

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

***USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO DE ELEMENTOS ÓPTICOS  
TRANSMISSIVOS NO ESPECTRO INFRAVERMELHO***

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA  
CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR  
EM ENGENHARIA MECÂNICA

ROLF BERTRAND SCHROETER

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 1997

**USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO DE ELEMENTOS ÓPTICOS  
TRANSMISSIVOS NO ESPECTRO INFRAVERMELHO**

**ROLF BERTRAND SCHROETER**

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE**

**DOUTOR EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA  
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**



*Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.*

**Orientador**



*Prof. Abelardo Alves de Queiroz, Ph.D*

**Coordenador da Pós-Graduação**

**BANCA EXAMINADORA:**



*Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.*

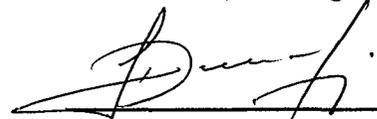
**Presidente**



*Prof. Armando A. Gonçalves Jr., Dr. Eng. Mec.*



*Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng. Mec.*



*Prof. Jaime Duduch, Ph.D*



*Dr. Volker Sinhoff, Dr.-Ing.*

## Biografia do Autor

Rolf Bertrand Schroeter, nascido em 3/9/61 em Montenegro/RS, formado engenheiro mecânico em 1984 pela Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, concluiu seu mestrado com o tema "Alargamento de Precisão em Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Gume Único Regulável" em 1989 pelo curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina e seu doutorado com o tema "Usinagem de Ultraprecisão de Elementos Ópticos Transmissivos no Espectro Infravermelho" em 1997, também pelo curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

De 1980 a 1984 realizou diversos estágios profissionalizantes em empresas, instituições de ensino e universidades, dentre os quais estágios de torneiro mecânico, ajustador mecânico, soldador e mecânico de automóveis no SENAI - Curitiba/PR, na firma Máquinas Schreiner S.A., em Santa Cruz do Sul /RS, na área de máquinas para olarias, na firma HOH - Bombas e Máquinas Industriais S.A., em Blumenau/SC, no campo de fabricação de máquinas em geral e na Rede Ferroviária Federal S.A., em Curitiba/PR, atuando na nacionalização de componentes para máquinas de Via Permanente. No período de 7/84 a 2/85 estagiou no IKE - Instituto para Energia Nuclear e Sistemas de Energia da Universidade de Stuttgart, Alemanha, no campo de soldas especiais (LASER, difusão e feixe de elétrons) e na firma Heirich Jung & Sohn, Halver, Alemanha, na área de forjaria.

De 5/85 a 2/87 trabalhou como engenheiro de Planejamento Técnico na firma Robert Bosch Ltda, exercendo atividades na área de planejamento de processos, controle e otimização da usinagem de componentes para bombas injetoras Diesel, em Curitiba/PR e Campinas/SP. No período de 3/87 a 10/89 atuou como assistente de pesquisa no LMP - Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina, em Florianópolis/SC, na área de usinagem convencional e de precisão. Após a conclusão do mestrado exerceu atividades de pesquisa na área de usinagem convencional e de precisão com ferramentas de geometria definida de 11/89 a 2/94 neste mesmo laboratório. Neste período foi responsável pela coordenação de convênios de pesquisa entre universidade e indústria, pelo suporte técnico e orientação de alunos de graduação e pós-

graduação, ministrou aulas nos cursos de graduação e pós-graduação em engenharia mecânica e engenharia de automação e participou como membro de bancas de mestrado. De 3/94 a 2/97 trabalhou como assistente de pesquisa no IPT - Instituto para Tecnologia de Produção da Fundação Fraunhofer, na cidade de Aachen, Alemanha, atuando na área de usinagem de ultraprecisão. Neste período exerceu atividades de desenvolvimento e pesquisa na fabricação de elementos ópticos e mecânicos de altíssima qualidade em metais não ferrosos, plásticos e cristais infravermelhos através da usinagem com diamante monocristalino, bem como trabalhos cooperativos com a indústria no desenvolvimento de novas técnicas de produção através da usinagem de ultraprecisão.

No período que atuou como pesquisador no LMP - UFSC e no IPT - Aachen publicou cerca de vinte artigos técnicos na área de usinagem convencional, de precisão e de ultraprecisão em congressos, revistas nacionais e estrangeiras, foi co-autor de um livro sobre a Tecnologia da Usinagem de Ligas de Alumínio e realizou cursos de aprimoramento no Brasil e na Alemanha.

A Clotar e Trudi  
A Carmen Elena

## Agradecimentos

Ao Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, coordenador do LMP - Laboratório de Mecânica de Precisão, pela orientação deste trabalho, pelo apoio, pela amizade e pelo exemplo de capacidade técnica.

Ao Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Wilfried König e ao Prof. Dr.-Ing. Fritz Klocke, diretores do IPT - Instituto para Tecnologia de Produção da Fundação Fraunhofer (IPT - Aachen), pelo apoio para a realização das atividades de pesquisa neste instituto.

Aos engenheiros-chefes do IPT - Aachen Dr.-Ing. Stefan Hartung e Dr.-Ing. Volker Sinhoff, pelo apoio irrestrito em todos os momentos.

Ao CNPq/RHAE - Mecânica de Precisão, pela concessão de bolsa de estudos para a realização deste trabalho.

À firma KISTLER Instrumente AG, pelo empréstimo de equipamentos para a realização de ensaios comparativos de forças na usinagem de ultraprecisão.

Aos colegas de trabalho no IPT - Aachen Dr.-Ing. Stefan Zamel, Dr.-Ing. Karl-Friedrich Koch, Dipl.-Ing. Sven Jochmann e Dipl.-Ing. Olaf Rübenach, pela amizade, sugestões e apoio, bem como pelo excelente clima de trabalho.

Ao colega de IPT - Aachen Dipl.-Ing. Paul Neises, pelo trabalho conjunto para a realização das pesquisas no campo da medição de forças de usinagem ultrapequenas.

Em especial aos colegas de IPT - Aachen Dipl.-Ing. Wolfgang Hilgers, Dipl.-Ing. Stephan Fischer e Wolfgang Niegel, pela amizade incondicional, pela disposição na transmissão dos conhecimentos, pelo agradável clima de trabalho, pelas sugestões e pelo indispensável suporte técnico.

À minha tia Eva Schroeter e, postumamente, ao meu tio Rolf Schroeter, pelo apoio em todos os momentos e pelo sentimento de família proporcionado nos anos de Alemanha. Aos meus pais Clotar e Trudi Schroeter, pelo amor dedicado, pelo incentivo à busca pelo conhecimento, pelo apoio irrestrito em todos os momentos de minha vida, pela revisão do texto deste trabalho e pelo exemplo de vida.

Ao meu irmão Curt, pelo apoio moral e pelo exemplo de integridade, perseverança e dedicação na busca do aprimoramento profissional e pessoal.

A Carmen Elena Rivas Cáceres, companheira de tantos momentos, pelo amor, pela amizade, pelo exemplo de capacidade profissional e pelo apoio incondicional mesmo nas horas mais difíceis.

Ao Eng. Ricardo Machado Peres, M. Eng. Mec., pela revisão do texto deste trabalho.

Ao tecnólogo João Carlos de Oliveira Lopes, M. Eng. Mec., e ao Eng. Daniel Carlos da Silva, pelo indispensável apoio à distância.

À biblioteconomista Vera Lúcia Quadro Duarte e à secretária Rosimar Maria Franzoi, pelos anos de bom trabalho em conjunto e pelo apoio constante.

Aos colegas de trabalho do IPT - Aachen e do LMP - Laboratório de Mecânica de Precisão, pelo apoio e pela amizade.

Aos colegas de curso e professores de Engenharia Mecânica.

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

## Índice

<b>Simbologia .....</b>	<b>X</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>xvii</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>xxi</b>
<b>Kurzfassung.....</b>	<b>xxii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>xxiii</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Estado da Arte .....</b>	<b>7</b>
2.1. A Usinagem de Ultraprecisão .....	7
2.2. O Diamante Monocristalino como Ferramenta de Corte.....	24
2.3. A Usinagem Dúctil de Materiais Duros e Frágeis .....	36
2.4. Forças na Usinagem de Ultraprecisão .....	46
<b>3. Objetivos do Trabalho .....</b>	<b>63</b>
<b>4. Sistema de Medição de Forças na Usinagem.....</b>	<b>66</b>
4.1. Projeto de um Sistema para Medição de Forças Ultrapequenas .....	66
4.2. Configuração do Sistema de Medição de Forças.....	69
4.3. Análise das Características do Sistema de Medição .....	71
<b>5. Planejamento Experimental.....</b>	<b>79</b>
<b>6. Análise dos Resultados .....</b>	<b>86</b>
6.1. Influências sobre a Qualidade Superficial.....	86
6.1.1. Avanço.....	86
6.1.2. Profundidade de corte .....	93
6.1.3. Velocidade de corte .....	97
6.1.4. Raio de quina .....	102

---

6.1.5. Ângulo de saída .....	106
6.1.6. Material da peça .....	110
6.2. Influências sobre as Forças na Usinagem .....	113
6.2.1. Avanço.....	113
6.2.2. Profundidade de corte .....	117
6.2.3. Velocidade de corte.....	119
6.2.4. Fluido de corte .....	120
6.2.5. Raio de quina .....	123
6.2.6. Ângulo de saída.....	126
6.2.7. Desgaste e raio de gume .....	129
6.2.8. Material da peça .....	132
6.2.9. Relação entre as forças de corte e passivas .....	137
6.2.10. Comparação entre resultados de força obtidos com diferentes sistemas de medição .....	141
6.3. Relação entre Forças na Usinagem e Qualidade Superficial .....	143
<b>7. Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos .....</b>	<b>146</b>
7.1. Conclusões .....	146
7.2. Sugestões para Futuros Trabalhos .....	151
<b>8. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>154</b>
<b>9. Anexos .....</b>	<b>175</b>
9.1. Características dos Equipamentos Utilizados.....	175
9.1.1. Máquina de ultraprecisão Rank Pneumo Precision MSG 325.....	175
9.1.2. Microscópio interferométrico Wyko TOPO-3D .....	176
9.1.3. Microscópio óptico Olympus BH2-UMA .....	178
9.1.4. Sistema de medição de forças.....	179
9.2. Análise Estatística .....	181
9.2.1. Análise estatística da qualidade superficial.....	181
9.2.2. Análise estatística das forças.....	192

## Simbologia

### Letras maiúsculas

A	-	Fator de anisotropia
A	$\mu\text{m}^2$	Seção do cavaco indeformado
$A_{VB}$	$\mu\text{m}^2$	Área de contato entre peça e flanco da ferramenta
$\hat{A}_s$	nm	Amplitude máxima de vibração
C	$\text{mm}^{-1}$	Curvatura no vértice da anesfera
C	$\text{N}/\text{mm}^2$	Tensão específica
E	$\text{N}/\text{mm}^2$	Módulo de elasticidade
F	mN, N	Força de usinagem
$F_c$	mN, N	Força de corte
$F_f$	mN, N	Força de avanço
$F_n$	mN, N	Força normal
$F_p$	mN, N	Força passiva
$F_t$	mN, N	Força tangencial
$F_v$	mN, N	Força de corte
$F_w$	mN, N	Força de atrito
$F_x$	mN, N	Força na direção x
$F_y$	mN, N	Força na direção tangencial ou na direção y
$F_z$	mN, N	Força na direção normal ou na direção z
$F_{y,\text{cut}}$	mN, N	Força tangencial devido ao processo de corte
$F_{y,\text{res}}$	mN, N	Força tangencial devido à deformação do material
$F_{z,\text{cut}}$	mN, N	Força normal devido ao processo de corte
$F_{z,\text{res}}$	mN, N	Força normal devido à deformação do material
$F_N(z_i,0)$	-	Função de distribuição normal
H	Knoop	Dureza do material
$H_A$	-	Hipótese alternativa
$H_{(d)}$	$\text{kg}/\text{mm}^2$	Dureza do material em função da profundidade
$H_0$	-	Hipótese inicial
$H_0$	$\text{kg}/\text{mm}^2$	Dureza-base do material

K	-	Constante cônica da anesfera
$K_c$	$N/mm^{5/2}$	Tenacidade à fratura
M	-	Fator de Taylor
P	$N/mm^2$	Pressão sobre o cavaco
P-V	nm, $\mu m$	Rugosidade ou erro de forma pico-vale
R	mm	Raio da esfera
R	mm	Raio-base da anesfera
R	mm	Raio de coordenadas polares
RMS	nm, $\mu m$	Rugosidade média quadrática
$R_a$	nm, $\mu m$	Rugosidade média aritmética
$R_{a,teór}$	nm, $\mu m$	Rugosidade média aritmética teórica
$R_t$	nm, $\mu m$	Profundidade máxima de rugosidade
$R_{t,teór}$	nm, $\mu m$	Profundidade máxima de rugosidade teórica
$R_z$	nm, $\mu m$	Rugosidade média
S	nm, $\mu m$	Profundidade de danos

### Letras minúsculas

a	-	Meio intervalo de confiança
a	-	Coefficiente da equação exponencial de dureza
$a_i$	-	Coefficientes anesféricos
$a_p$	$\mu m$ , mm	Profundidade de corte
$a_{p,min}$	$\mu m$	Profundidade de corte mínima
b	$\mu m$ , mm	Largura de usinagem
$b_{cu}$	$\mu m$	Largura de usinagem
c	J/g.K	Capacidade térmica específica
d	$\mu m$	Profundidade do perfil de dureza do material
$d_k$	$\mu m$	Profundidade crítica de penetração
e	-	Excentricidade do cone-base da anesfera
f	$\mu m$ , mm	Avanço por rotação
f	Hz, kHz	Freqüência
$f_{i,e,a}$	-	Freqüência esperada absoluta

$f_{i,e,r}$	-	Frequência esperada relativa
$f_{i,o,a}$	-	Frequência observada absoluta
$f_{i,o,r}$	-	Frequência observada relativa
$h$	$\mu\text{m}$ , $\text{mm}$	Espessura de usinagem
$h_{cu}$	$\mu\text{m}$	Espessura de usinagem
$h_{cu,f}$	$\mu\text{m}$	Espessura de usinagem no pico da rugosidade cinemática
$h_{cu,n}$	$\mu\text{m}$	Espessura de usinagem na direção normal
$h_{cu,o}$	$\mu\text{m}$	Espessura de usinagem na base do cavaco
$h_{cu,m\acute{a}x}$	$\mu\text{m}$	Espessura de usinagem máxima
$h_{cu,m\acute{i}n}$	$\mu\text{m}$	Espessura de usinagem mínima
$h_{cu,\varphi}$	$\mu\text{m}$	Espessura de usinagem para um ângulo $\varphi$
$h_k$	$\text{nm}$ , $\text{pm}$	Espessura de usinagem crítica
$k$	-	Número de intervalos de classe
$k$	-	Constante da equação de dureza
$k_{C1.1}$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Força específica de corte para $1 \times 1 \text{ mm}^2$
$k_c$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Força específica de corte
$k_{cc}$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Força específica de corte na região deformada
$k_{cr}$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Força específica de corte na região de atrito
$k_f$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Força específica de avanço
$k_{fc}$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Força específica de avanço na região deformada
$k_{fr}$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Força específica de avanço na região de atrito
$k_n$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Força específica na direção normal
$k_t$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Força específica na direção tangencial
$l_k$	$\mu\text{m}$	Comprimento crítico de fraturas
$m$	-	Número de parâmetros aproximados
$n$	$\text{rpm}$	Rotação por minuto
$n$	-	Expoente do endurecimento por deformação
$n$	-	Índice de refração
$n$	-	Tamanho da amostra
$r_\epsilon$	$\text{mm}$	Raio de quina da ferramenta
$s$	-	Desvio-padrão da amostra
$s^2$	-	Variância da amostra

$t$	-	Coefficiente de Student
$v_c$	m/min	Velocidade de corte
$v_f$	m/min	Velocidade de avanço
$w$	$\mu\text{m}$	Comprimento de contato
$\bar{x}$	-	Média da amostra
$Z_{i,o}$	-	Variável reduzida para a distribuição normal
$(1 - m_c)$	-	Expoente de Kienzle para a força de corte
$(1 - m_n)$	-	Expoente de Kienzle para a força normal
$(1 - m_t)$	-	Expoente de Kienzle para a força tangencial

### Letras gregas

$\alpha$	graus	Ângulo de incidência da ferramenta
$\alpha$	$\text{cm}^{-1}$	Coefficiente de absorção
$\alpha$	$\text{K}^{-1}$	Coefficiente de dilatação térmica
$\alpha$	%	Nível de significância
$\beta$	-	Fator de processo
$\chi$	graus	Ângulo de direção do gume principal
$\chi'$	graus	Ângulo de direção do gume secundário
$\chi_i^2$	-	Valor de classe do teste Qui-quadrado
$\chi_{\text{crit}}^2$	-	Valor crítico de teste Qui-quadrado
$\chi_0^2$	-	Valor de teste Qui-quadrado
$\Delta$	-	Diferença
$\delta$	$\mu\text{m}$	Profundidade de endurecimento observada
$\bar{\varepsilon}$	mm	Deformação efetiva
$\varepsilon$	graus	Ângulo de quina da ferramenta
$\gamma$	graus	Ângulo de saída da ferramenta
$\gamma$	-	Nível de confiança
$\gamma_{\text{ef}}$	graus	Ângulo de saída efetivo

$\varphi$	graus	Ângulo entre a normal à superfície usinada e o ponto do raio de quina em questão
$\varphi_0$	graus	Ângulo para o ponto de espessura de usinagem nula na região do gume secundário
$\varphi_{1.1}$	graus	Ângulo para o ponto de espessura de usinagem máxima
$\varphi_{1.2}$	graus	Ângulo para o ponto de espessura de usinagem nula na região do gume principal
$\kappa$	-	Relação entre dureza e resistência ao escoamento
$\lambda$	graus	Ângulo de inclinação da ferramenta
$\lambda$	$\mu\text{m}$	Campo de transmissão
$\lambda$	J/K.m.s	Coefficiente de transmissão de calor
$\lambda_s$	$\mu\text{m}$	Comprimento de onda
$\mu$	-	Média da distribuição
$\mu$	-	Coefficiente de atrito
$\nu$	-	Grau de liberdade do teste Qui-quadrado
$\theta$	graus	Ângulo de coordenadas polares
$\theta$	graus	Ângulo do ponto de estagnação
$\rho$	$\text{g/cm}^3$	Densidade
$\rho$	nm	Raio de gume da ferramenta
$\Sigma$	-	Somatória
$\sigma$	-	Desvio-padrão da distribuição
$\sigma^2$	-	Variância da distribuição
$\sigma_b$	$\text{N/mm}^2$	Resistência ao escoamento
$\bar{\sigma}$	$\text{N/mm}^2$	Tensão efetiva
$\tau$	%	Transmissão máxima
$\tau$	$\text{N/mm}^2$	Tensão de cisalhamento
$\tau_c$	$\text{N/mm}^2$	Tensão de compressão crítica

**Abreviaturas e Símbolos Químicos**

A/D	-	Analógico/Digital
ASME	-	American Society of Mechanical Engineers
ASPE	-	The American Society for Precision Engineering
BMFT	-	Bundesministerium für Forschung und Technologie
CaF <sub>2</sub>	-	Fluoreto de Cálcio
CD	-	Compact-Disc
CIRP	-	International Institution for Production Engineering Research
CNC	-	Computer Numeric Control
CO <sub>2</sub>	-	Dióxido de Carbono
COBEM	-	Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica
CVD	-	Chemical Vapour Deposition
DFG	-	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	-	Deutsche Industrie Normen
FSO	-	Full Scale Operation
GaAs	-	Arsenito de Gálio
Ge	-	Germânio
HV	-	Dureza Vickers
IDR	-	Industrie Diamanten Rundschau
IPES	-	International Precision Engineering Seminar
IPT	-	Institut für Produktionstechnologie
IR	-	Infravermelho
JSME	-	Japan Society of Mechanical Engineers
KCl	-	Cloreto de Potássio
KDP	-	Dihidrogenofosfato de potássio
LASER	-	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LMP	-	Laboratório de Mecânica de Precisão
OF	-	Oxygen Free
OFHC	-	Oxygen Free High Conductivity
PC	-	Personal Computer

---

PCBN	-	Nitreto de Boro Cúbico Policristalino
RECM	-	Round Edge Cutting Model
RWTH	-	Rheinisch Westfälische Technische Hochschule
SECM	-	Sharp Edge Cutting Model
Si	-	Silício
SME	-	Society of Manufacturing Engineers
SPIE	-	Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers
UFSC	-	Universidade Federal de Santa Catarina
UME	-	Ultraprecision in Manufacturing Engineering
VDI	-	Verein Deutscher Ingenieure
WZL	-	Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre
ZnS	-	Sulfeto de Zinco
ZnSe	-	Selenito de Zinco

