER, J.R.; DORNFELD, D.A., LIU, J.J. (1990). Acoustic emission feedback for diamond turning, *Proc. 18<sup>th</sup> NAMRC, SME*, p.113-119.

KO, T.J.; CHO, D.W. (1994). Tool wear monitoring in diamond turning by fuzzy pattern recognition. *Journal of Engineering for Industry* v.116, p.225-232.

KRAUSKOPF, B. (1984). Diamond turning: reflecting demands for precision. *Manufacturing Engineering*, v.92, n.5, p.90-100.

KUNZ, R.R.; CLARK, H.R.; NITISHIN, P.M.; ROTHSCHILD, M.; AHERN, B.S. (1996). High resolution studies of crystalline damage induced by lapping and single-point diamond machining of Si (100). *Journal of Material Research*, v.11, n.5, p.1228-1237.

LAN, M.S.; DORNFELD, D.A. (1984). In-process tool fracture detection. *Journal of Engineering Materials and technology*, v.106, p.111-118.

- LAWN, B.R.; EVANS, A.G. (1977). A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields. *Journal of Materials Science*, v.12, p.2195-2199.
- LEEM, C.S. (1997). A practical monitoring strategy for machining process control. *International Journal of Production Research*, v.35, n.4, p.1051-1066.
- LEUNG, T.P.; LEE, W.B.; LU, X.M. (1998). Diamond turning of silicon substrates in ductile-regime. *Journal of Materials Processing Technology*, v.73, p.42-48.
- LICHT, T. (1979). Acoustic emission. *Technical Review*, n.2, p.3-36.
- LIPTAI, R.G.; HARRIS, D.O.; ENGLE, R.B.; TATRO, C.A. (1971). Acoustic emission techniques in materials research. *International Journal of Nondestructive Testing*, v.30, p.215-275.
- LIU, J.J. (1991). Monitoring the precision machining process: sensors, signal processing and information analysis. *PhD Thesis*, University of California at Berkeley, 171p.
- LIU, J.J.; DORNFELD, D.A. (1996). Modeling and analysis of acoustic emission in diamond turning. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v.118, p.199-207.
- LORD JR, A.E. (1975). Acoustic emission. *Physical Acoustics*, v.11, p.289-359.

- LUCCA, D.A.; MAGGIORE, C.J.; RHORER, R.L. (1996). Subsurface damage distribution in ultraprecision machined CdS. *Annals of the CIRP*, v.45, n.1, p.519-522.
- MARINELLI FILHO, N. (1997). Monitoramento da operação de dressagem de rebolos através de emissão acústica. *Dissertação (Mestrado)*, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 113p.
- McKEOWN, P.A. (1987). The role of precision engineering in manufacturing of the future. *Annals of the CIRP*, v.36, n.2, p.495-501.
- MOON, Y.; LEE, Y.L.; DORNFELD, D.A. (1999). Study of slurry chemical influence in ductile/brittle transition depth in chemical mechanical polishing (CMP) using acoustic emission sensor. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference and General Meeting of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, Bremen, Germany, May 31-4, p.345-348.
- MORIWAKI, T. (1983). Application of acoustic emission measurement to sensing of wear and breakage of cutting tool. *Bulletin of Japan Society of Precision Engineering*, v.17, n.3, p.154-160.
- MORIWAKI, T. (1984). Sensing and prediction of cutting tool failure. *Bulletin of Japan Society of Precision Engineering*, v.18, n.2, p.90-96.

- MORRIS, J.C.; CALLAHAN, D.L.; KULIK, J.; PATEN, J.A.; SCATTERGOOD, R.O. (1995). Origins of the ductile regime in single-point diamond turning of semiconductors. *Journal of the American Ceramic Society*, v.78, n.8, p.2015-2020.
- OLIVEIRA, J.F.G.; DORNFELD, D.A.; WINTER, B. (1994). Dimensional characterization of grinding wheel surface through acoustic emission. *Annals of the CIRP*, v.43, n.1, p.291-294.
- PAGOTTO, C.R. (1998). Análise do processo de torneamento do silício policristalino, *Dissertação (Mestrado)*. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 100p.
- PARR-BURMAN, P.; SHORE, P. (1996). Diamond turning of silicon optics. *SPIE*, v.2775, p.575-584.
- PAUL, E.; EVANS, C.J.; MANGAMELLI, A.; McGLAUFLIN, M.L.; POLVANI, R.S. (1996). Chemical aspects of tool wear in single point diamond turning. *Precision Engineering*, v.18, p.4-19.
- RAVINDRA, H.V.; SRINIVASA, Y.G.; KRISHNAMURTHY, R. (1997). Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting. *Wear*, v.212, p.78-84.