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.1</b> - Sistema óptico para "CD".....	3
<b>Figura 2.1</b> - Tendências no desenvolvimento da precisão através da usinagem de ultraprecisão.....	8
<b>Figura 2.2</b> - Campos de aplicação, materiais e especificações para a usinagem de ultraprecisão.....	13
<b>Figura 2.3</b> - Materiais empregados na usinagem com diamante.....	16
<b>Figura 2.4</b> - Cinemática do processo aplicado à usinagem de ultraprecisão.....	18
<b>Figura 2.5</b> - Fatores de influência sobre a precisão da peça na usinagem de ultraprecisão.....	24
<b>Figura 2.6</b> - Comparação entre a dureza e resistência à flexão dos diferentes materiais de corte atualmente empregados.....	26
<b>Figura 2.7</b> - Estrutura e planos de maior dureza de um cristal de diamante.....	27
<b>Figura 2.8</b> - Classificação de diamantes.....	28
<b>Figura 2.9</b> - Formação de picos de rugosidade conforme a teoria de Brammertz.....	29
<b>Figura 2.10</b> - Diferentes variantes para a orientação de ferramentas de diamante monocristalino.....	31
<b>Figura 2.11</b> - Formas de desgaste em ferramentas de diamante.....	32
<b>Figura 2.12</b> - Relação entre raios de gume de ferramentas de diamante e de metal-duro.....	35
<b>Figura 2.13</b> - Formação de cavacos na usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis.....	41
<b>Figura 2.14</b> - Variação da geometria do cavaco em dependência dos parâmetros de usinagem.....	43
<b>Figura 2.15</b> - Componentes da força de usinagem no torneamento.....	47
<b>Figura 2.16</b> - Fatores de influência sobre a força de usinagem.....	49
<b>Figura 2.17</b> - Determinação gráfica da força específica de corte segundo Kienzle.....	52
<b>Figura 2.18</b> - Representação gráfica da força específica de corte segundo Victor.....	53
<b>Figura 2.19</b> - Geometria do cavaco para a usinagem dura de precisão e usinagem de ultraprecisão.....	53

<b>Figura 2.20</b> - Componentes de força para o modelo de Drescher e Dow.....	58
<b>Figura 2.21</b> - Seção transversal da área de corte.....	59
<b>Figura 2.22</b> - Variação de $F_c$ em simulação da usinagem de ultraprecisão.....	62
<b>Figura 4.1</b> - Plataforma para a medição de forças na usinagem de ultraprecisão .....	69
<b>Figura 4.2</b> - Configuração do sistema para medição de forças na ultraprecisão.....	70
<b>Figura 4.3</b> - Sistemática de calibração do sistema de medição de forças .....	72
<b>Figura 4.4</b> - Exemplo de medição relativa de forças .....	73
<b>Figura 4.5</b> - Exemplo da sensibilidade do sistema de medição de forças .....	74
<b>Figura 4.6</b> - Influência da "suavização" sobre o sinal de forças.....	76
<b>Figura 4.7</b> - Comparação entre resultados de força.....	78
<b>Figura 5.1</b> - Características físicas, mecânicas e ópticas de cristais infravermelhos.....	81
<b>Figura 5.2</b> - Máquina de ultraprecisão Rank Pneumo Precision MSG 325.....	82
<b>Figura 5.3</b> - Condições de ensaios para análise da qualidade superficial e das forças.....	85
<b>Figura 6.1</b> - Perfil de rugosidade ideal em função do avanço e do raio de quina da ferramenta .....	87
<b>Figura 6.2</b> - Influência do avanço sobre a rugosidade de germânio.....	89
<b>Figura 6.3</b> - Influência do avanço sobre a rugosidade de ZnS .....	90
<b>Figura 6.4</b> - Resultados de microscopia Nomarski em ZnS.....	91
<b>Figura 6.5</b> - Influência do avanço sobre a rugosidade de Cleartran.....	92
<b>Figura 6.6</b> - Resultados de microscopia Nomarski em Cleartran .....	93
<b>Figura 6.7</b> - Influência da profundidade de corte sobre a rugosidade de germânio .....	95
<b>Figura 6.8</b> - Influência da profundidade de corte sobre a rugosidade de ZnS.....	96
<b>Figura 6.9</b> - Influência da profundidade de corte sobre a rugosidade de Cleartran.....	97
<b>Figura 6.10</b> - Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade de germânio .....	99
<b>Figura 6.11</b> - Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade de ZnS.....	100
<b>Figura 6.12</b> - Deformação elástica em diferente grau para cristais de Cleartran.....	101
<b>Figura 6.13</b> - Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade de Cleartran .....	102
<b>Figura 6.14</b> - Influência do raio de quina sobre a rugosidade de germânio.....	104
<b>Figura 6.15</b> - Influência do raio de quina sobre a rugosidade de ZnS.....	105
<b>Figura 6.16</b> - Influência do raio de quina sobre a rugosidade de Cleartran .....	106

<b>Figura 6.17</b> - Influência do ângulo de saída sobre a rugosidade de germânio .....	108
<b>Figura 6.18</b> - Influência do ângulo de saída sobre a rugosidade de ZnS.....	109
<b>Figura 6.19</b> - Influência do ângulo de saída sobre a rugosidade de Cleartran .....	110
<b>Figura 6.20</b> - Região da fratura em ZnS e Cleartran .....	112
<b>Figura 6.21</b> - Influência do avanço sobre as forças na usinagem .....	114
<b>Figura 6.22</b> - Influência do avanço sobre as forças específicas .....	116
<b>Figura 6.23</b> - Influência da profundidade de corte sobre as forças na usinagem .....	118
<b>Figura 6.24</b> - Influência da profundidade de corte sobre as forças específicas.....	119
<b>Figura 6.25</b> - Influência do fluido de corte sobre as forças de corte e passiva .....	123
<b>Figura 6.26</b> - Influência do raio de quina sobre as forças na usinagem.....	125
<b>Figura 6.27</b> - Influência do raio de quina sobre as forças específicas.....	126
<b>Figura 6.28</b> - Influência do ângulo de saída sobre as forças na usinagem.....	128
<b>Figura 6.29</b> - Relação entre o ângulo de saída efetivo e nominal para pequenos $h_{cu}$ .....	128
<b>Figura 6.30</b> - Influência do ângulo de saída sobre as forças específicas.....	129
<b>Figura 6.31</b> - Influência do material da peça sobre as forças passivas.....	134
<b>Figura 6.32</b> - Influência do material da peça sobre as forças de corte.....	135
<b>Figura 6.33</b> - Influência do material da peça sobre a força específica passiva.....	136
<b>Figura 6.34</b> - Influência do material da peça sobre a força específica de corte.....	136
<b>Figura 6.35</b> - Relação entre força de corte e passiva para variações de avanço .....	140
<b>Figura 6.36</b> - Relação entre força de corte e passiva para variações de profundidade de corte e raio de quina da ferramenta .....	141
<b>Figura 6.37</b> - Resultados de força com dois diferentes sistemas de medição.....	142
<b>Figura 9.1</b> - Esquema de funcionamento do microscópio interferométrico TOPO-3D .....	177
<b>Figura 9.2</b> - Valores de rugosidade $R_a$ da amostra medida .....	183
<b>Figura 9.3</b> - Valores de rugosidade P-V da amostra medida.....	184
<b>Figura 9.4</b> - Distribuição dos valores de $R_a$ em classes de frequência .....	185
<b>Figura 9.5</b> - Distribuição corrigida dos valores de $R_a$ em classes de frequência .....	186
<b>Figura 9.6</b> - Distribuição dos valores de P-V em classes de frequência .....	186
<b>Figura 9.7</b> - Distribuição corrigida dos valores de P-V em classes de frequência.....	187
<b>Figura 9.8</b> - Representação gráfica da distribuição de frequência de $R_a$ e P-V.....	187

---

<b>Figura 9.9</b> - Tabela de cálculo de $\chi_0^2$ para a rugosidade $R_a$ .....	189
<b>Figura 9.10</b> - Tabela de cálculo de $\chi_0^2$ para a rugosidade P-V .....	190
<b>Figura 9.11</b> - Intervalo de confiança em função do tamanho da amostra .....	192
<b>Figura 9.12</b> - Análise estatística das forças na usinagem .....	194

## Resumo

O grande interesse que a aplicação da usinagem de ultraprecisão desperta em toda a indústria de mecânica de precisão, óptica e eletrônica, e em especial os progressos alcançados na obtenção de elementos ópticos em cristais transmissivos no espectro infravermelho através desta tecnologia, têm impulsionado as pesquisas na área de usinagem com diamante de materiais de comportamento assim chamado de "duro e frágil". Estes materiais caracterizam-se por sofrerem fratura frágil para a maior parte das condições de usinagem, podendo entretanto ser usinados no regime dúctil quando respeitadas algumas premissas básicas. Desta forma, a superfície gerada não sofre a ocorrência de danos, e pode satisfazer às exigências normalmente feitas a superfícies ópticas.

Através do estudo sistemático da influência que têm os parâmetros de usinagem e as demais variáveis de trabalho sobre a qualidade superficial de elementos ópticos, objetiva-se com este trabalho um maior conhecimento dos fundamentos da usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis, especificamente de alguns dos cristais infravermelhos de maior importância. Também são estudadas em profundidade as forças que ocorrem durante a usinagem de ultraprecisão de sulfeto de zinco, Cleartran e germânio. A medição de forças na usinagem de ultraprecisão destes cristais infravermelhos apresenta, entretanto, problemas bastante complexos em função do baixo nível e da elevada dinâmica de sinal. Em virtude disto desenvolveu-se primeiramente um sistema de medição de forças na usinagem de ultraprecisão com capacidade para verificar níveis de força inferiores a 10 mN. Além do projeto, construção e análise deste novo sistema de medição, é feita uma análise profunda do comportamento das forças para as diferentes condições de trabalho.

## Kurzfassung

Das große Interesse der Feinmechanik-, Optik- und Elektronikindustrie an der Ultrapräzisionszerspanung, und besonders die Fortschritte bei der Fertigung von Infrarotoptiken durch diese Technologie fördern die Forschungsarbeiten im Bereich der Diamantzerspanung von sogenannten "sprödharten" Werkstoffen. Diese Materialien zeigen unter den meisten Zerspanungsbedingungen ein sprödhartes Verhalten. Unter speziellen Voraussetzungen können diese Werkstoffe allerdings duktil zerspannt werden, so daß eine schädigungsfreie Oberfläche erzeugt wird, die den hohen Anforderungen optischer Teile genügt.

Durch systematische Untersuchungen des Einflusses von verschiedenen Arbeitsparametern auf die Oberflächenqualität optischer Elemente werden im Rahmen dieser Arbeit neue Erkenntnisse über die Grundlagen der duktilen Zerspanung von sprödharten Werkstoffen, insbesondere für die meistverwendeten Infrarotkristalle, gewonnen. Ziel dieser Arbeit ist weiterhin die Zerspanungskräfte für die Infrarotkristalle Zinksulfid, Cleartran und Germanium gründlich zu untersuchen. Da für die Aufnahme der Zerspankräften bei der Ultrapräzisionszerspannung von Infrarotkristallen wegen der hohen Dynamik des Signals und des geringen Niveaus dieser Kräfte kein geeignetes Meßsystem verfügbar war, wurde ein System konstruiert, gebaut und eingesetzt, mit dem Kräfte unter 10 mN erfaßt werden können. Mit diesem System wurde eine umfassende Analyse der Kräfte für verschiedene Arbeitsbedingungen durchgeführt.

## **Abstract**

The great interest of the precision mechanics, optics and electronics industry on ultraprecision machining, and especially the fast progress in the manufacturing of optical elements in infrared crystals by this technology, stimulate the research on the field of diamond machining of brittle materials. Such materials have a brittle behavior under most machining conditions. Under special conditions, however, it is possible to machine these materials in a ductile mode, producing a damageless surface which satisfies the current requirements for optical components.

Using a systematic study of the influence of different machining conditions on the surface quality of optical components, new knowledges about the fundamentals of ultraprecision machining of brittle materials are achieved within this work, specifically in some of the most important infrared crystals. The forces during the ultraprecision machining of the infrared crystals zinc sulphide, Cleartran and germanium are also deeply studied. The measurement of the cutting and thrust forces during the ultraprecision machining of infrared crystals, however, shows very complex problems, because of the low level and high signal dynamic of these forces. In order to solve these problems, a measurement system with sensibility less than 10 mN has been developed, constructed and analysed. With this system a profound analysis about the behavior of the machining forces under different work conditions was also performed.

## 1. Introdução

O torneamento e fresamento com diamante teve, nos últimos anos, um desenvolvimento rápido e uma aplicação cada vez mais intensa nas indústrias eletro-eletrônica, óptica, optoeletrônica, micromecânica e de mecânica de precisão, em função da disponibilidade de melhores componentes para as máquinas de usinagem de ultraprecisão e de um maior domínio deste processo. Do ponto de vista prático, muitos dos atuais problemas industriais podem ser resolvidos através do emprego desta tecnologia, já que com a mesma tem-se a possibilidade de fabricação de elementos de alta precisão e com geometria complexa com uma qualidade reproduzível, com superfícies de acabamento excelente e, ao mesmo tempo, com possível redução nos custos de fabricação [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Entretanto, apesar de em muitos casos ocorrerem reduções significativas no custo de fabricação através do uso desta tecnologia, em comparação com processos convencionais, o temor de custos que decorrem deste processo de fabricação ainda representa um fator de inibição para a sua maior expansão no ambiente industrial [15].

Enquanto atualmente esta tecnologia encontra-se estabilizada para a produção de elementos ópticos em metais não ferrosos, principalmente ligas de cobre e alumínio, aumenta cada vez mais o interesse de aplicação da tecnologia de usinagem com diamante para a produção de elementos ópticos transmissivos em materiais duros e frágeis. Pesquisas intensas nos últimos anos possibilitaram o emprego deste processo de fabricação de precisão para uma série de materiais que há poucos anos ainda tinham como única opção de trabalho a seqüência clássica de fabricação de elementos ópticos transmissivos, qual seja, a retificação, a lapidação e o polimento [9, 16, 17, 18]. Este tipo de seqüência é, até o momento, empregado para a produção da maioria dos elementos ópticos transmissivos. As superfícies geradas caracterizam-se por uma qualidade superficial excelente, enquanto que uma qualidade de forma muito boa somente é atingível para geometrias simples, como esferas, cilindros e planos. A fabricação de elementos anesféricos com qualidade aceitável é, entretanto, extremamente difícil através do processo clássico [9, 19, 20, 21].

A tecnologia de usinagem com diamante monocristalino em máquinas de ultraprecisão comandadas numericamente permite, por sua vez, a produção de superfícies com geometrias complexas, de modo que é possível obter lentes e espelhos anesféricos de altíssima qualidade superficial e de forma diretamente através da usinagem com ferramentas de geometria definida. Sistemas ópticos de alta complexidade e qualidade tornam-se, portanto, possíveis de fabricar, de forma que abre-se assim um novo campo de possibilidades para o projeto de sistemas ópticos. Principalmente no campo da tecnologia LASER existe uma demanda cada vez maior por elementos ópticos transmissivos e reflexivos com geometria complexa e com qualidades superficial e de forma extremas, para aplicações em áreas tão diversas como a médica e o trabalho de metais [9, 20, 22, 23, 24, 25, 26]. Também em sistemas de imagem térmica de alto desempenho o uso de elementos anesféricos é atualmente praticamente inevitável [27].

A tecnologia de usinagem com diamante monocristalino revolucionou a fabricação de elementos ópticos, principalmente para a produção de elementos anesféricos [15, 28]. Este processo de fabricação, caracterizado mais pela qualidade do que pela quantidade dos elementos produzidos, tem garantido um lugar de destaque na tecnologia de fabricação do futuro [29]. O emprego de superfícies anesféricas no projeto de sistemas ópticos permite, além de um incremento na qualidade das características ópticas, uma redução do número de elementos ópticos. Assim são também reduzidos os custos com material, o peso e o volume necessários para a montagem do sistema completo [9, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36]. Para algumas aplicações uma solução somente é viável através do uso de elementos anesféricos [33]. Principalmente para os materiais assim chamados de "infravermelhos", por serem transmissivos em regiões do espectro infravermelho, os custos com material são bastante elevados e não podem ser desprezados. Elementos ópticos usinados otimamente por diamante freqüentemente não necessitam de um polimento de acabamento, de forma que os custos e tempos de fabricação por este processo podem resultar menores que através de processos convencionais [9, 31, 37]. Na **figura 1.1** a seguir é mostrado um exemplo da possibilidade de redução de quantidade de lentes através da adoção de uma lente anesférica, em um sistema óptico para "CD".

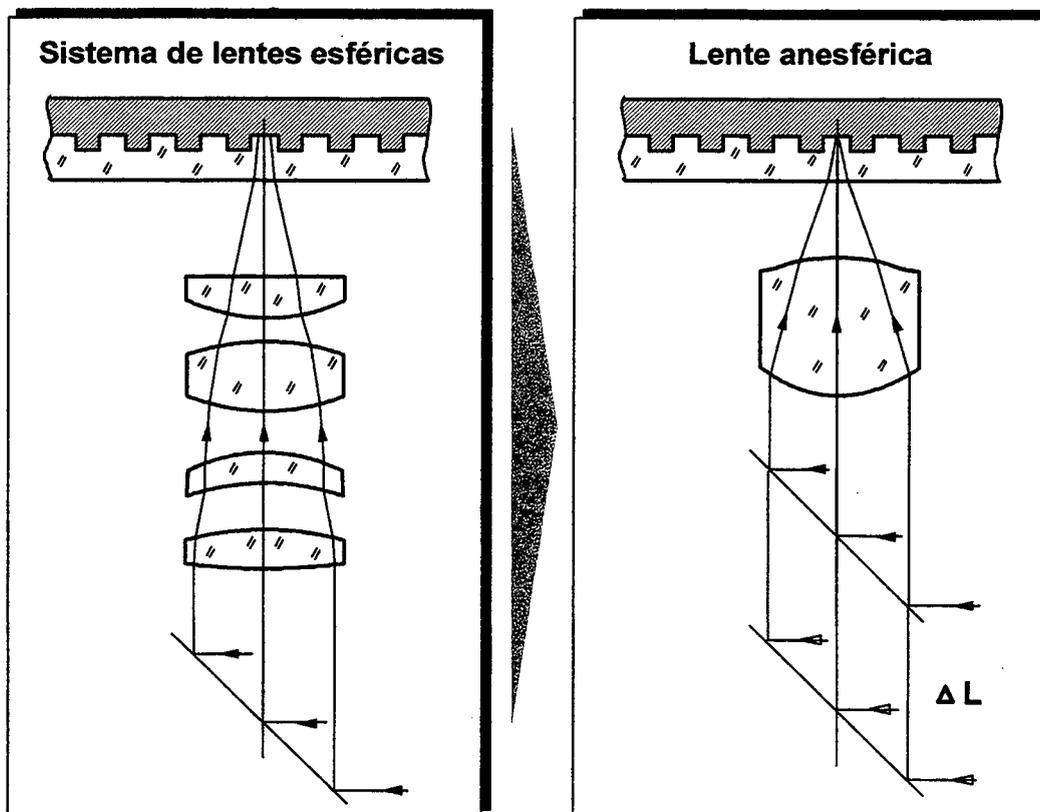


Figura 1.1 - Sistema óptico para "CD" [30]

Os materiais infravermelhos são materiais semicondutores, cristalinos e que têm características frágeis, o que exerce grande influência sobre a usinabilidade e sobre a qualidade possível de obter. Tais materiais têm aplicação cada vez maior em diversas áreas, especialmente para a produção de elementos ópticos de alta precisão transmissíveis no espectro infravermelho, como por exemplo em sistemas LASER, telescópios infravermelhos, câmeras térmicas, aparelhos para visão noturna, sistemas de mira e diversas outras aplicações, de modo que se faz necessário encontrar alternativas para a produção de elementos ópticos nestes materiais com qualidade cada vez maior sem que os custos decorrentes do processo de fabricação sejam demasiados [12, 20, 25, 35, 38, 39, 40, 41].

Os conhecimentos obtidos através de pesquisas no campo da usinagem de ultraprecisão de metais não ferrosos, que têm um comportamento dúctil durante o processo de formação de cavacos, não podem ser integralmente aproveitados para a determinação do

processo de usinagem dos materiais infravermelhos, que pelo seu comportamento frágil apresentam características próprias e uma série de dificuldades de fabricação. A formação de cavacos na usinagem de elementos ópticos transmissivos em cristais infravermelhos e os parâmetros ótimos de usinagem para que se tenha uma fabricação segura e reproduzível até o momento só foi estudada em profundidade, entretanto, para alguns poucos materiais. Ensaio sistemáticos foram realizados principalmente para germânio (Ge) e silício (Si), e para alguns outros materiais de importância também já são encontradas publicações de resultados de pesquisa. Através destes trabalhos já publicados é possível ter informações básicas sobre a usinabilidade destes materiais, todavia indicações mais profundas sobre as condições de usinagem mais apropriadas, de maneira que seja possível conduzir o processo de fabricação de forma ótima, não são encontradas. Um conhecimento profundo destas condições e um domínio do processo de trabalho é, entretanto, o que de mais importante há para a introdução de uma tecnologia de fabricação inovativa como um processo de fabricação amadurecido e economicamente viável [20].

Os trabalhos no campo da usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis, mais especificamente o sulfeto de zinco (ZnS), o Cleartran (ZnS desidratado) e o germânio (Ge), realizados nos últimos anos no IPT-Aachen, têm como objetivos um conhecimento mais profundo dos problemas tecnológicos que surgem durante a usinagem com diamante destes materiais e a conseguinte obtenção de superfícies com rugosidades na ordem de alguns poucos nanômetros e com qualidades de forma com desvios sensivelmente inferiores a um micrometro. Tais resultados somente podem ser alcançados através do estudo da interação entre máquina-ferramenta e o processo de fabricação, além de uma análise criteriosa da influência que cada condição de contorno tem sobre o resultado final de trabalho.

A usinagem de ultraprecisão com ferramentas de diamante apresenta problemas que normalmente não são encontrados na usinagem convencional. O aumento exponencial das forças específicas em regiões onde a espessura de usinagem é muito pequena e a flutuação periódica no nível de forças é um fenômeno conhecido. Estas flutuações podem ser relacionadas mais ao mecanismo de formação de cavacos e às alterações na orientação cristalina dos materiais usinados do que propriamente a problemas decorrentes

da máquina-ferramenta, visto serem estas normalmente mecanicamente muito rígidas e dimensionalmente estáveis [42].

Em virtude da necessidade da produção de elementos ópticos com qualidade cada vez melhor através de processos de fabricação reproduzíveis e economicamente viáveis, é necessário um conhecimento cada vez mais profundo dos processos de fabricação empregados e dos fenômenos que ocorrem durante a geração das peças. No caso da fabricação através de processos de usinagem, é importante o conhecimento não apenas da influência que cada parâmetro de fabricação tem sobre o resultado final de trabalho, mas também como se comportam as forças de usinagem durante a formação de cavacos. Desta forma, é possível entender melhor os mecanismos de remoção que ocorrem e entender com mais profundidade os fenômenos que têm influência sobre a qualidade final de trabalho.

A necessidade de medição de forças na usinagem já é reconhecida há muitos anos. No caso da usinagem convencional o comportamento das forças durante o processo de remoção de cavacos é um assunto extensamente estudado, e mesmo para a usinagem de ultraprecisão de metais não ferrosos já foram realizadas diversas pesquisas sobre o comportamento das forças na usinagem. Entretanto, até o momento são poucos os trabalhos dedicados ao problema de medição dos valores absolutos das forças e à análise de sua variação em função das velocidades de corte, avanços e profundidades de corte comuns em operações de usinagem de ultraprecisão de materiais de comportamento duro e frágil, como os cristais infravermelhos, por exemplo. Isto ocorre principalmente em função das grandes dificuldades metrológicas existentes. O nível de forças na usinagem de ultraprecisão destes materiais encontra-se normalmente em patamares muito baixos, caracteristicamente bem abaixo de 1 N, e a dinâmica dos sinais de força que usualmente ocorrem durante a usinagem com diamante de materiais frágeis é elevada. Nas condições reais de trabalho para que seja possível a usinagem dúctil de materiais frágeis, ou seja, onde os avanços e as profundidades de corte não ultrapassam os valores de alguns poucos micrometros, são freqüentes forças de corte e passivas com valores abaixo de 50 mN [43].

---

Com o intuito de resolver alguns dos diversos problemas relacionados à medição de forças na usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis e, principalmente, para conhecer melhor o comportamento de cristais infravermelhos durante a usinagem com diamante, foi projetado, construído e testado um sistema para medição de forças de usinagem ultrapequenas, para níveis de força até um limite inferior a 10 mN. Com uma análise detalhada destas forças, juntamente com a análise da influência das variáveis de trabalho sobre a qualidade superficial, procura-se com este trabalho contribuir para um maior conhecimento dos fenômenos que ocorrem durante a usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis, de modo a permitir a produção otimizada de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho com o uso desta tecnologia de fabricação.

## 2. Estado da Arte

### 2.1. A Usinagem de Ultraprecisão

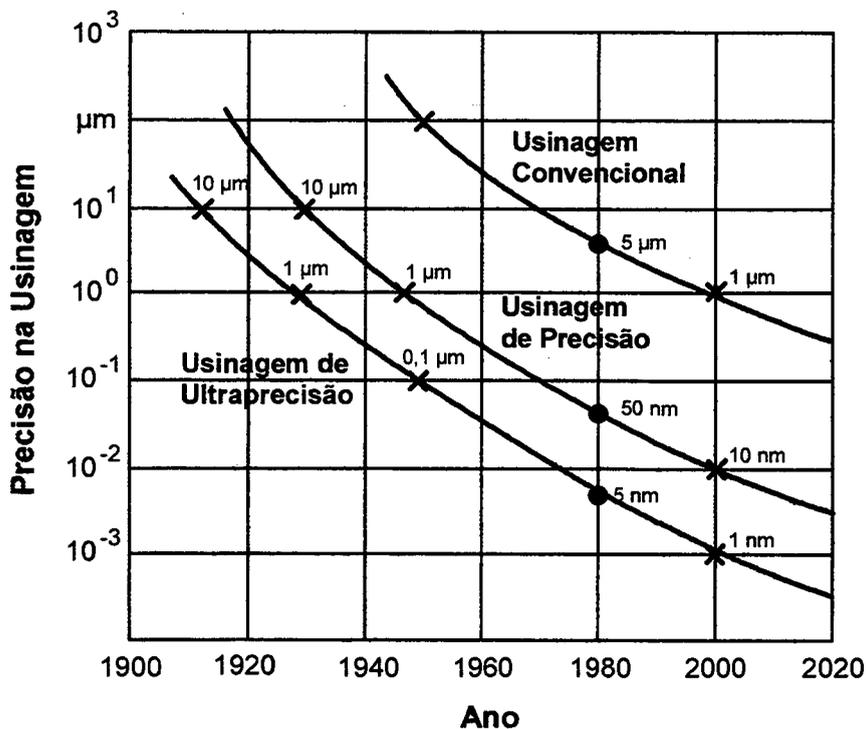
A tecnologia de usinagem de ultraprecisão, também conhecida como usinagem com ferramentas de diamante, microusinagem ou nanousinagem, é uma operação de usinagem para a produção de peças ópticas e mecânicas com precisões no campo sub-micrométrico e, em alguns casos, na faixa de apenas alguns nanômetros [2, 6, 24, 44, 45, 46, 47, 48]. Esta tecnologia, que nos últimos anos tem atraído grande atenção tanto do círculo industrial quanto do círculo científico, emprega uma ferramenta de diamante monocristalino de elevada precisão em máquinas-ferramentas especialmente projetadas para esta função e sob condições controladas de temperatura, umidade e isolamento do meio-ambiente, com o objetivo de obter superfícies de altíssima precisão [44]. Através deste processo é possível usinar uma extensa gama de materiais, como metais, plásticos, materiais semicondutores, vidros, cerâmicas e cristais, com praticamente todas as formas desejadas [46].

Neste tipo de operação de usinagem são características as profundidades de corte e os avanços para o desbaste em valores freqüentemente inferiores a  $10\ \mu\text{m}$ , ou seja, seções de usinagem inferiores a  $100\ \mu\text{m}^2$ , sendo que para o acabamento dificilmente tem-se valores de  $a_p \cdot f$  superiores aos  $20\ \mu\text{m}^2$  [48, 49, 50]. Em função da relação normalmente existente entre o raio de quina da ferramenta ( $r_\epsilon$ ) e o avanço ( $f$ ) na usinagem de ultraprecisão, qual seja  $r_\epsilon \gg f$ , as superfícies são geradas para uma espessura de usinagem efetiva muito pequena, tipicamente abaixo de  $1\ \mu\text{m}$ , o que somente pode ser realizado com ferramentas de gumes extremamente afiados, como as ferramentas de diamante monocristalino [51].

Os progressos na tecnologia de fabricação nos últimos 50 anos atingiram um estágio de desenvolvimento, tanto com relação à qualidade de forma e dimensional quanto à qualidade superficial, que há anos nem eram sonhados. Em 1950, uma precisão de forma na ordem de  $0,5\ \mu\text{m}$  e uma qualidade superficial com valores de  $R_t \approx 0,05\ \mu\text{m}$  na usinagem

eram dificilmente atingidos. Com os melhoramentos constantes, não somente nos elementos de máquinas-ferramentas, características de projeto, controle eletrônico e controle do meio-ambiente, mas também nas técnicas de medição e controle de qualidade, precisões de forma de 30 nm e rugosidades  $R_t$  inferiores a 10 nm são hoje uma realidade na fabricação de elementos ópticos [52, 53, 54, 55].

Apesar de ter tido uma evolução relativamente lenta, visto encontrar-se a usinagem de ultraprecisão nos limites do factível, as precisões possíveis de se obter através desta tecnologia têm melhorado constantemente ao longo dos anos. Em um gráfico bastante difundido na área de fabricação de precisão, Tanigushi [52] previu o comportamento das precisões a serem obtidas ao longo dos anos (figura 2.1). Segundo este autor, pode-se estimar que já nos primeiros anos do século 21 a precisão de fabricação possível através da usinagem de ultraprecisão atingirá a marca de 1 nm [45].



**Figura 2.1** - Tendências no desenvolvimento da precisão através da usinagem de ultraprecisão [45, 52, 56, 57]

A tecnologia de usinagem de ultraprecisão propriamente dita teve seu início no final dos anos 50, quando a primeira máquina de alta precisão para a usinagem com diamante e com a possibilidade de gerar anesferas foi desenvolvida pela firma Bell & Howell para a Força Aérea Americana [58]. Um progresso posterior neste campo foi a usinagem de ultraprecisão com ferramentas de diamante em uma máquina-ferramenta com as características atuais realizada em 1962, em um trabalho conjunto entre a Union Carbide Corporation's Nuclear Division e a firma duPont de Nemours & Company, Incorporated. A máquina-ferramenta desenvolvida para este fim já possuía mancais aerostáticos, e permitia a obtenção de peças com qualidade superficial espelhada e precisão de forma e dimensional submicrométrica [59]. Ao longo dos anos 60 esta tecnologia continuou seu desenvolvimento nas dependências de alguns laboratórios e em algumas poucas empresas que trabalhavam basicamente no campo militar, sendo que nos anos 70 esta tecnologia difundiu-se de uma maneira rápida, principalmente no campo da óptica, sendo utilizada para a fabricação de lentes e espelhos em geral [54, 60, 61]. Na década de 80 a técnica de usinagem de ultraprecisão foi utilizada extensivamente na manufatura em escala industrial de elementos reflexivos para "scanners", cilindros de fotocopiadoras e discos de memória para computadores, elementos estes onde se exigem altas qualidades superficiais e de forma [61].

Os anos 90 são caracterizados por um progressivo domínio da tecnologia de usinagem de elementos ópticos transmissivos em materiais de comportamento frágil, principalmente cristais infravermelhos, a fabricação de elementos ópticos para pequenos comprimentos de onda e a produção de micro-peças [62]. Também no campo do monitoramento do processo de usinagem de ultraprecisão através de diferentes métodos tem sido feito progressos, sendo este um dos aspectos essenciais para o emprego integral desta tecnologia no futuro [63]. Para atingir estes objetivos, entretanto, é necessário um maior conhecimento sobre os fenômenos que ocorrem durante a usinagem de ultraprecisão. Do ponto de vista físico, alguns dos fenômenos que dizem respeito ao mecanismo de corte e desgaste da ferramenta ainda não estão totalmente esclarecidos, como por exemplo como o material é deformado e removido, como interagem ferramenta e peça durante o processo de corte e como são induzidos os danos superficiais e subsuperficiais [7, 51, 64]. Também a qualificação do gume de diamante, o mecanismo de ação do fluido de corte e muitos outros fatores ainda não satisfatoriamente explicados [65]. Somente com estes

conhecimentos é possível melhorar ainda mais os resultados de trabalho e aumentar as potencialidades deste processo [7, 66].

Para a usinagem de ultraprecisão podem ser encontradas diferentes definições, das quais a mais difundida seja provavelmente a de que a usinagem de ultraprecisão é o processo de usinagem com ferramentas de diamante em máquinas-ferramentas de altíssima precisão, de modo que as peças geradas tenham qualidade de forma, dimensional e superficial tal que permitam a classificação das mesmas como "ópticas", sendo que processos posteriores de lapidação e polimento não são mais necessários [1, 55, 67, 68, 69, 70, 71]. A classificação de uma superfície como "óptica" significa que da mesma não são aceitos erros de forma ou rugosidades acima de um determinado limite máximo, cujo valor é dependente do comprimento de onda para o qual a superfície foi projetada. Para a qualidade de forma é normalmente aceito que os erros deste tipo não devem ultrapassar o valor de  $\lambda/10$ , enquanto a rugosidade P-V deve manter-se em torno de valores de  $\lambda/100$  -  $\lambda/50$  [71, 72].

Definições mais genéricas para a usinagem de ultraprecisão foram dadas por Langenbeck [73], segundo o qual a usinagem de ultraprecisão significa trabalhar com máquinas no âmbito micrométrico e nos limites tecnológicos da mecânica, ou por Tanigushi [52], que define a usinagem de ultraprecisão como o processo de usinagem com o qual são ou foram atingidas as maiores precisões dimensionais em um determinado período de tempo. Alguns pesquisadores da área de usinagem com ferramentas de diamante monocristalino definem também limites com relação à qualidade de forma e/ou superficial para caracterizar uma operação de usinagem como de ultraprecisão ou não. Segundo Brinksmeier [6] e Bachmann [74], a usinagem de ultraprecisão é caracterizada por peças com qualidade de forma melhor que  $1 \mu\text{m}$  e rugosidade  $R_a$  inferior a  $10 \text{ nm}$  ou, de acordo com König et al [2], é a operação com ferramenta de geometria definida onde os desvios de forma são inferiores a  $0,2 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$  e a rugosidade  $R_a$  menor que  $0,02 \mu\text{m}$ . Este tipo de definição não é, entretanto, muito difundido, visto que a qualidade da peça produzida depende, entre outros fatores, da máquina-ferramenta, da qualidade do gume da ferramenta, do material da peça, do meio-ambiente e do operador, sendo portanto o limite da qualidade atingível diferente para os diversos casos de microusinagem [75, 76].

A caracterização do limite de qualidade atingível através do processo de usinagem com diamante não é de maneira alguma uma unanimidade. De uma forma geral aceita-se que, desde que observadas algumas premissas básicas, é possível alcançar precisões de forma na ordem de 100 nm/100 mm [11, 20, 34, 61, 77, 78, 79], rugosidades  $R_a$  em torno de 1 nm [47, 49, 52, 56], rugosidades  $R_z$  ou  $R_t$  de 10 nm [20, 77, 78, 80] e circularidades inferiores a 200 nm [78]. Em casos específicos, são relatados valores de rugosidade  $R_a$  inferiores a 1 nm [50], precisões de forma de até 10 nm [49] e circularidades abaixo dos 30 nm [79], o que entretanto só é possível de ser atingido sob condições excepcionais.

Os desenvolvimentos no campo da tecnologia de usinagem de ultraprecisão trouxeram, ao lado de outros processos de fabricação, um importante impulso no sentido de viabilizar a produção de elementos ópticos anesféricos tanto reflexivos quanto transmissivos. Assim, tornou-se mais atraente a substituição de sistemas ópticos compostos por uma grande quantidade de elementos esféricos por outros constituídos de elementos anesféricos, com uma redução substancial na quantidade de elementos do sistema e, conseqüentemente, no seu peso. Além disto, em muitos casos ocorre devido a isto uma redução no custo final do sistema, bem como uma melhoria de suas características ópticas [69, 81].

As superfícies anesféricas, ou simplesmente anesferas, são superfícies que não são nem esféricas, nem planas. Esferas têm somente um parâmetro de forma, o seu raio de curvatura  $R$ , sendo que superfícies planas podem ser consideradas um caso especial de esfera com  $R \rightarrow \infty$ . Anesferas, por seu lado, em princípio podem ter um número infinito de parâmetros de forma, embora na prática estes se limitem a um número não muito grande. Matematicamente uma anesfera é gerada, por exemplo, pela rotação de uma curva plana em torno de um eixo. Assim, pode-se considerar que as esferas são, por sua vez, um caso especial de anesferas, onde a curva que gira em torno de seu eixo é um segmento de círculo [31].

Apesar de casos de emprego de anesferas há mais de dois séculos, apenas nas últimas décadas as novas técnicas de fabricação e análise deste tipo de elementos permitiram um aumento gradual e efetivo na utilização de elementos ópticos de alta qualidade de forma, dimensional e superficial com este tipo de geometria [31]. Devido às vantagens que as anesferas apresentam com relação às suas características ópticas, foram estudadas com

interesse já no século 17, por cientistas como Kepler (1611), Descartes (1638) e Huygens (1678). Descartes inclusive projetou uma máquina para retificar lentes anesféricas, sendo que as primeiras máquinas para produzir elementos ópticos anesféricos conhecidas são um tomo vertical para produção de elementos ópticos hiperbólicos metálicos, construído por Maignan (1648), e uma máquina para a fabricação de objetivas e espelhos parabólicos para telescópios, construída por Schort ( $\approx 1750$ ) [1, 31].

Uma superfície anesférica pode ser definida de diferentes maneiras, das quais a mais simples é a que exprime as distâncias da curva com relação a um plano. Entretanto, para a maioria dos propósitos, é mais adequado exprimir uma anesfera a partir da distância que a curva apresenta com relação a uma esfera, de acordo com a equação:

$$y = \frac{C \cdot x^2}{1 + \sqrt{1 - (K + 1)C^2x^2}} + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots \quad (2.1)$$

onde  $C = 1/R$  e  $K = -e^2$ .

No caso de todos os coeficientes anesféricos  $a_i$  serem iguais a zero, a curva gerada é cônica, sendo que a mesma depende então do valor de  $K$ . Para  $K < -1$  a curva é um hiperbolóide, para  $K = -1$  um parabolóide, para  $0 > K > -1$  um elipsóide rotacionado sobre o eixo maior, para  $K > 0$  um elipsóide rotacionado sobre o eixo menor e para  $K = 0$  uma esfera, por exemplo [19, 31].

O campo de aplicação da usinagem com diamante monocristalino pode ser dividido em três segmentos: a fabricação de elementos ópticos reflexivos, de elementos ópticos transmissivos e de componentes mecânicos. Destas três áreas de trabalho, a menos desenvolvida e explorada ainda é a de elementos ópticos transmissivos, com tendências a forte crescimento, entretanto [34, 58, 68, 82]. Como técnica para fabricação de elementos ópticos reflexivos, como espelhos de alto desempenho para sistemas LASER, e componentes mecânicos de alta precisão, como elementos para mancais aerostáticos já é, todavia, um processo bastante difundido [62, 83, 84]. Outros campos de aplicação desta tecnologia bastante conhecidos são os cilindros para fotocopiadoras, discos magnéticos

para computadores, espelhos poligonais para impressoras, espelhos para raios-X, cabeçotes magnéticos para vídeos, giroscópios, matrizes para injeção de lentes, lentes de contato e lentes para o espectro infravermelho [57, 72, 83, 84, 85, 86]. Na **figura 2.2** podem ser vistos alguns exemplos de aplicações para a usinagem de ultraprecisão, com materiais e especificações exigidas das peças.

	<b>CAMPO DE APLICAÇÃO</b>	<b>MATERIAIS</b>	<b>ESPECIFICAÇÕES</b>
<b>ELEMENTOS REFLEXIVOS</b>	Espelhos poligonais para impressoras LASER Espelhos metálicos em geral Cilindros para fotocopiadoras Equipamento para aerofotogrametria Espelhos planos para LASER Integradores de energia Sistemas de mira	Alumínio e ligas Cobre e ligas Ouro Níquel eletrolítico Zinco Platina Prata	Refletividade > 98 %  Precisão de forma 0,2 ... 0,01 $\mu\text{m}$  Rugosidade Ra ~ 0,05 $\mu\text{m}$
<b>ELEMENTOS TRANSMISSIVOS</b>	Elementos ópticos para aplicações infravermelhas Lentes Fresnel Lentes para células solares Lentes para focagem LASER Elementos ópticos para CD's Lentes de contato Lentes intraoculares Lentes em geral	Plásticos ópticos Germânio Silício Sulfeto de Zinco Seleneto de Zinco Iodeto de Césio Arsenato de Gálio	Transmissividade 0,02 ... 49,3 $\mu\text{m}$  Precisão de forma 1 ... 0,01 $\mu\text{m}$  Rugosidade Ra < 0,01 $\mu\text{m}$
<b>ELEMENTOS MECÂNICOS</b>	Discos rígidos para computadores Cabeçotes de vídeo Mancais aerostáticos Microestruturas Moldes para injeção de lentes Componentes para giroscópios Conexões para fibras ópticas Eletrodos para aceleradores	Alumínio e ligas Cobre e ligas Níquel eletrolítico Grafite Plásticos Ouro	Precisão de forma 0,5 ... 0,1 $\mu\text{m}$  Rugosidade Ra ~ 0,01 $\mu\text{m}$

**Figura 2.2** - Campos de aplicação, materiais e especificações para a usinagem de ultraprecisão [2, 6, 24, 26, 34, 48, 49, 55, 61, 87, 88, 89]

Para a escolha dos materiais usinados por ultraprecisão deve-se levar em consideração a compatibilidade química entre o material usinado e o diamante. Materiais que reagem com o carbono do diamante a altas temperaturas e formam carbonetos, como o tungstênio, tântalo, titânio e zircônio, por exemplo, não são adequados para a usinagem de ultraprecisão. Também o ferro e suas ligas, entre outros, não são normalmente usinados por diamante. Estes materiais devem ser evitados porque na usinagem dos mesmos o gume das ferramentas de diamante tende à grafitização, de modo que o fim de vida da ferramenta é rapidamente alcançado. Com o emprego de algumas medidas especiais, como a usinagem sob atmosfera protetora, usinagem criogênica ou com a aplicação de ultra-som, já é possível diminuir a velocidade de desgaste da ferramenta na usinagem de ultraprecisão de materiais ferrosos ou vidros e cerâmicas, por exemplo [2, 61, 69, 86, 90, 91]. Estas medidas, entretanto, ainda não trazem os resultados esperados.