- SAINI, D.P.; PARK, Y.J. (1996). A quantitative model of acoustic emissions in orthogonal cutting operations. *Journal of Materials Processing Technology*, v.58, p.343-350.
- SANCHEZ, L.E.A. (1997). Estudo do comportamento da emissão acústica (EA) no ensaio de riscamento em materiais cerâmicos. *Tese (Doutorado)*. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 152p.
- SCHROETER, R.B. (1997). Usinagem de ultraprecisão de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho. *Tese (Doutorado)*, Universidade Federal de Santa Catarina, 194p.
- SHAW, M.C. (1995). Precision finishing. *Annals of the CIRP*, v.44, n.1, p.343-348.
- SHIBATA, T.; ONO, A.K.; MAKINO, E.; IKEDA, M. (1994). Cross-section transmission electron microscope observations of diamond turned single crystal Si surfaces. *Applied Physics Letter*, v.65, n.20, p.2553-2555.
- SHIBATA, T.; FUJII, S.; MAKINO, E.; IKEDA, M. (1996). Ductile-regime turning mechanism of single-crystal silicon. *Precision Engineering*, v.18, p.129-137.
- SHIMADA, S.; IKAWA, N.; INAMURA, T.; TAKEZAWA, N.; OHMORI, H.; SATA, T. (1995). Brittle-ductile transition phenomena in microindentation and micromachining. *Annals of the CIRP*, v.44, n.1, p.523-526.

- SPEAR, K.E. (1989). Diamond – ceramic coating of the future. *Journal of the American Ceramic Society*, v.72, n.2, p.171-191.
- STOWERS, I.F.; KOMANDURI, R.; BAIRD, E.D. (1988). Review of precision surface generating process and their potential application to the fabrication of large optical components. *Proceedings of SPIE – Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics*, v.966, p.62-72.
- SUKVITTAYAWONG, S.; INASAKI, I. (1991). Identification of chip form in turning process. *JSME International Journal Series III*, v.34, n.4, p.553-560.
- TANIKELLA, B.V.; SCATTERGOOD, R.O. (1995). Acoustic emission during indentation fracture. *Journal of the American Ceramic Society*, v.78, n.6, p.1698-1702.
- TETI, R.; DORNFELD, D.A. (1989). Modeling and experimental analysis of acoustic emission from metal cutting. *Journal of Engineering for Industry* v.111, p.229-237.
- TÖNSHOFF, H.K.; WULFSBERG, J.P.; KALS, H.J.J.; KÖNIG, W.; van LUTTERVELT, C.A. (1988). Development and trends in monitoring and control of machining processes. *Annals of the CIRP*, v.37, n.2, p.611-622.

- UEHARA, K.; KANDA, Y. (1984). Identification of chip formation mechanism through acoustic emission measurements. *Annals of the CIRP*, v.33, n.1, p.71-74.
- VENKATESH, V.C.; INASAKI, I.; TÖENSHOF, H.K.; NAKAGAWA, T.; MARINESCU, I.D. (1995). Observations on polishing and ultraprecision machining of semiconductor substrate materials. *Annals of the CIRP*, v.44, n.2, p.611-618.
- WASCHKIES, E.; SKLARCZYK, C.; HEPP, K. (1994). Tool wear monitoring at turning. *Journal of Engineering for Industry* v.116, p.521-524.
- WEBSTER, J.; MARINESCU, I.; BENNETT, R. (1994). Acoustic emission for process control and monitoring of surface integrity during grinding. *Annals of the CIRP*, v.43, n.1, p.299-304.
- WEBSTER, J.; DONG, W.P.; LINDSAY, R.(1996). Raw acoustic emission signal analysis of grinding process. *Annals of the CIRP*, v.45, n.1, p.335-340.
- WILLIAMS, R.E. (1998). Acoustic emission characteristics of abrasive flow machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v.120, p.264-271.

WONG, C.J. (1981). Fracture and wear of diamond cutting tools. *Journal of Engineering Materials and Technology*, v.103, p.341-345.

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

## 6.2 – Bibliografia Consultada

NATIONAL INSTRUMENTS (1998). Instrumentation catalogue – measurement and automation. Austin, Texas, USA.

STEPHENS, R.B.W.; LEVENTHALL, H.G. (1974). *Acoustics and vibration progress*. Londres, Ed. Chapman and Hall Ltd.

WILLIAMS, R.V. (1980). *Acoustic emission*. Londres, Ed. Adam Hilger Ltd.