Os materiais que atualmente são usinados com ferramentas de diamante monocristalino são predominantemente metais não ferrosos (cobre, alumínio, níquel eletrolítico, ouro e prata, entre outros), os polímeros (plásticos em geral, como acrílico) e, mais recentemente, os assim chamados cristais infravermelhos. A microusinagem destes cristais é, na realidade, mais complexa que a de metais e plásticos, em virtude do seu comportamento frágil, entretanto tem-se mostrado promissora para a fabricação de elementos ópticos de alta qualidade de forma e superficial necessários para aplicações no espectro infravermelho [2, 28, 92, 93]. Nem todos estes materiais podem, entretanto, ser igualmente bem usinados através desta tecnologia. Bons resultados dependem principalmente da otimização das condições de corte e das características individuais de cada material, entre outros fatores [69].

Além da compatibilidade química entre o material usinado e o diamante, devem ser levados em conta uma série de outros fatores na escolha de um determinado material a ser usinado por ultraprecisão. As propriedades mecânicas, a formação de cavacos, as características ópticas, a qualidade superficial e de forma obtível, as forças de usinagem, a influência sobre o desgaste da ferramenta e a toxicidade são algumas das características de importância que devem ser observadas [62]. Os materiais usinados por diamante devem ter alta pureza e em especial não devem ter inclusões duras. Estas inclusões podem causar, além de um maior desgaste da ferramenta, uma superfície de

baixa qualidade, visto que as inclusões podem ser arrastadas pela ferramenta durante a usinagem e causar arranhões na superfície [2, 49]. Além disto, materiais para a usinagem de ultraprecisão devem ser homogêneos, de modo a permitir a obtenção de uma qualidade ótima [94]. A escolha de um material apropriado para a operação de usinagem de ultraprecisão baseia-se em uma série de critérios, que na área de óptica normalmente são:

- Propriedades mecânicas do material;
- Propriedades ópticas;
- Propriedades térmicas;
- Ambiente de trabalho;
- Viabilidade e custos [62, 69].

A otimização de todos estes critérios é muito difícil, de modo que normalmente são observados apenas um ou dois destes critérios com mais rigor. Elementos ópticos transmissivos são geralmente escolhidos por suas propriedades ópticas, enquanto que elementos reflexivos são principalmente escolhidos por suas propriedades térmicas e mecânicas [69]. Na **figura 2.3** a seguir são listados alguns dos materiais mais importantes para a fabricação de peças por ultraprecisão empregados atualmente.

MATERIAIS ADEQUADOS À USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO		
METAIS	CRISTAIS IR	PLÁSTICOS
Cobre Alumínio Latão Estanho Bronze Níquel Eletrolítico Platina Prata Ouro Zinco Chumbo	Germânio Silício Arsenito de Gálio Selenito de Zinco Sulfeto de Zinco Fluoreto de Magnésio Telureto de Cádmio Fluoreto de Cálcio Iodeto de Césio Brometo de Potássio Cloreto de Sódio Cloreto de Potássio Fluoreto de Estrôncio Dióxido de Telúrio Sulfeto de Cádmio Niobato de Lítio Fosfato de Potássio	Acrílico Acetato Nylon Policarbonato Polipropileno Poliestireno Polissulfonados Fluoroplásticos Silicone

**Figura 2.3 - Materiais empregados na usinagem com diamante**

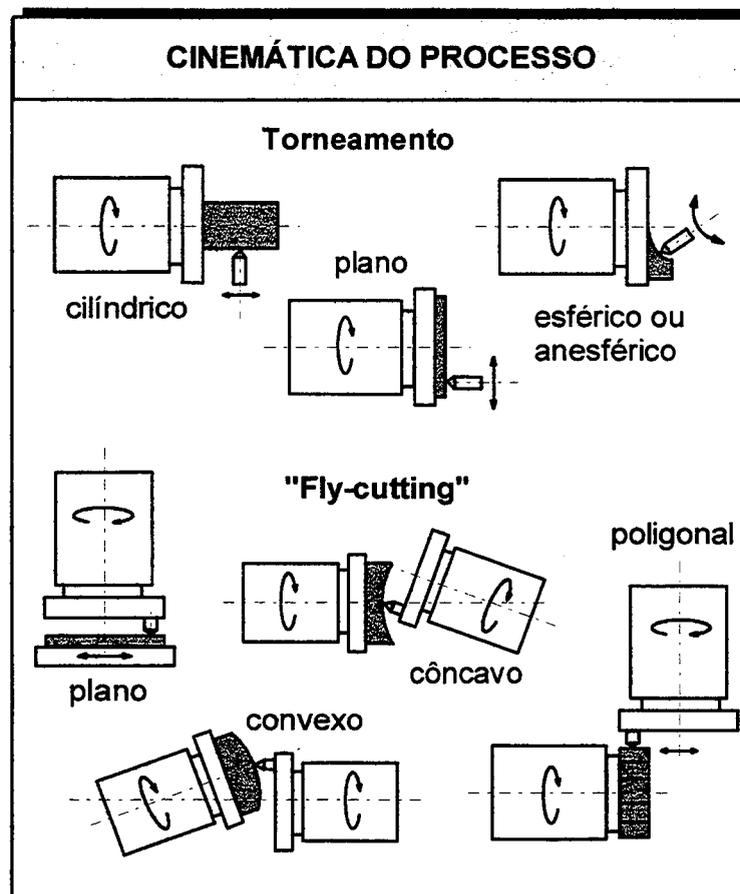
[2, 36, 48, 55, 61, 62, 69, 92, 95]

O crescente aumento nas exigências que se faz com relação à precisão de forma e qualidade superficial de elementos ópticos e mecânicos de precisão exige um constante aperfeiçoamento na qualidade das máquinas-ferramentas para a usinagem de ultraprecisão [34]. A máquina-ferramenta para este tipo de processo de fabricação é um dos elementos-chaves desta tecnologia, e atingiu um grau de desenvolvimento muito elevado através da aplicação de grandes esforços científicos e tecnológicos. Enquanto que a precisão de posicionamento das primeiras máquinas-ferramentas de ultraprecisão encontrava-se na ordem de 0,5  $\mu\text{m}$  [34], atualmente esta encontra-se na ordem de 10 nm para máquinas comercialmente disponíveis, sendo que em máquinas utilizadas em pesquisa e sob condições extremamente bem controladas já é possível trabalhar com precisões na ordem de 1 nm [44]. As máquinas-ferramentas para a usinagem de ultraprecisão normalmente possuem árvores com um batimento axial e radial inferior a 0,1

$\mu\text{m}$  e guias com erros de linearidade na ordem de  $0,1 \mu\text{m}/250 \text{ mm}$ , rigidez das guias na ordem de  $800 \text{ N}/\mu\text{m}$  e rigidez da árvore em torno de  $200 \text{ N}/\mu\text{m}$ . A amplitude de vibrações da árvore destas máquinas usualmente não ultrapassa os  $0,02 \mu\text{m}$ , sendo a resolução de movimentação na ordem de  $0,01 \mu\text{m}$  [94].

As características de uma máquina-ferramenta de ultraprecisão têm uma grande influência sobre a qualidade final da peça produzida, podendo ser a máquina-ferramenta considerada como o elemento mais crítico para o sucesso da usinagem com ferramentas de diamante [40]. Movimentações relativas entre a peça e a ferramenta, causadas por erros da árvore ou das guias, pelas variações do avanço, comportamento térmico da máquina, deformações da estrutura da máquina devido ao peso próprio ou das forças de usinagem, comportamento dinâmico relacionado a vibrações e outros fatores, por exemplo, podem ter um grande impacto sobre a rugosidade, qualidade de forma ou dimensional da peça produzida [2, 80, 96]. Devido a isto, de uma máquina-ferramenta para a usinagem de ultraprecisão são exigidas características extremas, como elevado isolamento de vibrações, estabilidade térmica, rigidez, precisão de forma e de posicionamento, alta linearidade das guias, baixo batimento da árvore, repetibilidade e resolução [40, 47, 49, 76, 80, 87, 97, 98, 99, 100].

Dependentemente da função e forma do elemento fabricado através da usinagem com diamante, ou seja, se o elemento é plano, cilíndrico, esférico ou anesférico, côncavo ou convexo, a máquina-ferramenta de ultraprecisão pode assumir diferentes formas. Na **figura 2.4** são ilustradas algumas das diversas cinemáticas de processo empregadas em máquinas deste tipo.



**Figura 2.4** - Cinemática do processo aplicado à usinagem de ultraprecisão [2, 5]

Vários tipos de máquinas-ferramentas de ultraprecisão foram desenvolvidos nos últimos anos e uma boa parte delas encontrou seu uso prático na indústria, graças aos desenvolvimentos técnicos feitos nos seus elementos construtivos, como os mancais aerostáticos e hidrostáticos, os mecanismos de avanço linear de alta precisão, os controles de posição através de sistemas de LASER interferométrico e comandos numéricos de última geração, entre outros [8, 80]. Dentre as diversas concepções de máquinas-ferramentas de ultraprecisão existentes, podem-se citar as seguintes mais difundidas [55, 61]:

- Máquinas de faceamento horizontal - são assim chamadas por terem a árvore montada horizontalmente. Podem ser utilizadas como máquinas de faceamento, quando a peça é montada na árvore e a ferramenta se desloca sobre a guia, ou como máquinas para "fly-cutting", quando a ferramenta é montada na árvore e a peça

desloca-se sobre a guia. Com este tipo de máquina podem-se produzir apenas superfícies planas, sendo que para o deslocamento não é necessário um controle absoluto de posição.

- ❑ Máquinas de "fly-cutting" - são máquinas bastante similares à máquina de faceamento horizontal, com a diferença que a ferramenta está sempre montada na árvore e esta encontra-se na posição horizontal.
- ❑ Máquinas com guias em "T" - recebem esta denominação em virtude da forma de sua base. A sua concepção é semelhante à da máquina de faceamento horizontal, tendo entretanto adicionalmente uma guia sob a árvore, que se move em um eixo paralelo ao do eixo de rotação. Neste caso tanto a árvore quanto a ferramenta movimentam-se perpendicularmente uma à outra. Assim, é possível a manufatura de formas planas, esféricas e anesféricas, desde que sejam superfícies de revolução.
- ❑ Máquinas de contorno com guias cruzadas - estas máquinas têm as características básicas da máquina com guias em "T", sendo que a diferença entre os dois tipos de máquina está no fato que na máquina de contorno com guias cruzadas a árvore é fixa, e o eixo de deslocamento está em um par de guias cruzadas.
- ❑ Máquinas geradoras de arcos - são máquinas onde a posição da ferramenta permanece sempre normal à superfície da peça, sendo assim desnecessária a correção dos erros geométricos da ferramenta. A peça encontra-se sobre uma mesa giratória, e a mesa e o eixo da ferramenta realizam movimentos perpendiculares entre si, sendo que a ferramenta possui ainda um movimento rotacional.
- ❑ Máquinas de contorno  $R - \theta$  - estas máquinas são assim chamadas devido ao tipo de deslocamento dos eixos, nas direções  $R$  e  $\theta$  de um sistema de coordenadas polares. Assim, é possível a geração de superfícies esféricas e anesféricas, mantendo-se a ferramenta sempre em uma posição definida com relação à superfície usinada, de forma que possíveis erros na geometria da mesma não tenham influência sobre o resultado final de trabalho.

Os elementos de uma máquina-ferramenta para a usinagem de ultraprecisão são, em princípio, os mesmos que de uma máquina-ferramenta convencional. Dentre os mais importantes, podem-se citar [55, 61]:

- ❑ Cabeçote - o cabeçote, também chamado de árvore, deve promover um movimento de rotação suave e preciso, com rigidez e capacidade de carga adequados. Dentre as diferentes soluções possíveis, incluem-se os mancais aerostáticos ou hidrostáticos, os mancais hidrodinâmicos, magnéticos e de elementos rolantes. Os mais empregados são os mancais aerostáticos, por oferecerem um baixo coeficiente de atrito, boa rigidez, baixa geração de calor, amortecimento adequado, suavidade de movimentação e precisão de movimentação.
- ❑ Acionamento do cabeçote - o acionamento do cabeçote gera a força de rotação para acionar a peça, sua fixação e o mancal, o que em máquinas de ultraprecisão deve ser isento de vibrações. O torque de acionamento necessário é usualmente pequeno, já que as forças envolvidas são também pequenas.
- ❑ Acoplamentos - para transmitir o torque do acionamento ao cabeçote são empregados os acoplamentos, que são peças destinadas a unir eixos, compensando erros de alinhamento e afastamento radial, sendo exigidos dos mesmos isenção de folgas, resistência à torção e inércia reduzida. Os tipos de acoplamentos mais utilizados em máquinas de ultraprecisão são os de fole ou sanfona, "oldram" ou pino-ranhura e por correia.
- ❑ Guias - são os elementos que permitem o posicionamento da ferramenta e da peça para o trabalho, e devem ter excelentes características de suavidade, retilidade, rigidez, precisão e repetibilidade de movimento. Tais exigências são usualmente satisfeitas com o emprego de guias aerostáticas ou hidrostáticas.
- ❑ Acionamento das guias - o acionamento das guias deve promover um acionamento suave, com velocidade constante, com a força de acionamento sendo aplicada no centro de massa do elemento que se desloca, para evitar possíveis erros de

tombamento, guinamento ou rolamento. Normalmente o acionamento das guias é feito através de roda de atrito, motores elétricos rotativos e lineares, sistemas hidráulicos ou pneumáticos e sistemas de gravidade controlada, entre outros.

- ❑ Base da máquina - serve como sistema de montagem para os diversos elementos da máquina-ferramenta, além de proporcionar uma base estável, de modo que seja evitada ao máximo a propagação de vibrações geradas por componentes móveis da máquina para outras partes do sistema. A base da máquina de ultraprecisão deve ter também boa capacidade de amortecimento, estabilidade térmica, resistência química e resistência mecânica. São normalmente fabricadas em ferro-fundido, concreto polimérico, granito, "zerodur", ínvar e cerâmicas em geral, entre outros materiais.
- ❑ Sistema de suporte da máquina - é o sistema que, acoplado à base da máquina, tem a função de promover o suporte da máquina e isolá-la de vibrações externas. Tais sistemas podem ser passivos, como os baseados em amortecedores pneumáticos, ou ativos, como os de colchões de ar com pressão variável.
- ❑ Sistema de fixação da ferramenta - os sistemas de fixação da ferramenta para operações de usinagem com diamante são semelhantes aos empregados na usinagem convencional, com a diferença de permitirem ajustes de posição da ferramenta com muito mais precisão.
- ❑ Estação de "presetting" - é um sistema utilizado para informar a posição da ferramenta ao controle de posição da mesma. Serve normalmente para os ajustes grosseiros de posição da ferramenta, visto que ajustes finos são usualmente realizados iterativamente através da observação dos resultados de trabalho.
- ❑ Sistema de controle - é o centro de comando para o controle da posição, velocidade de avanço, rotação e direções de movimento dos elementos da máquina, sendo normalmente composto de um sistema de medição interferométrico, sensores e um comando numérico de alta resolução.

- Sistema de controle ambiental - a existência de um sistema de controle ambiental é usual em ambientes onde são realizadas operações de usinagem com diamante, de modo a garantir a estabilidade ambiental necessária para assegurar a precisão dimensional e de forma no processo de fabricação.

A usinagem dúctil de materiais frágeis como silício, germânio, vidros e cerâmicas de modo geral somente é bem sucedida quando as profundidades de corte e os avanços são muito pequenos, ou seja, em um nível que já pode ser considerado como crítico. Estas condições são difíceis de serem mantidas mesmo com as máquinas de usinagem de ultraprecisão normalmente utilizadas para a usinagem com diamante de materiais metálicos. Por isto, a usinagem dúctil de materiais frágeis tem sido preferencialmente realizada em máquinas especialmente desenvolvidas para esta tarefa, com exigências ainda maiores com relação à rigidez e precisão [101]. Segundo Blake e Scattergood [102], a usinagem de materiais de comportamento duro e frágil somente pode ser bem sucedida se a máquina-ferramenta satisfizer as elevadas exigências quanto à rigidez, controle do avanço, resolução, erros de batimento da árvore e nível de vibrações, além de necessitar um ambiente de trabalho com temperatura controlada.

Um dos aspectos de maior importância e, freqüentemente, de maior dificuldade na usinagem de ultraprecisão é a fixação das peças na máquina-ferramenta para a execução da operação de usinagem, já que a mesma é fonte primária de erros. Para a obtenção de peças com qualidade de forma e superficial ótima, o sistema de fixação deve suportar a peça sem introduzir tensões ou, caso isto seja inevitável, introduzindo um mínimo de tensões. Além disto, este deve ser fácil de manusear, montar e desmontar, ser ajustável para as diferentes situações e deve permitir um balanceamento rápido, entre outras características [2, 61, 92, 103, 104].

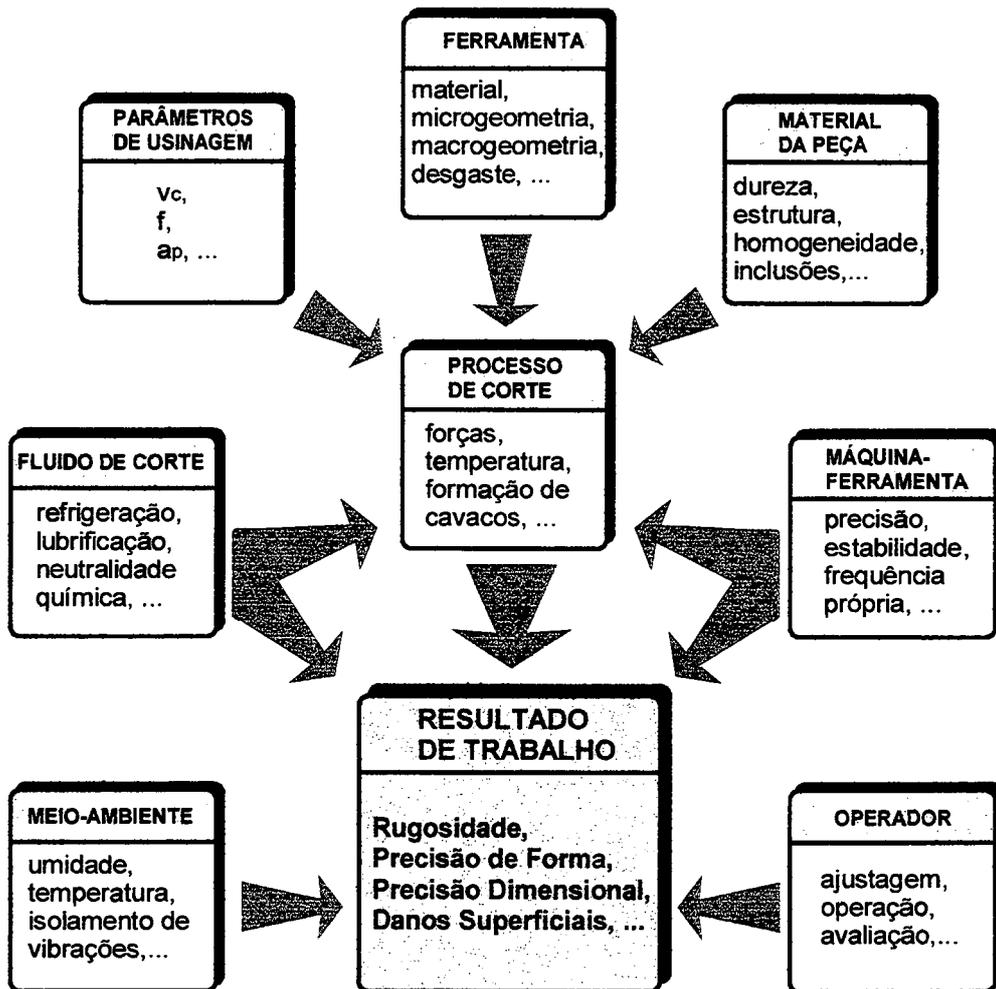
A fixação de uma peça durante a usinagem de ultraprecisão tem duas importantes tarefas a cumprir. A superfície de fixação tem usualmente a função de superfície de referência, além de garantir o posicionamento da peça mesmo sob a ação de forças centrífugas, de gravidade e de processo. Nestas duas funções, a fixação pode exercer uma grande influência sobre o resultado final de trabalho [87].

Para garantir os melhores resultados na usinagem de ultraprecisão, é importante a análise de diversos tópicos com relação ao sistema de fixação a ser utilizado. Dentre estes, os mais importantes são um bom projeto da peça a ser usinada, uma seleção adequada do sistema de fixação que se apresenta como mais adequado, análise dos fatores que podem implicar em distorções da peça fabricada (técnicas de montagem da peça no sistema de fixação e forças atuantes, por exemplo) e análise dos problemas relacionados a balanceamento dinâmico e vibrações, entre outros [103].

Dentre os diferentes tipos de fixação empregados na usinagem de ultraprecisão podem ser citados como os mais comuns a fixação por vácuo, por adesivos ou por "potting". Este último processo implica em montar mecanicamente a peça em uma placa, deixando espaço entre os dois elementos, sendo este espaço posteriormente preenchido por um material injetado, como borrachas ou plásticos, por exemplo. A fixação através de parafusos não é muito difundida, em função do nível de tensões que normalmente é introduzido na peça durante o processo de fabricação, de modo que após a soltura da peça da fixação a qualidade de forma pode ser insuficiente [2, 63].

Ao contrário da usinagem convencional, a usinagem de ultraprecisão de contornos complexos exige uma série de medidas com relação ao meio-ambiente onde a operação será realizada. Normalmente a usinagem de ultraprecisão deve ocorrer em ambiente com temperatura controlada, de forma a impedir os efeitos negativos da variação da temperatura sobre a qualidade final da peça [104]. A usinagem com diamante é susceptível também a uma variedade de influências externas que, se não controladas, reduzem o nível de qualidade do resultado final. Estas influências externas incluem variações na temperatura, vibrações, umidade e pressão ambiente, limpeza do ambiente de trabalho e suprimento de ar comprimido e de vácuo, entre outras [99]. Além disto, uma série de outros fatores podem influenciar o resultado de trabalho e impedir que as exigências de qualidade sejam atingidas em peças produzidas através da usinagem com diamante. Dentre estes podem-se citar os defeitos na estrutura do material da peça, desgaste da ferramenta, condições de corte não uniformes, tensões internas do material da peça, erros na geometria e dimensões da ferramenta e do percurso usinado, dinâmica da máquina-ferramenta, erros de movimentação das guias e da árvore da máquina-ferramenta, fixação da peça na máquina-ferramenta e rigidez da ferramenta, máquina-

ferramenta e da peça [83, 94, 105, 106]. Na **figura 2.5** a seguir são mostrados esquematicamente os diferentes fatores de influência sobre a qualidade final da peça produzida através da usinagem de ultraprecisão.



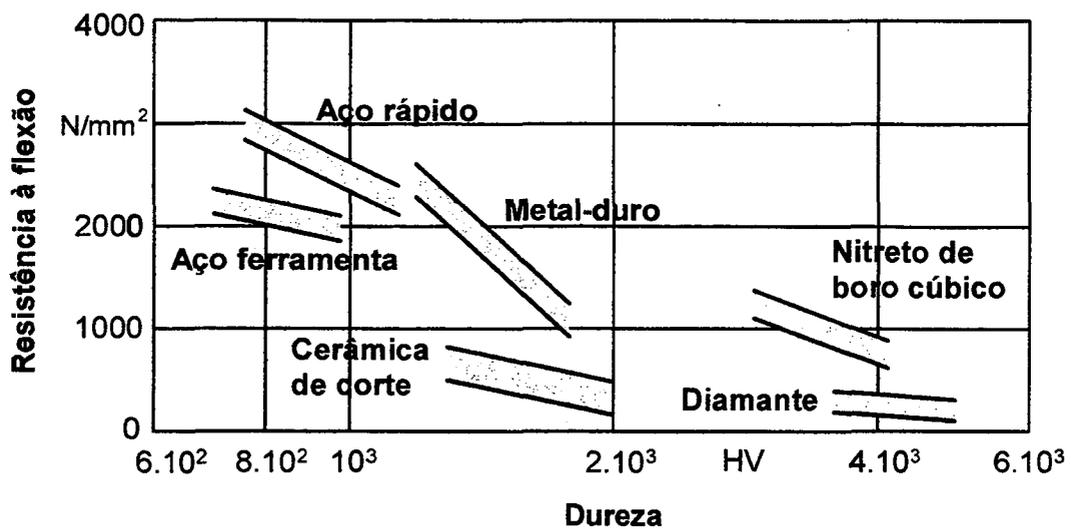
**Figura 2.5** - Fatores de influência sobre a precisão da peça na usinagem de ultraprecisão [2, 5, 36, 47, 49, 57, 87, 95, 107, 108]

## 2.2. O Diamante Monocristalino como Ferramenta de Corte

O diamante monocristalino tem mostrado uma crescente importância como material de ferramenta na indústria de fabricação nos últimos cinquenta anos. Graças à sua elevada dureza e resistência ao desgaste, grande módulo de elasticidade, baixo coeficiente de

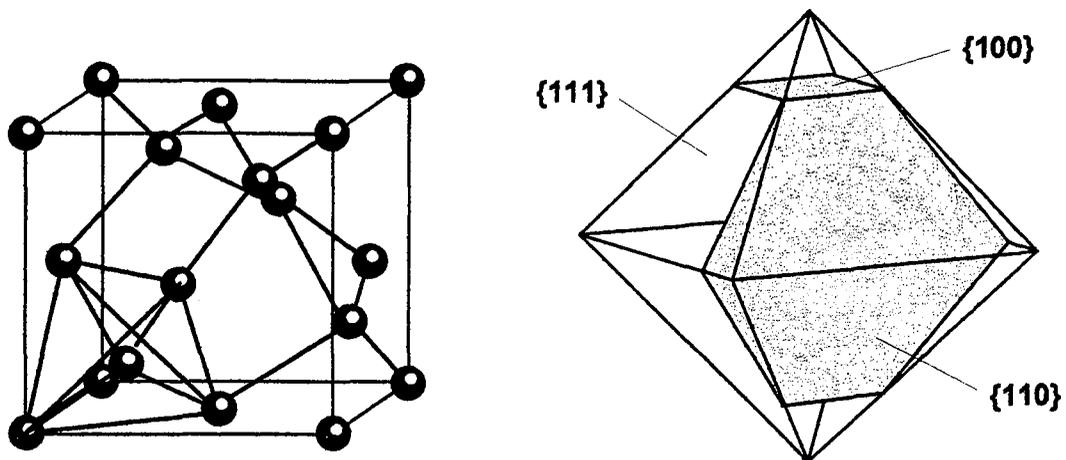
dilatação térmica e baixo coeficiente de atrito, este tipo de ferramenta mostrou-se adequado à produção de grandes séries com qualidade superficial e de forma excelentes. Um dos seus campos de aplicação mais conhecidos é o da fabricação de peças ultraprecisas para a indústria óptica, eletrônica e mecânica. Nesta área, onde existem grandes exigências quanto à macrogeometria e microgeometria do gume aliadas a uma longa vida da ferramenta, apenas o diamante monocristalino é cogitado como material de corte [2, 50, 109, 110, 111, 112, 113, 114]. Embora os diamantes possam ser tanto naturais quanto sintéticos, e a qualidade dos diamantes sintéticos possa atualmente ser considerada excelente, até o momento praticamente somente os diamantes monocristalinos naturais têm demonstrado uma importância econômica na usinagem de ultraprecisão com ferramentas de geometria definida [110, 115, 116].

O diamante é um material dos superlativos com relação às suas características mecânicas, térmicas e ópticas. De todos os materiais conhecidos, ele tem a maior dureza e resistência ao desgaste, o maior módulo de elasticidade e a melhor capacidade de transmissão de calor. Além disto, possui uma estrutura monocristalina, baixo coeficiente de dilatação térmica, baixo coeficiente de atrito e é quimicamente inerte a baixas temperaturas. Em função da estrutura monocristalina, assim como da grande densidade atômica e resistência ao desgaste, é possível fabricar ferramentas de diamante cujos gumes têm um grau de afiação não obtível em nenhum outro material conhecido. O baixo coeficiente de atrito aliado a uma excelente capacidade de transmissão de calor fazem com que os danos causados por excesso de calor na região de corte sejam em grande parte evitados, enquanto que o baixo coeficiente de dilatação térmica diminui os erros de forma causados por variação dimensional da ferramenta para as variações na temperatura. A boa estabilidade química, por sua vez, faz com que não haja uma tendência de formação de gume postiço durante a operação de usinagem. Todas estas propriedades e mais uma série de outras predestinam o diamante como material de corte para a usinagem de ultraprecisão com ferramentas de geometria definida, de maneira que apesar de sua grande fragilidade o diamante ainda é o único material utilizado com sucesso para a produção de ferramentas para a usinagem de ultraprecisão [77, 85, 92, 117, 118, 119, 120]. Na **figura 2.6** é feita uma comparação entre a dureza e resistência à flexão dos principais materiais de corte atualmente empregados.



**Figura 2.6** - Comparação entre a dureza e resistência à flexão dos diferentes materiais de corte atualmente empregados [49, 110, 116, 118, 121]

A estrutura dos diamantes consiste de átomos de carbono cristalizados em forma cúbica de face centrada e unidos através de ligações covalentes. Isto significa que entre os átomos existe uma energia de ligação muito grande. Esta estrutura é a responsável pela grande dureza, elevado ponto de fusão e grande resistência química apresentados por estes materiais. Em função da sua ordenação atômica, os diamantes apresentam uma anisotropia nas suas propriedades, que se traduz principalmente com relação à dureza e resistência ao desgaste no seu emprego como ferramentas de corte, resistência à tração e módulo de elasticidade. Esta anisotropia se mostra nos quatro planos de cisalhamento principais. Por isto, na preparação e no emprego de ferramentas de diamante, é necessário conhecer a posição dos planos de maior dureza e empregar a ferramenta de maneira a minimizar o desgaste, evitando-se o emprego da ferramenta em uma direção "mole" [110, 118, 122]. Na **figura 2.7** são mostrados a estrutura da célula elementar do diamante e seus planos de maior dureza.



**Figura 2.7** - Estrutura e planos de maior dureza de um cristal de diamante [118]

Uma caracterização bem definida da microestrutura de diamantes é extremamente difícil, se não impossível. Diamantes monocristalinos naturais sempre contêm vários tipos de defeitos, dentre os quais os defeitos macroscópicos como trincas e inclusões visíveis a olho nu ou com pequenas ampliações em microscópio, grandes defeitos da rede, como macias e linhas de crescimento, e defeitos submicroscópicos ou atômicos da rede, como discordâncias, átomos intersticiais ou substitucionais de impurezas, como átomos de metais, hidrogênio, nitrogênio ou oxigênio, ou ainda "clusters" destes átomos. Esta última categoria consiste basicamente do importante grupo de "clusters" de nitrogênio com dopamento não homogêneo e tamanhos diferentes. O nitrogênio é, aliás, a principal impureza encontrada em diamantes naturais, seguido do alumínio, boro, níquel e ferro. Estes não são, entretanto, os únicos elementos estranhos que podem surgir na estrutura de diamantes. Pesquisas neste campo mostraram a existência de mais de vinte e cinco diferentes minerais presentes nos diversos tipos de diamantes encontrados na natureza. Deste fato resulta que diamantes naturais em particular são microscopicamente muito diferentes entre si, o que se reflete em propriedades físicas e mecânicas também muito diferentes e que podem ser verificadas macroscopicamente através de diferentes resistências ao desgaste. Estas impurezas ou defeitos que surgem diferentemente são empregados para classificar os diamantes em diversos tipos [53, 108, 118, 119]. A mais conhecida classificação de diamantes, mostrada na **figura 2.8**, é feita em função do tipo e da quantidade de elementos estranhos presentes na estrutura deste material.

Tipo de Diamante	Propriedades	
I a	Nitrogênio até um máximo de 0,2%, distribuído de diferentes formas na estrutura do diamante; Contém "platelets", ou seja, deposição de nitrogênio em forma de discos com diâmetro inferior a 100 nm e espessura de 2-9 camadas atômicas; Corresponde a aproximadamente 90% dos diamantes.	
I b	Deposição de nitrogênio finamente distribuído de forma substitucional no diamante, em quantidade de ~ 0,1% .	
II a	Praticamente livres de nitrogênio.	Propriedades ópticas e térmicas excepcionais.
II b	Muito raros na natureza.	Normalmente de cor azul, possuem propriedades de semicondutores.

Figura 2.8 - Classificação de diamantes [118, 119]

Além de em função do tipo e quantidade de impurezas e defeitos presentes em uma ferramenta de diamante, a sua qualidade depende também da qualidade de preparação do gume e da posição deste em relação aos planos da estrutura cristalina [110]. Para avaliar a qualidade do gume é normalmente analisada a microgeometria deste. A microgeometria de um gume engloba os defeitos do gume e o raio de gume, o qual corresponde à região de transição entre a superfície de saída (face) e de incidência e que é responsável pelo grau de afiação de uma ferramenta. Esta microgeometria é importante na obtenção das boas qualidades superficiais exigidas na usinagem de ultraprecisão, já que neste caso a rugosidade teórica calculada em função do avanço e do raio de quina da ferramenta não é mais determinante para definir a rugosidade final possível de se obter [109]. Neste processo de fabricação a qualidade superficial pode ser teoricamente prevista através do modelo proposto por Brammertz, que leva em conta não apenas o avanço e o raio de quina da ferramenta, e sim também a espessura mínima de corte  $h_{cu.min}$ , conforme a fórmula:

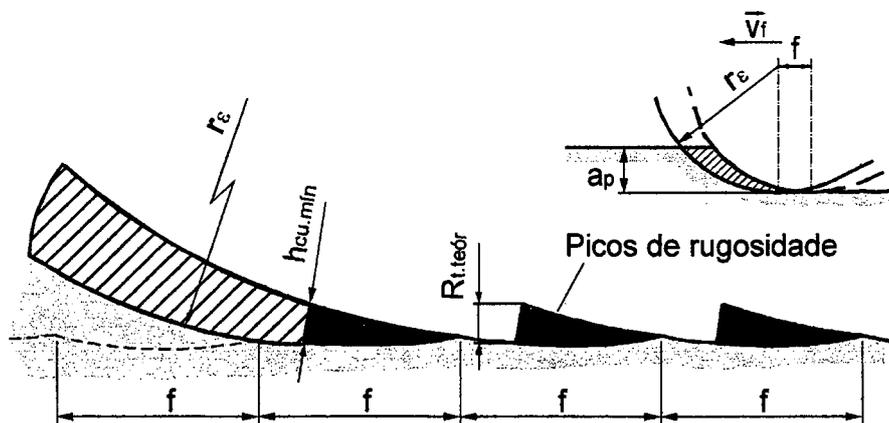
$$R_{t.teór} \approx \frac{f^2}{8.r_\epsilon} + \frac{h_{cu.min}}{2} \cdot \left( 1 + \frac{r_\epsilon \cdot h_{cu.min}}{f^2} \right) \quad (2.2)$$

onde a mínima  $R_{t,teór} \approx h_{cu,min}$ .

De acordo com esta teoria, em um determinado âmbito da região de corte o material não é removido, e sim simplesmente sofre deformação elástica e que, após a passagem da ferramenta, forma um pico de rugosidade na superfície da peça, conforme mostrado na **figura 2.9** [121]. A espessura mínima de usinagem não é, entretanto, uma grandeza absoluta, e sim depende do ângulo de saída efetivo, da velocidade de corte, da temperatura de corte, das condições de atrito entre peça e ferramenta, do material da peça e, principalmente, do raio de gume da ferramenta. De um modo geral, é válida a relação:

$$h_{cu,min} = \rho \cdot (1 - \text{sen } \gamma_{ef}) \quad (2.3)$$

A partir desta fórmula pode-se verificar, portanto, que quanto menor o raio de gume de uma ferramenta, menor a espessura mínima de usinagem possível.



**Figura 2.9** - Formação de picos de rugosidade conforme a teoria de Brammertz [121]

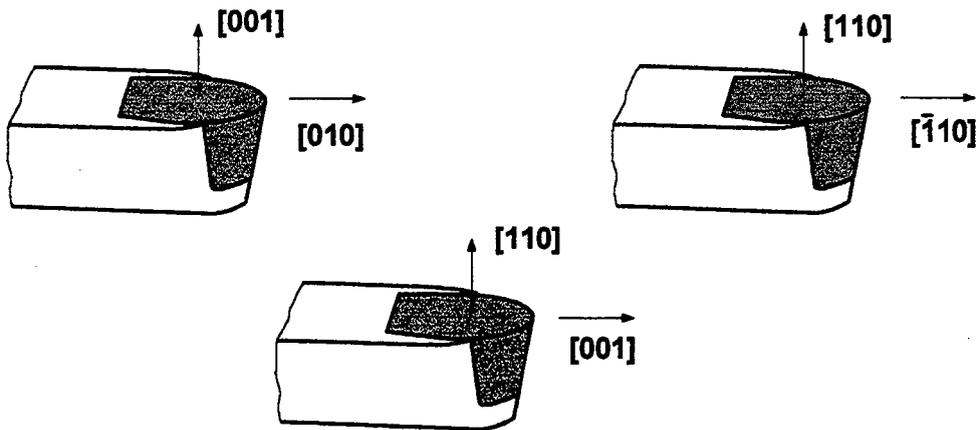
O gume da ferramenta de corte é de grande importância na usinagem de precisão e ultraprecisão. Em ferramentas de diamante monocristalino é possível obter gumes com raios significativamente menores que os normalmente obtidos em ferramentas de materiais policristalinos. Assim, a espessura mínima de usinagem é também de apenas alguns poucos nanômetros. Como, entretanto, as exigências que se faz à qualidade superficial de peças geradas através da tecnologia de usinagem de ultraprecisão são

muito grandes, não se pode desprezar os efeitos da espessura mínima de usinagem e, conseqüentemente, do raio de gume da ferramenta [118, 123]. Embora a dimensão mínima teórica do raio de gume de uma ferramenta de diamante seja determinada pela distribuição atômica neste material, e portanto na ordem de  $\rho \approx 0,3$  nm, na realidade os raios de gume que se podem obter dependem fortemente do processo de fabricação empregado na produção da ferramenta. Neste sentido não existem valores padronizados, sendo reportados gumes com valores mínimos de  $\rho$  na ordem de 10 nm [51, 92, 118, 124]. Ferramentas comerciais, entretanto, dificilmente são encontradas com raios de gume abaixo de 50 nm.

Devido à anisotropia das propriedades mecânicas de diamantes, a orientação cristalográfica é um dos fatores de importância para a definição da posição das superfícies de saída (face) e de incidência em ferramentas deste material. Neste sentido, a posição do gume da ferramenta deve ser escolhida de maneira que tanto a resistência ao desgaste quanto a qualidade do gume possível de se obter sejam máximas. Conforme a orientação cristalina, uma ferramenta de diamante pode ter uma relação entre as durezas de 1:5 a 1:6. Devido a isto, é importante o conhecimento dos planos de maior dureza e resistência ao desgaste das ferramentas de diamante, de maneira que se possa otimizar a vida destas. Esta orientação cristalina pode ser obtida através de diversos métodos, sendo o mais difundido a utilização das técnicas de Laue, com emprego de raios-X [67, 108, 125, 126].

De acordo com a forma e a aplicação, as ferramentas podem ser orientadas de forma que a superfície de incidência ou a face compreendam os planos de maior dureza ou resistência ao desgaste. Ferramentas de diamante têm em muitos casos a face orientada segundo o plano (110). Segundo Bex [113], ferramentas com superfícies de incidência posicionadas segundo este plano têm maior resistência ao desgaste que ferramentas cuja superfície de incidência coincide com o plano (110), e que a posição da face não tem muita influência na resistência ao desgaste da ferramenta, visto que este ocorre principalmente na superfície de incidência. Já outros pesquisadores, como Hurt e Decker [126], afirmam que as ferramentas com melhor comportamento ao desgaste são as que possuem tanto a face quanto a superfície de incidência orientadas segundo o plano (100). Ferramentas com esta característica são inclusive chamadas de "super-ferramentas", por

seu excepcional comportamento com relação ao desgaste. Esta divergência de conclusões quanto à melhor orientação para ferramentas de diamante leva à suposição que existe uma dependência entre a orientação ideal e os mecanismos de desgaste, condições de corte e processo de fabricação empregado. Na **figura 2.10** é possível ver algumas das diferentes orientações usuais para ferramentas de diamante monocristalino.

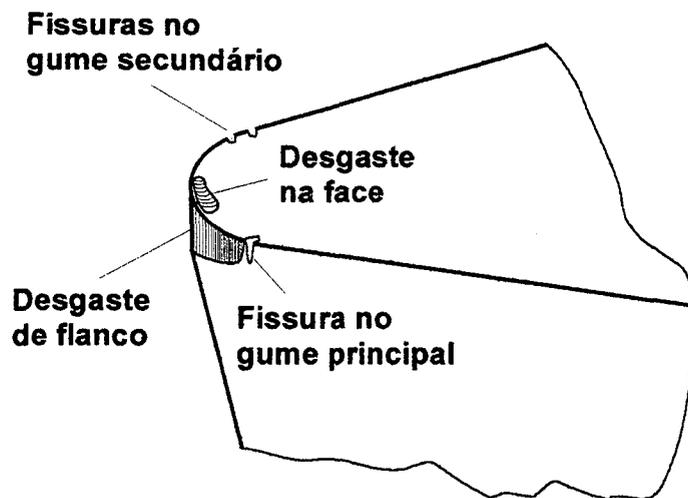


**Figura 2.10** - Diferentes variantes para a orientação de ferramentas de diamante monocristalino [118]

O comportamento do desgaste de uma ferramenta de diamante monocristalino durante a usinagem de ultraprecisão depende basicamente das propriedades dos cristais empregados, do material da peça usinada, da rigidez do sistema ferramenta-máquina-ferramenta e das condições gerais de usinagem, entre outros fatores. Este desgaste é causado basicamente por processos termo-químicos e mecânicos [118, 127, 128].

O desgaste mecânico é classificado normalmente em desgaste de flanco ou progressivo e microquebras do gume. O desgaste de flanco, que na microusinagem de metais não metálicos é o principal critério de desgaste, ocorre devido ao contato contínuo entre peça e ferramenta, ou seja, contato entre o cavaco gerado e as superfícies de saída e de incidência. Ao contrário do que ocorre em outros materiais de corte, no diamante o desgaste de flanco apresenta-se como uma faixa estreita, cuja forma é dependente do material usinado, da posição do gume com relação à estrutura cristalina do diamante e sua anisotropia, entre outros fatores. As microquebras de um gume de diamante são, por

sua vez, uma forma de desgaste que tem uma influência significativa sobre a qualidade da superfície gerada. Este tipo de desgaste ocorre devido a defeitos existentes na ferramenta ou a inclusões duras no material usinado, que provocam fraturas no diamante [118]. Na **figura 2.11** são mostradas algumas das formas nas quais ocorre o desgaste em ferramentas de diamante monocristalino.



**Figura 2.11** - Formas de desgaste em ferramentas de diamante [118]

Outra causa importante para o desgaste de ferramentas de diamante são os processos termo-químicos que se fazem presentes durante a usinagem. Estes podem ser subdivididos em oxidação, grafitização, difusão e formação de carbonetos [128]. Para temperaturas acima de  $650^{\circ}\text{C}$ , que podem ocorrer na microusinagem de alguns materiais, inicia-se a oxidação do diamante, com sua conseqüente destruição progressiva [90, 118, 119, 128]. A transformação da estrutura do diamante em grafite também ocorre para temperaturas acima de  $650^{\circ}\text{C}$ , enquanto a difusão de átomos de carbono da ferramenta pode ocorrer tanto diretamente da superfície do diamante como indiretamente, após a grafitização [128]. O desgaste de ferramentas de diamante monocristalino pode ser conseqüência também de uma afinidade química entre o material usinado e o diamante com o aumento da temperatura. Elementos como tungstênio, tântalo, titânio e zircônio reagem com diamante a partir de uma determinada temperatura, formando carbonetos. Da mesma forma o ferro, cobalto, manganês, níquel e cromo não são usualmente usinados com diamante, já que todos têm afinidade química com o carbono [119].

A definição do processo de trabalho na usinagem de ultraprecisão é, ainda, principalmente determinada por dados obtidos empiricamente. Isto também é o caso para a determinação da geometria da ferramenta empregada [110]. Ferramentas de diamante monocristalino podem ser encontradas em diferentes formas, que podem ser classificadas com relação às seguintes geometrias de gume:

- Ferramentas com gumes em forma de segmento de círculo;
- Ferramentas com gumes facetados;
- Ferramentas com gume principal em forma de segmento de círculo e gume secundário reto;
- Ferramentas com gumes retos [47, 50, 118].

Ferramentas com gumes circulares são, até o momento, as mais empregadas, em função da sua universalidade de aplicação [10, 118]. Para a fabricação de anesferas esta geometria é, inclusive, a única comercialmente empregada. O posicionamento de ferramentas com esta forma é relativamente simples, já que as condições de contato para um perfil circular ideal são idênticas para todas as posições. Os raios de ferramentas com esta forma variam normalmente de  $0,1 < r_e < 100$  mm. Teoricamente raios maiores possibilitam a obtenção de superfícies com melhor qualidade superficial, de acordo com a equação 2.2 já mostrada anteriormente. Entretanto, devido ao incremento de forças passivas para aumentos nos raios das ferramentas, com a conseqüente geração de vibrações no sistema, e em função do mecanismo de formação de cavacos na usinagem de ultraprecisão ter características próprias, maiores raios de quina não implicam necessariamente em incrementos na qualidade superficial da peça [118].

Ferramentas facetadas ou com gume reto são, ao lado das de perfil circular, bastante empregadas na usinagem de superfícies planas [50, 118]. Com este tipo de geometria é possível influir com mais liberdade nos valores teóricos da rugosidade, através da variação do ângulo de posição da ferramenta. Para estes tipos de ferramentas a rugosidade teórica pode ser calculada através da fórmula:

$$R_{t,teór} = f \cdot \frac{\text{sen } \chi \cdot \text{sen } \chi'}{\text{sen } \varepsilon} \quad (2.4)$$

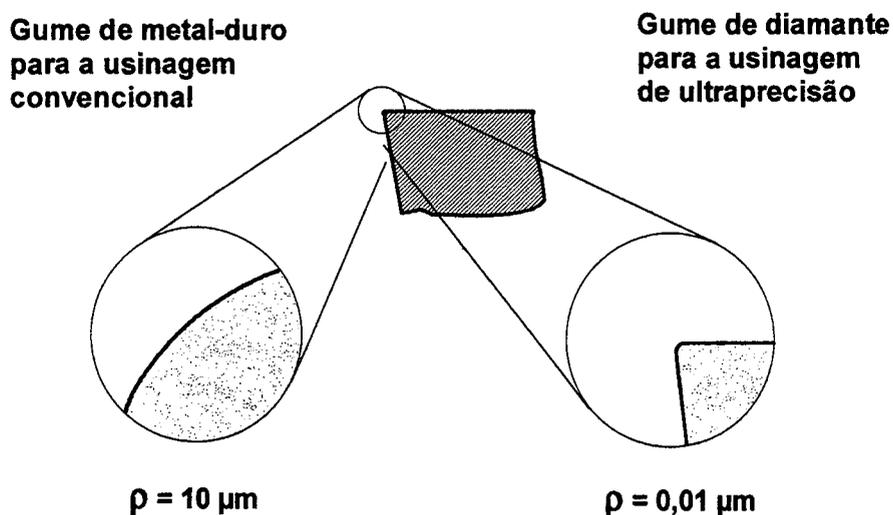
Assim, uma diminuição de  $\chi'$  permite, dentro de certos limites, um acréscimo na qualidade superficial. Já com as ferramentas de gumes mistos de perfil circular e reto é possível aproveitar até certo ponto as vantagens destes dois tipos de geometria. Estas formas de ferramenta não são, entretanto, tão difundidas quanto as de gumes circulares ou de gumes retos [118]. Para a fabricação de ferramentas de diamante são normalmente empregadas gemas na ordem de 0,5 quilate [10].

Na fabricação de ferramentas de diamante monocristalino para a nanousinagem são ainda empregados os mesmo métodos convencionais de retificação e polimento utilizados na fabricação de jóias. Para acompanhar o desenvolvimento na tecnologia de fabricação de ultraprecisão, entretanto, é necessária uma otimização nos processos de fabricação de ferramentas. Para isto, deve-se trabalhar no sentido de aumentar a rigidez do sistema empregado para o polimento das ferramentas, os erros de forma e de planicidade dos discos de polimento devem ser minimizados e o fuso da máquina polidora deve possuir mancais de alta precisão (normalmente aerostáticos), para garantir as precisões de batimento exigidas neste tipo de operação. Além disto, o processo de fabricação de ferramentas de diamante monocristalino de alta qualidade deve ser realizado em ambiente climatizado e com isolamento das vibrações do meio-ambiente. Para melhorar a qualidade dos gumes das ferramentas de diamante fabricadas existem, atualmente, processos posteriores às operações de lapidação e polimento, como por exemplo o bombardeamento com ions e a eletroerosão. Através destes processos, é possível obter gumes com um grau de afiação extremo [67, 108, 118, 129, 130].

Embora as exigências que se faça atualmente à qualidade de ferramentas de diamante para o emprego em processos de fabricação como a usinagem de ultraprecisão sejam grandes, ainda existe uma série de problemas no sentido de qualificar ferramentas deste tipo. Frequentemente fabricantes de ferramentas de diamante não fornecem informações importantes sobre as características de seus produtos, em virtude principalmente das dificuldades de se obter estas informações. Dentre as características de importância que são necessárias para qualificar uma ferramenta de diamante a ser empregada na

usinagem de ultraprecisão encontram-se o raio do gume e o estado do mesmo com relação à sua microgeometria. Também importante é o controle do raio de quina e dos ângulos da ferramenta, que entretanto não apresentam tanta dificuldade de caracterização quanto o raio do gume e a sua microgeometria, já que podem ser medidos com o uso de microscópio óptico e microscópio eletrônico, para ampliações entre 600x e 1200x, ou em máquinas de medição especialmente projetadas para esta tarefa [67, 109, 118].

Os raios de gume de ferramentas de diamante monocristalino podem ter desde várias centenas de nanômetros, em ferramentas comercialmente encontradas, até algumas poucas dezenas de nanômetros, para ferramentas especialmente preparadas. Alguns autores relatam casos de ferramentas com raios de gume entre 10 e 50 nm [2, 131], o que faz com que a tarefa de caracterizar ferramentas com dimensões tão ínfimas revele-se formidável. O raio de gume de ferramentas de diamante pode chegar a ter dimensões na ordem de mil vezes menores que gumes de ferramentas de metal-duro convencionais. A **figura 2.12** mostra comparativamente esta relação [49]. Também os defeitos de microgeometria do gume estão nesta ordem de grandeza, de maneira que uma caracterização qualitativa e quantitativa tanto do raio de gume como de sua microgeometria com instrumentos de medição empregados para avaliar ferramentas de materiais policristalinos revela-se impossível [118].



**Figura 2.12** - Relação entre raios de gume de ferramentas de diamante e de metal-duro [49]

Para a medição do raio de gume de ferramentas de diamante têm sido empregados vários processos, entretanto os melhores resultados até o momento são obtidos através do uso de microscópios de força atômica. Também microscópios eletrônicos de varredura, de transmissão ou tunelamento têm sido aplicados nesta tarefa, principalmente no julgamento de defeitos microgeométricos [109, 118, 126, 131]. Outro método para verificar o estado do gume de ferramentas de diamante é a caracterização indireta, através da verificação da qualidade da superfície gerada, já que durante o processo de usinagem os defeitos do gume são espelhados na peça produzida. Esta metodologia de qualificação apresenta entretanto uma série de desvantagens, já que a qualidade superficial traz, além de informações sobre o gume da ferramenta, também as influências do processo de fabricação. Vibrações do sistema ferramenta-máquina-ferramenta, características da estrutura do material usinado e outras variáveis estão entre os fatores que podem influir na forma e na rugosidade de uma superfície, de maneira que a observação pura e simples desta nem sempre permite uma avaliação precisa da qualidade do gume da ferramenta [118].

### **2.3. A Usinagem Dúctil de Materiais Duros e Frágeis**

A usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis com ferramentas de diamante mostrou-se, já após as primeiras tentativas, como uma alternativa interessante para a fabricação de elementos ópticos transmissivos e de alta precisão. O sucesso desta tecnologia baseia-se principalmente nas características de ferramentas de diamante, que são alta resistência ao desgaste, alta dureza e a possibilidade de se obterem gumes de extrema qualidade e com raio de arredondamento na ordem de apenas algumas dezenas de nanômetros. Estas qualidades das ferramentas de diamante são importantes para que seja possível trabalhar com espessuras de cavaco mínimas durante um tempo elevado, condição necessária para que se trabalhe em regime dúctil também em materiais frágeis [20].

Devido ao comportamento frágil dos cristais infravermelhos, como por exemplo germânio, silício, selenito de zinco, sulfeto de zinco e Cleartran, entre outros, durante muito tempo a usinagem com ferramentas de diamante de geometria definida parecia ser inadequada

para a fabricação de elementos ópticos nestes materiais, ao contrário do que sucedeu com a usinagem de metais não ferrosos. Em 1975 Soileau [132] propôs, provavelmente como pioneiro neste campo, a usinagem de ultraprecisão de materiais de comportamento frágil, e produziu com sucesso elementos ópticos em cloreto de potássio utilizando esta tecnologia. Os resultados obtidos por este pesquisador mostraram-se promissores e de excelente qualidade.

Os primeiros resultados de usinagem de sulfeto de zinco e germânio com ferramentas de diamante podem ser encontrados na literatura já a partir do ano de 1977 [133]. Na firma americana Union Carbide Corporation foram realizados, em estreita cooperação com o Lawrence Livermore Laboratory, ensaios básicos para alguns dos materiais infravermelhos de maior importância, como selenito de zinco, sulfeto de zinco e germânio, entre outros. Destes ensaios resultaram rugosidades  $R_a$  na ordem de 15 nm, valores ainda em tomo de dez vezes piores que os obtidos no polimento destes materiais. Nos anos subsequentes, até aproximadamente 1985, praticamente não é encontrada literatura descrevendo resultados de usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos. Após isto, entretanto, verificou-se um crescente aumento no interesse dos pesquisadores neste campo, provavelmente causado pelos enormes desenvolvimentos no campo das aplicações de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho. Diversos trabalhos apresentam resultados de pesquisa descrevendo os efeitos da variação dos parâmetros de usinagem sobre o resultado de trabalho e propondo modelos explicativos para a usinagem dúctil de materiais frágeis [3, 15, 16, 20, 38, 58, 75, 77, 102, 134, 135, 136, 137, 138, 139].

Os cristais infravermelhos são materiais que em condições normais apresentam um comportamento frágil. Ou seja, sob uma tensão de tração, torção ou compressão uniaxial ocorre fratura frágil antes que seja possível verificar qualquer deformação plástica. Entretanto, embora estes cristais não apresentem deformação plástica para condições normais de usinagem, é possível trabalhar em regime dúctil com ferramentas de diamante sob condições específicas, obtendo-se assim superfícies com qualidade óptica [3, 16, 19, 58, 71, 102, 134, 135, 136, 140]. Para que seja possível obter uma superfície óptica, porém, é necessária a escolha de parâmetros de usinagem que permitam a ocorrência de uma deformação plástica do material na proximidade da região do gume da ferramenta

que deve gerar a superfície acabada. De outra forma ocorrem pequenas fraturas na superfície gerada, assim chamadas de "pittings", na ordem de grandeza de poucos nanômetros a alguns micrometros.

Segundo Nakasuji et al [16], a transição do regime frágil para o dúctil na remoção de cavacos é influenciada basicamente pela posição dos planos de maior tensão de tração e compressão com relação aos planos de escorregamento típicos dos cristais. Uma fratura frágil do cristal é favorecida por tensões de tração atuando na direção do plano de cisalhamento, enquanto uma deformação plástica pode ocorrer quando existem altas tensões de compressão na direção dos planos de escorregamento. Devido a isto, a qualidade superficial possível de obter é determinada pelo processo de remoção do material. Enquanto o emprego deste modelo é possível para materiais monocristalinos homogêneos, o mesmo não permite explicar a usinagem dúctil de cristais infravermelhos policristalinos, nos quais os cristais estão distribuídos aleatoriamente em diferentes orientações. Devido a isto, é de grande importância o estudo e a otimização do processo de usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos policristalinos, visto serem os monocristalinos difíceis de obter e, por isto mesmo, extremamente caros. O mecanismo de remoção de cavacos em materiais policristalinos é, entretanto, bastante complexo, visto que os principais fatores de influência, como por exemplo os contornos de grão, a distribuição dos grãos de diferentes tamanhos e a anisotropia das propriedades mecânicas destes materiais têm uma grande influência sobre o resultado de trabalho. A obtenção de superfícies ópticas em materiais duros e frágeis exige a escolha de parâmetros de usinagem de tal maneira que a deformação plástica do material ocorra no âmbito do gume da ferramenta que gera a superfície final, de forma que a superfície usinada não seja marcada por trincas e microquebras que tornem a superfície inadequada a aplicações ópticas [20].

Os materiais duros e frágeis apresentam a característica de necessitar uma energia menor para a formação de trincas do que a necessária para uma deformação plástica. Estes materiais reagem a tensões de tração e normais com mecanismos de fratura antes que ocorram processos de deformação plástica. Para evitar a ocorrência indesejada de trincas, portanto, é necessário minimizar a introdução de tensões de tração no processo de usinagem. Segundo Spenrath [35], neste sentido a forma do gume da ferramenta de

diamante e o campo de tensões resultante têm uma importância fundamental. Quando se pressiona um corpo puntual sobre uma superfície plana, tem-se um campo de tensões segundo a lei de Boussinesq, o que leva à introdução de tensões radiais de tração no material. Já no caso de se pressionar um corpo esférico sobre uma superfície plana, desenvolve-se um campo de tensões segundo a lei de Hertz, que ocasiona altas tensões de compressão na região do contato. Assim, uma ferramenta teórica de diamante com o gume em forma de esfera que seja pressionada sobre a superfície de um material duro e frágil ocasiona um campo de tensões na região de contato entre dois materiais com módulos de elasticidade muito diferentes. Disto resultam deformações também muito diferentes na região de contato, que embora ocasionem tensões de tração não causam fraturas no material, visto que estas são dominadas pelo estado de tensões de compressão muito maior. O material pode assim deslizar plasticamente nos planos de escorregamento específicos sob a ação das tensões de tração. Neste contexto, observando-se a relação entre o raio de arredondamento do gume de uma ferramenta de diamante e a espessura de usinagem  $h_{cu}$ , verifica-se que a remoção do material em regime dúctil somente pode ocorrer no âmbito do gume onde a espessura de usinagem encontra-se na ordem de grandeza do raio de gume. Raios de gume típicos em ferramentas de diamante monocristalino encontram-se na faixa de algumas dezenas de nanômetros [1], de forma que para a maior parte do campo de espessuras de usinagem a ferramenta pode ser praticamente considerada como uma cunha, o que por sua vez acarreta mecanismos de fratura frágil. Assim, podem-se entender as observações de diversos autores com relação a uma melhoria das características superficiais de materiais frágeis usinados por diamante à medida que ocorre um certo desgaste do gume, com um conseqüente arredondamento do mesmo, o que favorece a ocorrência de um estado de tensões de compressão necessário à usinagem dúctil [39].

Segundo diversos pesquisadores [20, 102, 136, 138], a formação de cavacos na usinagem de ultraprecisão decorre de uma combinação de fratura frágil e remoção no regime dúctil. Decisivo para a transformação do processo de fratura frágil para a remoção no regime dúctil ao longo do flanco do cavaco é, segundo Blacke e Scattergood [102], o fato de que abaixo de uma determinada espessura de usinagem crítica a energia necessária para uma deformação plástica do material sobrepõe a energia onde ocorre a formação de trincas. A neutralização do estado de tensões de tração induzidas no material pode, portanto, ocorrer

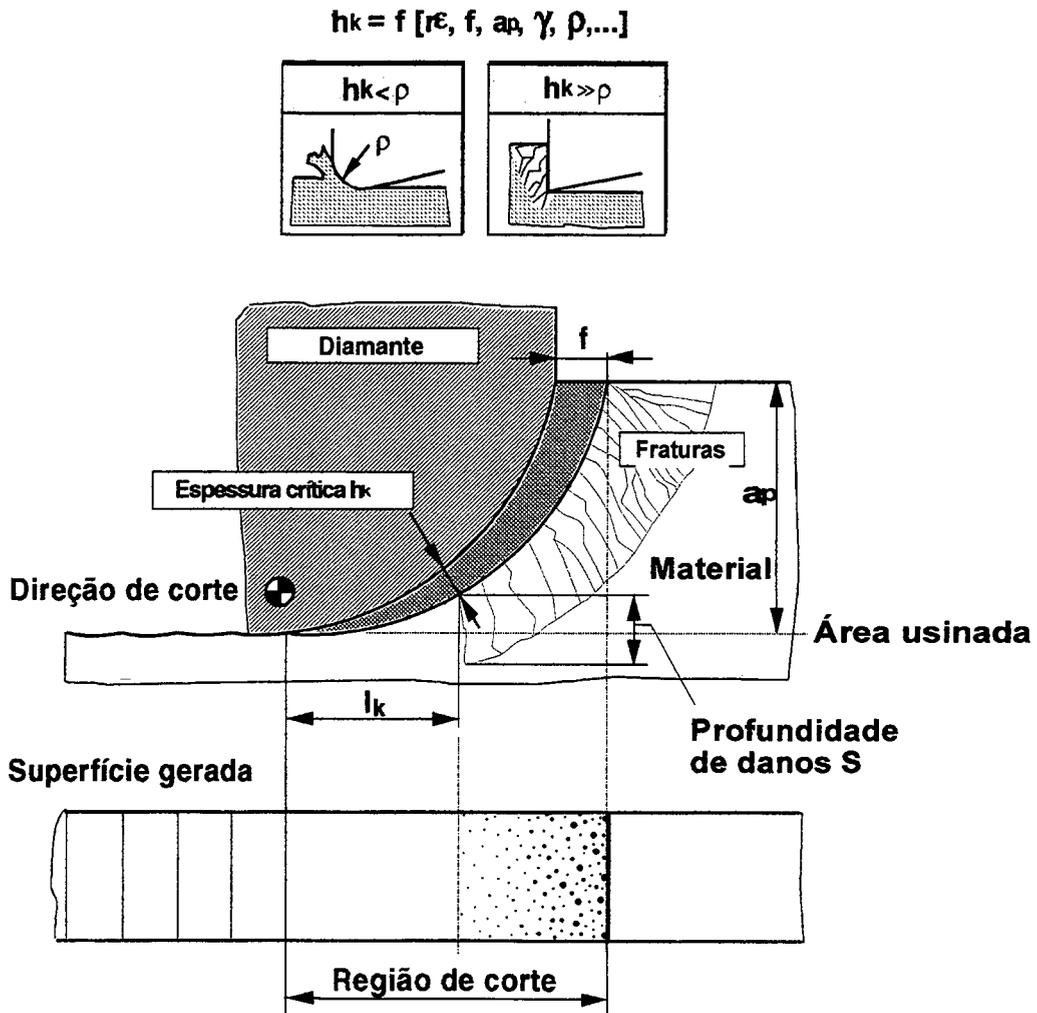
através de deslocamentos plásticos dos planos de deslizamento, ao invés de através de mecanismos de fratura. O processo de trabalho deve, assim, ser realizado de tal forma que a parte da ferramenta que gera a superfície óptica trabalhe com segurança no regime dúctil. Normalmente para a maioria dos materiais frágeis este limite onde há a possibilidade de uma usinagem dúctil encontra-se em espessuras de usinagem na faixa de apenas alguns nanômetros. Isto não significa, entretanto, que na usinagem com ferramentas de diamante deva-se trabalhar obrigatoriamente em profundidades de corte submicrométricas. Conforme mostrado na **figura 2.13**, quando são escolhidos parâmetros de usinagem apropriados existe a possibilidade da ocorrência de usinagem dúctil. Os parâmetros de usinagem devem ser escolhidos de forma que a zona com fraturas que ocorre após a região  $l_k$  ao longo do gume de corte seja totalmente removida pela próxima passagem da ferramenta, ou seja, uma superfície de boa qualidade óptica somente pode ser obtida quando a profundidade de danos  $S$  não chega até uma profundidade na qual será gerada a superfície final da peça. Desta forma, também durante a assim denominada usinagem dúctil a maior parte do material sofre fratura frágil e é pulverizada [20, 102].

A partir de ensaios sistemáticos de usinagem de materiais frágeis, Blackley e Scattergood [138] propuseram o modelo mostrado na equação 2.5 a seguir:

$$\frac{l_k^2 - f^2}{r_e} = \frac{h_k^2}{f^2} - 2 \left[ \frac{h_k + S}{r_e} \right] \quad (2.5)$$

Enquanto a grandeza  $h_k$  pode ser considerada como o parâmetro que define quando ocorre o início da usinagem dúctil, a profundidade de danos  $S$  é uma grandeza que determina a existência ou não de trincas na superfície final da peça, assim como a propagação destas trincas. Ambos os parâmetros são importantes para a determinação dos limites da usinagem dúctil. O conhecimento dos mesmos possibilitaria, por exemplo, a determinação do avanço máximo para uma dada geometria de ferramenta para a obtenção de superfícies ópticas em um certo material. Este modelo, entretanto, não leva em conta uma grande parte das influências relevantes que ocorrem durante um processo de usinagem, de forma que a averiguação experimental dos parâmetros ótimos de usinagem não é, até o momento, trivial [20]. Para verificar sob que condições é possível atingir os melhores resultados de trabalho, ou seja, a melhor qualidade superficial e de

forma, é necessário estudar com profundidade todas as variáveis envolvidas no processo de fabricação de superfícies ópticas nos diversos materiais duros e frágeis.



**Figura 2.13 -** Formação de cavacos na usinagem de ultraprecisão dos materiais duros e frágeis [20]

Na usinagem com diamante de germânio e silício a espessura de usinagem crítica  $h_k$  normalmente varia de 20 a 200 nm, conforme os parâmetros de usinagem escolhidos, sendo que a profundidade média de danos  $S$  situa-se entre 1 e 2  $\mu\text{m}$ . Estes valores são dependentes, além dos parâmetros de usinagem, das características mecânicas do material usinado e da geometria e estado da ferramenta [12, 20, 102, 134]. A partir de ensaios de fratura frágil, foi possível estabelecer uma relação entre a profundidade crítica

de penetração  $d_k$  e algumas destas características mecânicas, através da análise do mecanismo de fratura. Esta relação pode ser observada na equação 2.6 a seguir:

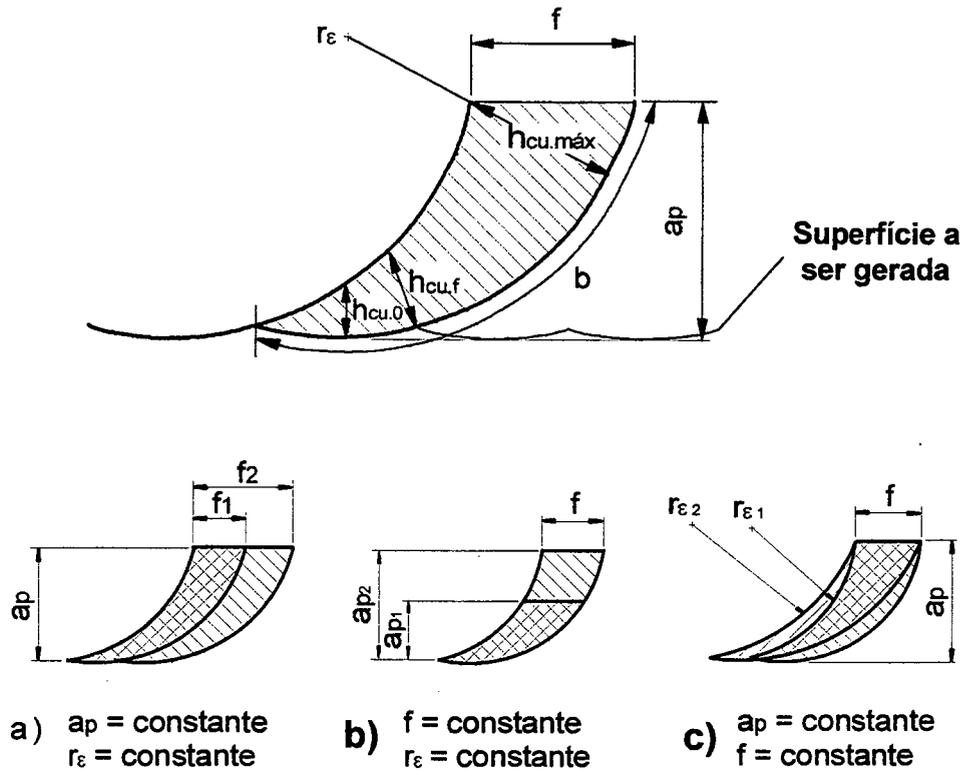
$$d_k = \beta \cdot \left[ \frac{K_c}{H} \right]^2 \cdot \left[ \frac{E}{H} \right] \quad (2.6)$$

Segundo este modelo a grandeza  $\beta$ , que é dependente das condições gerais de processo, e o módulo de elasticidade  $E$  comportam-se linearmente com relação à profundidade crítica de penetração  $d_k$ . Também é possível verificar que a dureza do material  $H$  tem a maior influência sobre o valor de  $d_k$ , seguida pela tenacidade à fratura  $K_c$  [138]. Em cristais infravermelhos o valor da tenacidade à fratura é, em comparação com materiais dúcteis, bastante inferior.

A profundidade crítica de penetração  $d_k$  representa, segundo este modelo, o limite entre a deformação plástica do material e onde se inicia a remoção frágil, e corresponde portanto à espessura crítica de usinagem  $h_k$  na usinagem com diamante. Neste sentido a geometria da ferramenta e a geometria do cavaco, consequência dos parâmetros de processo escolhidos, têm importância fundamental para o sucesso da usinagem dúctil. Também o emprego de fluido de corte pode auxiliar no sucesso da usinagem dúctil, já que assim diminui-se o atrito entre o material da peça e a face e a superfície de incidência da ferramenta, o que ajuda a evitar a propagação das tensões de tração no material da peça [20]. Como, entretanto, o fator de processo  $\beta$  não pode ser simplesmente representado por uma grandeza, em função da grande quantidade de variáveis que atuam sobre o mesmo, este modelo não pode ser diretamente aplicado na prática para determinar a profundidade crítica de penetração  $d_k$  [12].

As pesquisas realizadas até o momento na usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis mostraram que, para se obter uma superfície de boa qualidade e livre de danos, a escolha do avanço tem uma importância fundamental [20, 77, 102]. Com o aumento do avanço altera-se a forma do cavaco de tal forma que a espessura de usinagem aumenta com muito mais rapidez ao longo do flanco do cavaco, de modo que a espessura crítica de usinagem  $h_k$  também é mais rapidamente atingida (vide **figura 2.14-a**). A posição desta espessura crítica  $h_k$  aproxima-se da posição da futura superfície gerada pela passagem da

ferramenta, de tal forma que as trincas formadas já não podem mais ser totalmente removidas da superfície da peça pelas posteriores passagens da ferramenta [20].



**Figura 2.14** - Variação da geometria do cavaco em dependência dos parâmetros de usinagem [1]

O início da fratura frágil reflete-se fortemente sobre os valores de rugosidade medidos. Enquanto na usinagem de germânio e silício o valor de  $R_a$  cresce gradativamente para avanços acima de  $3 \mu\text{m}$ , as rugosidades máximas P-V mostram um crescimento súbito com o início da ocorrência de fratura frágil. Neste caso, podem ser verificadas regiões relativamente grandes da superfície com danos [77]. Estes danos ("pittings") têm dimensões entre  $1$  e  $4 \mu\text{m}$  de largura, enquanto a profundidade dos mesmos é da ordem de dez vezes menor [102].

De uma forma geral não é possível definir qual o avanço máximo a ser empregado na usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis sem que haja a ocorrência de defeitos sobre a superfície final. Para alguns materiais este limite é bastante superior aos

do germânio e silício, como é o caso, por exemplo, de cristais de KDP (dihidrogenofosfato de potássio). Nestes materiais foram obtidas superfícies ópticas com rugosidade  $R_a$  em torno de 1 nm com o emprego de avanços de aproximadamente 7  $\mu\text{m}$ , utilizando-se ferramentas com raio de quina relativamente grande ( $r_\epsilon = 7,6 \text{ mm}$ ) [20].

Teoricamente as variações da profundidade de corte na usinagem dúctil de materiais frágeis tem, por sua vez, uma influência relativamente pequena sobre a qualidade superficial, já que os mecanismos de fratura frágil são principalmente afetados pelas dimensões locais da espessura de usinagem  $h_{cu}$  e não pela profundidade nominal de corte  $a_p$ . Um aumento de  $a_p$  altera na verdade a largura de usinagem  $b$  ao longo do flanco do cavaco, assim como a espessura de cavaco máxima  $h_{cu.máx}$ , entretanto não tem nenhuma influência direta sobre a espessura crítica de usinagem  $h_k$  e, conseqüentemente, sobre a qualidade da superfície gerada (vide **figura 2.14-b**). Os defeitos diretamente sobre o flanco do cavaco normalmente atingem profundidades de 10 a 20% da dimensão de  $a_p$ , e são totalmente removidos pelas próximas passagens da ferramenta [20, 102]. Entretanto, na prática valores de  $a_p$  muito pequenos levam a qualidades superficiais piores, já que o processo de formação de cavacos torna-se instável e a usinagem não é mais bem sucedida. Da mesma forma, valores de  $a_p$  muito grandes trazem na prática também rugosidades maiores, visto que para maiores profundidades de corte ocorrem maiores forças de usinagem, que podem influenciar negativamente os resultados de trabalho [12].

O ângulo de quina  $r_\epsilon$  da ferramenta determina, assim como o avanço, a posição relativa da espessura crítica de usinagem ao longo do flanco do cavaco. Para raios maiores o cavaco formado é mais estreito, o que significa que a espessura crítica de usinagem se desloca em direção à espessura máxima de usinagem  $h_{cu.máx}$ , de modo que o comprimento  $l_k$  aumenta e se podem esperar superfícies com melhor qualidade superficial (**figura 2.14-c**). Se neste caso o avanço permanecer constante, tem-se também um decréscimo na rugosidade cinemática teórica, que entretanto não coincide com as rugosidades reais abaixo de um determinado valor de avanço. Para raios de quina muito grandes ocorre, todavia, que as forças passivas podem crescer demasiadamente, o que leva eventualmente à indução de vibrações no sistema ferramenta-máquina-ferramenta, com uma conseqüente deterioração da qualidade superficial [20, 35, 77]. Os efeitos do raio de

quina sobre a qualidade superficial são confirmados por ensaios realizados em diversos materiais duros e frágeis, como germânio, silício, cloreto de potássio e sulfeto de zinco, entre outros [12, 20, 77, 136].

O ângulo de saída  $\gamma$  da ferramenta mostra ter também uma grande influência sobre o resultado de trabalho na usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis. O estado de tensões de compressão, importante para o trabalho no regime dúctil, pode ser positivamente influenciado através de aumentos negativos no ângulo de saída [20, 35, 77]. Valores de  $\gamma$  usuais para a usinagem de cristais infravermelhos, por exemplo, encontram-se na ordem de  $-25^\circ$ , embora para cristais muito macios e frágeis, como KDP, sejam freqüentemente empregadas ferramentas com ângulos de saída  $\gamma$  de até  $-45^\circ$  [139]. Não deve ser esquecido, entretanto, que a dimensão do ângulo de saída tem influência também sobre o atrito entre ferramenta e peça e sobre as forças passivas e, com isto, sobre o desgaste da ferramenta [15, 20].

A espessura crítica de usinagem  $h_k$ , a profundidade de danos  $S$  e a ocorrência de trincas na superfície de um material duro e frágil são influenciadas, além de pelos parâmetros de usinagem e variáveis de trabalho, pelas características do material da peça, como a orientação cristalina, por exemplo, e pela direção de corte. Enquanto que no processo de fresamento com diamante de materiais monocristalinos a usinagem ocorre praticamente em uma direção cristalina, que pode ser portanto otimizada, no torneamento de materiais monocristalinos ocorre um fenômeno que tem um efeito não desprezível sobre a qualidade superficial. Devido à variação da direção de corte em relação à orientação cristalina que ocorre no torneamento e devido à anisotropia nas propriedades mecânicas de cristais, é possível reconhecer estruturas com uma simetria em relação ao centro de rotação da peça. Estas estruturas refletem as diferentes propriedades elásticas para as diversas direções cristalinas e dividem as peças torneadas em setores com e sem defeitos superficiais, principalmente para avanços usualmente maiores que  $1 \mu\text{m}$  [16, 20, 133]. Esta problemática é uma das principais motivações para um estudo sistemático e uma conseqüente otimização da usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos policristalinos, como o sulfeto de zinco, Cleartran e germânio, já que elementos anesféricos são na maioria das vezes simétricos em relação a um eixo de rotação e podem freqüentemente ser usinados apenas pelo processo de torneamento por diamante

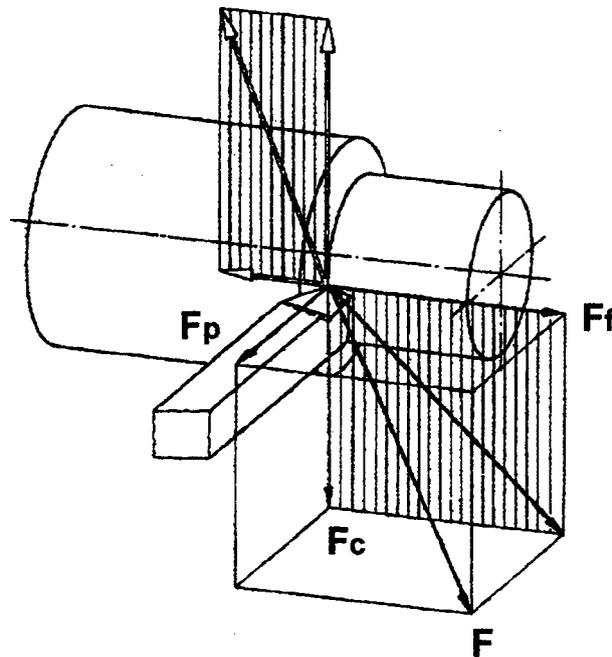
[15, 20]. A otimização do processo de fabricação de elementos ópticos em cristais infravermelhos através da usinagem com diamante pode trazer como consequência imediata a possibilidade de produzir a custo relativamente baixo elementos anesféricos de alta qualidade [20].

#### 2.4. Forças na Usinagem de Ultraprecisão

Apesar dos grandes progressos feitos nos últimos anos na tecnologia de usinagem de ultraprecisão, ainda faltam conhecimentos sobre o mecanismo de corte e sobre as condições de corte ótimas durante a usinagem de materiais em condições de avanço e profundidade de corte extremamente pequenas, como as que normalmente ocorrem durante a usinagem com ferramentas de diamante. Muitos dos parâmetros de entrada, como as propriedades do material da peça e sua orientação e estrutura cristalina, a geometria e propriedades do material da ferramenta, as propriedades do fluido de corte e o comportamento estático, dinâmico e térmico da máquina-ferramenta têm um importante papel neste processo. Estes parâmetros interagem com as tensões, forças e temperaturas, de forma que grande parte destes têm, direta ou indiretamente, influência sobre a qualidade final da peça [13, 78, 141, 142, 143]. Uma ferramenta útil e essencial na compreensão dos fenômenos que ocorrem na usinagem é entre outras, portanto, a medição e análise das componentes de força que ocorrem durante este processo de fabricação [48].

Através da medição das componentes da força de usinagem, mostradas na **figura 2.15** de uma forma esquemática para o processo de torneamento, é possível adquirir importantes conhecimentos sobre os fenômenos plastomecânicos e tribológicos que ocorrem na usinagem de ultraprecisão, sobre o mecanismo de desgaste de ferramentas de diamante e a influência que o nível e a dinâmica das forças têm sobre a precisão dimensional, de forma e superficial da peça produzida [144]. A capacidade de medir as forças tem, também, importantes consequências na automatização do fabricação, onde a verificação do desgaste da ferramenta em tempo real é necessária para o controle do desgaste da ferramenta na fabricação em grande escala [145], visto ser a análise das forças um critério valioso para a avaliação do desgaste [146], assim como é importante para determinar as

características de projeto mais importantes para elementos de máquinas-ferramentas de ultraprecisão. As vibrações que ocorrem durante o processo de usinagem, responsáveis por problemas de qualidade nas peças fabricadas, são fortemente influenciadas pelo comportamento dinâmico das forças durante a usinagem, de maneira que o estudo do comportamento das forças na usinagem de ultraprecisão, tanto através da simulação numérica como de métodos experimentais, assume da mesma forma grande importância [73, 80, 88, 147].



**Figura 2.15** - Componentes da força de usinagem no torneamento - DIN 6584

[113, 116, 148]

A determinação das componentes de força foi sempre uma parte importante na pesquisa de operações de usinagem [113]. Na usinagem convencional com os diversos materiais de corte empregados, como aço rápido, metal-duro e cerâmicas, entre outros, é um assunto já extensamente estudado, assim como é também assunto de pesquisa na usinagem dura de precisão com ferramentas de PCBN [121, 148]. Para a usinagem de ultraprecisão de metais não ferrosos também foram, por sua vez, realizadas diversas pesquisas neste campo. Já em 1970 foram realizados por Osenberg e Weinz [149] ensaios para a medição de forças na usinagem de ligas de cobre e alumínio com

ferramentas de diamante monocristalino. Em virtude das dificuldades de medição dos níveis de força extremamente pequenos que normalmente ocorrem neste processo foram empregadas ferramentas com uma geometria especial (comprimento de contato de 4 mm) e utilizado um sistema de medição especialmente desenvolvido para a tarefa [149]. Resultados neste sentido são relatados também por Bex [113], em 1975, e por Sato et al [150], em 1978, na usinagem de ligas de alumínio, empregando sistemas de medição baseados no princípio piezelétrico.

A partir do início dos anos 80 intensificaram-se as pesquisas sobre as forças que ocorrem durante o processo de usinagem com ferramentas de diamante monocristalino. Diversos pesquisadores ocuparam-se deste tema, e trouxeram novos conhecimentos ao processo de corte na microusinagem a partir da medição e análise do comportamento estático e dinâmico das componentes de força que ocorrem durante este processo de fabricação [1, 8, 13, 44, 46, 53, 64, 70, 78, 93, 101, 110, 131, 142, 145, 146, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160]. A grande maioria dos trabalhos realizados, entretanto, dedicou-se ao estudo das forças na usinagem de metais não ferrosos, como as ligas de cobre, alumínio e níquel eletrolítico, sendo que os demais materiais de importância para a fabricação de ultraprecisão, como os materiais plásticos e materiais de comportamento duro e frágil, como os cristais infravermelhos, não foram pesquisados ou apenas o foram superficialmente. Estes materiais, todavia, assumem uma importância cada vez maior dentro do universo da fabricação de ultraprecisão, e merecem um estudo detalhado para tornar possível a compreensão dos fenômenos que regem o mecanismo de formação de cavacos e tornar possível uma otimização e sistematização dos processos de fabricação de elementos de alta qualidade dimensional, de forma e superficial, ao mesmo tempo em que se aumenta a confiabilidade na qualidade obtida e se reduzem os custos.

Para deformar um material durante a usinagem e lograr a remoção de cavacos, a ferramenta empregada deve atuar com uma determinada força sobre a peça usinada. O conhecimento da grandeza e direção da força de usinagem, com suas componentes  $F_c$ ,  $F_f$  e  $F_p$ , é de importância no projeto dos elementos de máquinas-ferramentas, como acionamentos, guias, mancais, sistemas de fixação das ferramentas e dispositivos de fixação das peças, na determinação dos parâmetros de corte para o planejamento dos trabalhos de usinagem, no conhecimento dos fenômenos que ocorrem durante o processo

de corte, no esclarecimento dos mecanismos de desgaste e na estimativa da precisão atingível durante a usinagem sob determinadas condições de corte [116, 121, 161, 162].

A grandeza e direção da força de usinagem é basicamente influenciada por fatores quase-estáticos [153]. As principais grandezas de influência sobre as forças de usinagem são mostradas na **figura 2.16**. O processo de usinagem é, além disto, marcado por componentes de força irregulares e de alta dinâmica, causadas por problemas de precisão na movimentação do fuso, características do material da peça e as vibrações relativas entre peça e ferramenta causadas por estes fatores [148].



**Figura 2.16** - Fatores de influência sobre a força de usinagem [148]

Para a medição de forças na usinagem existem diversos processos possíveis, entre os quais o emprego de elementos piezelétricos tem-se revelado, até o momento, como o mais adequado à maioria das aplicações. Esta escolha baseia-se principalmente nas características que estes sistemas apresentam, como a elevada sensibilidade, alta

freqüência natural, possibilidade de medição de dinâmicas elevadas, histerese baixa, linearidade e facilidade de amplificação, tratamento e análise do sinal gerado [9]. Devido a estas características, também na usinagem de ultraprecisão sistemas de medição de forças baseados no princípio piezelelétrico têm, até o momento, preferência quase absoluta.

Em sistemas que utilizam sensores piezelétricos para a medição de forças é aproveitada a propriedade que certos materiais, como quartzo, turmalina, algumas cerâmicas e outros materiais apresentam de, sob a ação de uma força, gerarem um sinal de carga elétrica proporcional à força aplicada. Quando um elemento piezelétrico é deformado, ele é polarizado de forma que os elétrons livres se deslocam a um dos extremos deste elemento, de maneira que ocorre uma carga elétrica estática em sua superfície. Com um voltímetro de resistência interna teórica infinita é possível medir então a tensão existente entre os dois extremos do cristal, e empregar este sinal de tensão para amplificação em um sinal analógico, proporcional à força que foi aplicada sobre o sensor. Em virtude da inexistência de uma resistência interna não infinita destes materiais, entretanto, ocorre ao longo do tempo uma equalização das cargas entre os extremos do cristal, de forma que a técnica de medição com sistemas piezelétricos não pode ser empregada para processos estáticos [100].

Na busca de uma sistemática para a descrição das forças que ocorrem na usinagem com ferramentas de geometria definida foram desenvolvidos diversos modelos, baseados em diferentes estratégias. Estes modelos podem ser divididos em empíricos e teóricos, bem como uma forma mista destes dois procedimentos. A maioria dos modelos até hoje desenvolvidos para modelar o comportamento das forças na usinagem baseia-se em dados de força obtidos experimentalmente em um processo de usinagem e na formulação de uma sistemática para previsão destas forças para casos gerais. O comportamento das forças em função da variação dos parâmetros é aproximado através de uma função matemática, que pode ser linear, potencial, exponencial ou formas mistas destes tipos básicos [144]. Na usinagem convencional esta metodologia já é empregada há mais de cem anos, e embora existam diversos modelos desenvolvidos ao longo destes anos, pode-se dizer que apenas uns poucos destes conseguiram impor-se. Para o caso de uma função linear do comportamento das forças o modelo proposto por Richter (1964) é

bastante empregado, sendo que o modelo que descreve o comportamento das forças na usinagem mais conhecido até o momento ainda é o de Kienzle (1951), que adota uma função potencial e que foi desenvolvido para processos de torneamento em geral [144]. Ambos modelos tiveram diversos desenvolvimentos posteriores, com o objetivo de aproximá-los ainda mais à realidade. Dentre estes desenvolvimentos posteriores encontram-se a subdivisão em dezenas sugerida por Richter e Tempelhof (1969) para o modelo de Richter. Para o modelo de Kienzle, Victor (1974) também propôs a subdivisão do campo das espessuras de usinagem em dezenas, o que reduziu os desvios na função potencial ocorridos para espessuras de usinagem muito pequenas ou muito grandes [144].

A partir de uma grande quantidade de ensaios de usinagem para o processo de torneamento, foi proposto por Kienzle (1951) o conhecido modelo que descreve o comportamento das forças na usinagem. Este modelo estabelece uma relação não linear entre a força específica de corte e a espessura de usinagem  $h$ , que pode ser representada como uma reta no intervalo de espessuras de usinagem pesquisado ( $100 \mu\text{m} < h < 1 \text{ mm}$ ), conforme mostrado na **figura 2.17** [144]. A partir da inclinação  $m_c$  desta reta e do valor  $k_{c1.1}$ , dependente do material usinado e de diversos outros fatores e que foi definido como a força específica de corte que é necessária para remover um cavaco com a seção transversal  $b \cdot h = 1 \times 1 \text{ mm}^2$ , foi desenvolvida a seguinte equação:

$$\frac{F_c}{b} = k_{c1.1} \cdot h^{(1-m_c)} \quad (2.7)$$

onde  $b = \frac{a_p}{\text{sen } \chi}$  e  $h = f \cdot \text{sen } \chi$ .

Este modelo proposto por Kienzle para as forças na usinagem, que leva em conta apenas os principais fatores de influência sobre as forças (profundidade de corte, avanço e material usinado) e é propositalmente orientado para a prática, pode ser empregado com boa precisão para os diversos processos de usinagem em casos onde a condição  $\rho \ll h$  é mantida [144].



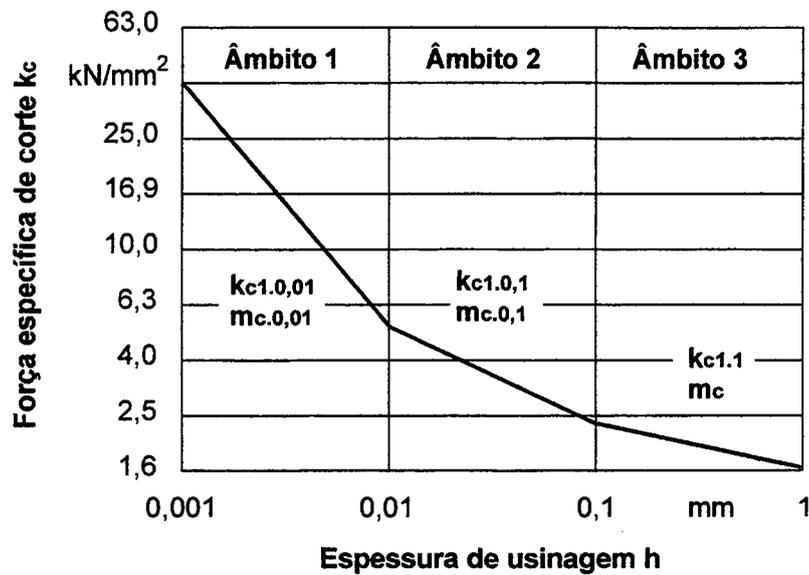


Figura 2.18 - Representação gráfica da força específica de corte segundo Victor [162]

Um desenvolvimento posterior dos modelos de Kienzle e de Victor foi proposto por Koch [121] e Queins [148] para o caso da usinagem dura de precisão. Neste tipo de operação de usinagem as espessuras de usinagem são muito pequenas (na ordem de alguns micrometros), e apenas uma região do raio de quina da ferramenta executa o trabalho de remoção dos cavacos. Deste fato resulta um cavaco com seção transversal em forma de vírgula, análogo ao que ocorre na usinagem de ultraprecisão (figura 2.19).

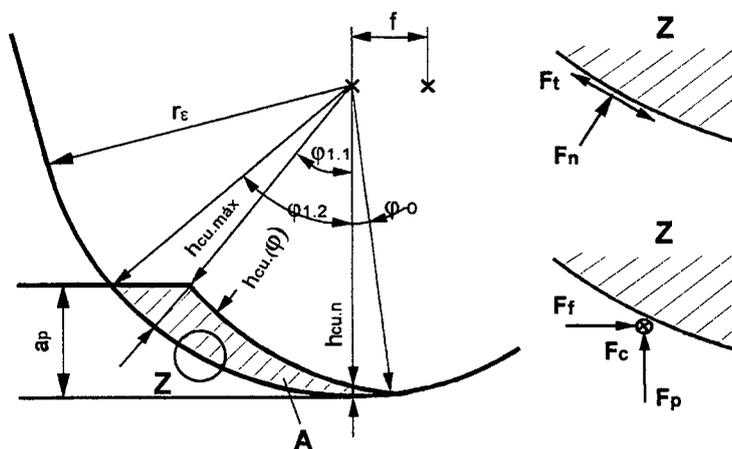


Figura 2.19 - Geometria do cavaco para a usinagem dura de precisão e usinagem de ultraprecisão [121, 148]

Neste sentido, do desenvolvimento da equação de Kienzle para este caso especial onde ocorre a condição  $r_\epsilon \gg h_{cu}$ , o plano de trabalho é o mesmo que o sistema de referência da ferramenta e que os ângulos de saída  $\gamma$  e de inclinação  $\lambda$  mantêm-se em valores pequenos, resulta:

$$F_c = r_\epsilon \cdot b_{cu} \cdot k_c \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi_{1.2}} h_{cu}(\varphi)^{1-mc} d\varphi \quad , \quad (2.8)$$

$$F_f = r_\epsilon \cdot b_{cu} \cdot \left[ k_n \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi_{1.2}} h_{cu}(\varphi)^{1-mn} \cdot \text{sen}\varphi \cdot d\varphi \pm k_t \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi_{1.2}} h_{cu}(\varphi)^{1-mt} \cdot \text{cos}\varphi \cdot d\varphi \right] \quad (2.9)$$

e

$$F_p = r_\epsilon \cdot b_{cu} \cdot \left[ k_n \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi_{1.2}} h_{cu}(\varphi)^{1-mn} \cdot \text{cos}\varphi \cdot d\varphi \pm k_t \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi_{1.2}} h_{cu}(\varphi)^{1-mt} \cdot \text{sen}\varphi \cdot d\varphi \right] \quad (2.10)$$

As componentes tangenciais de força que atuam são causadas pelo ângulo de inclinação da ferramenta. Deste fato resulta que a componente tangencial deve ser subtraída de  $F_p$  e adicionada a  $F_f$ . Caso  $\lambda$  seja igual a zero, o último termo das equações 2.9 e 2.10 deixa de existir. A espessura de usinagem  $h_{cu}$  da equação de Kienzle depende do ângulo  $\varphi$ , sendo que  $h_{cu}(\varphi)$  pode ser representado conforme mostrado a seguir:

$$h_{cu}(\varphi) = f \cdot \text{sen}(\varphi) + r_\epsilon \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{f}{r_\epsilon}\right)^2 \cdot \text{cos}^2 \varphi} \right] \quad , \quad \text{para } \varphi \leq \varphi_{1.1} \quad (2.11)$$

e

$$h_{cu}(\varphi) = r_\epsilon - \frac{r_\epsilon - a_p}{\text{cos}(\varphi)} \quad , \quad \text{para } \varphi > \varphi_{1.1} \quad (2.12)$$

A largura de usinagem  $b_{cu}$  também depende de  $\varphi$ , e pode ser calculada através da fórmula seguinte:

$$b_{cu} = r_\varepsilon \cdot \varphi_{1,2} - \varphi_0 \quad (2.13)$$

Os limites para o ângulo podem ser obtidos com auxílio das seguintes fórmulas:

$$\varphi_0 = -\arcsen\left(\frac{f}{2 \cdot r_\varepsilon}\right), \quad (2.14)$$

$$\varphi_{1,1} = \arctg\left[\sqrt{\left(\frac{r_\varepsilon}{r_\varepsilon - a_p}\right)^2 - 1} - \left(\frac{f}{r_\varepsilon - a_p}\right)\right] \quad (2.15)$$

e

$$\varphi_{1,2} = \arccos\left(1 - \frac{a_p}{r_\varepsilon}\right) \quad (2.16)$$

No processo de usinagem de ultraprecisão o modelamento do comportamento das forças pode ajudar no entendimento da importância relativa de cada um dos parâmetros de processo e levar a um melhoramento dos métodos de geração de superfícies de ultraprecisão, que são cada vez mais necessários para diversos campos de aplicação. A previsão destas forças é um objetivo perseguido há anos, através da proposição de modelos que descrevam satisfatoriamente o comportamento das forças durante o processo. Entretanto, os avanços neste campo não foram até o momento suficientes para esclarecer todos os fenômenos que ocorrem durante a microusinagem [153]. Estes métodos de modelamento devem ser verificados através da comparação direta com dados experimentais e serem capazes de explicar quantitativamente a origem e natureza destas forças, o que não é uma tarefa simples, em função dos problemas em se caracterizar a contento os gumes de ferramenta de diamante e equacionar as variáveis de importância [160]. Devido a isto, diversos pesquisadores continuam a aplicar seus esforços no desenvolvimento de um modelo teórico que ajude a compreender com mais profundidade os fenômenos que ocorrem durante o processo de geração de cavacos na usinagem de ultraprecisão.

Assim como no caso da usinagem convencional, na elaboração de modelos para a previsão das forças na usinagem de ultraprecisão têm sido empregados tanto os métodos teóricos quanto os experimentais. Os modelos teóricos baseiam-se normalmente em propriedades dos materiais usinados (dureza, resistência à tração, coeficiente de atrito, estrutura cristalina, energia de ligação, entre outras), em características geométricas da ferramenta (ângulo de saída, de incidência, raio de quina, raio de gume, etc.), nos parâmetros de usinagem (profundidade de corte, avanço e velocidade de corte) e condições gerais de trabalho para, com auxílio de diversos métodos, como elementos finitos, análise numérica, estudo analítico e da dinâmica molecular, por exemplo, prever o nível e o comportamento das forças durante a usinagem para as diferentes condições de trabalho. Os métodos experimentais, por sua vez, buscam descrever através de funções matemáticas o comportamento das forças através de dados obtidos experimentalmente.

Dentre os modelos que empregam o método analítico para a previsão de forças na usinagem de ultraprecisão encontra-se o proposto por Lo-A-Foe [78]. Neste modelo parte-se do pressuposto que a ação de corte é um processo plástico bidimensional e que ocorrem duas regiões de deformação. Na primeira região a direção do fluxo de cavacos é alterada sem que a espessura do cavaco seja alterada, enquanto que na segunda região a espessura do cavaco aumenta em função do atrito entre ferramenta e material da peça. Além disto, considera-se que a energia gerada seja completamente dissipada nestes dois processos plásticos, que o processo é contínuo e que o material usinado comporta-se de acordo com a equação:

$$\bar{\sigma} = C \cdot \bar{\varepsilon}^n \quad (2.17)$$

A partir destas suposições e com o auxílio de modelos propostos por Merchant, chega-se às equações:

$$F_w = F_v \cdot \sin \gamma + (F_f \cdot \sin \chi + F_p \cdot \cos \chi) \cdot \cos \gamma \quad (2.18)$$

e

$$F_n = F_v \cdot \cos \gamma + (F_f \cdot \sin \chi + F_p \cdot \cos \chi) \cdot \sin \gamma \quad (2.19)$$

sendo:

$$\Delta F_w = A_{VB} \cdot \sigma_b \quad (2.20)$$

e

$$\Delta F_v = \mu \cdot A_{VB} \cdot \sigma_b \quad (2.21)$$

Uma comparação entre os valores teóricos de força e resultados experimentais, obtidos na usinagem de latão e alumínio, mostra uma boa concordância. As diferenças entre os valores calculados e medidos são imputadas ao desgaste da ferramenta.

Um modelo preliminar proposto por Drescher e Dow [145] também relaciona, da mesma forma que as equações 2.20 e 2.21, as características dos materiais analisados com as forças de corte e passivas resultantes. Segundo este modelo, com o valor da dureza do material  $H_0$ , a seção do cavaco indeformado  $A$  e o coeficiente de atrito entre o material da peça e da ferramenta  $\mu$  é possível calcular as componentes de força na usinagem, de acordo com as equações a seguir:

$$F_y = A \cdot H_0 \quad (2.22)$$

e

$$F_z = \mu \cdot A \cdot H_0 \quad (2.23)$$

Para a verificação deste modelo são obtidas experimentalmente as componentes de força de corte e passiva durante o corte e após a desconexão súbita do sistema de avanço da ferramenta. As componentes residuais de força medidas são explicadas pelo comportamento elástico do material da peça na região do gume da ferramenta. A força de usinagem resulta da superposição de componentes de força com mesma direção, e pode ser expressa conforme a equação a seguir:

$$F_{(i)cut} = F_{(i)} - F_{(i)res} \quad , \quad \text{para } i = x, y \quad (2.24)$$

Para o cálculo das forças  $F_{y.cut}$  e  $F_{z.res}$  são utilizadas as equações 2.25 e 2.26 apresentadas a seguir, que se relacionam ao comportamento exponencial da dureza induzida na camada limite durante o processo de usinagem (vide **figura 2.20**).

$$F_{z.cut} = \int_0^{\varphi_{max}} \int_0^{h_{cu}(\varphi)} H(d) d dr_{\epsilon} d\varphi \tag{2.25}$$

e

$$F_{y.res} = w \cdot \int_0^{\varphi_{max}} H[h_{cu}(\varphi)] r_{\epsilon} d\varphi \tag{2.26}$$

onde:  $H_{(d)} = H_0 + k \cdot e^{-\kappa d}$ ,

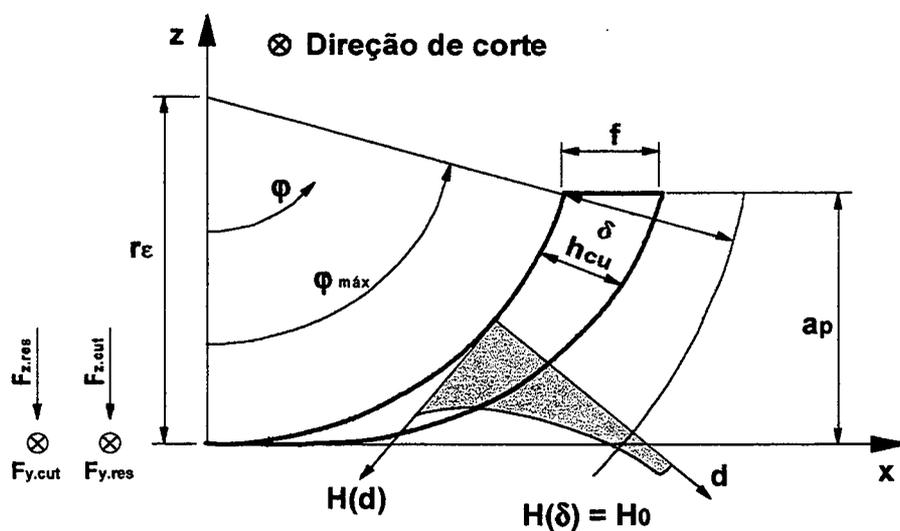
$\varphi_{m\acute{a}x} = \arccos(1 - r_{\epsilon}/a_p)$ ,

$\delta = \rho \cdot e^{(\kappa - 0,5)}$ ,

$\kappa = H_0/\sigma_b$ .

As relações entre  $F_{z.cut}$  e  $F_{y.res}$  são obtidas através de método experimental, e resultam:

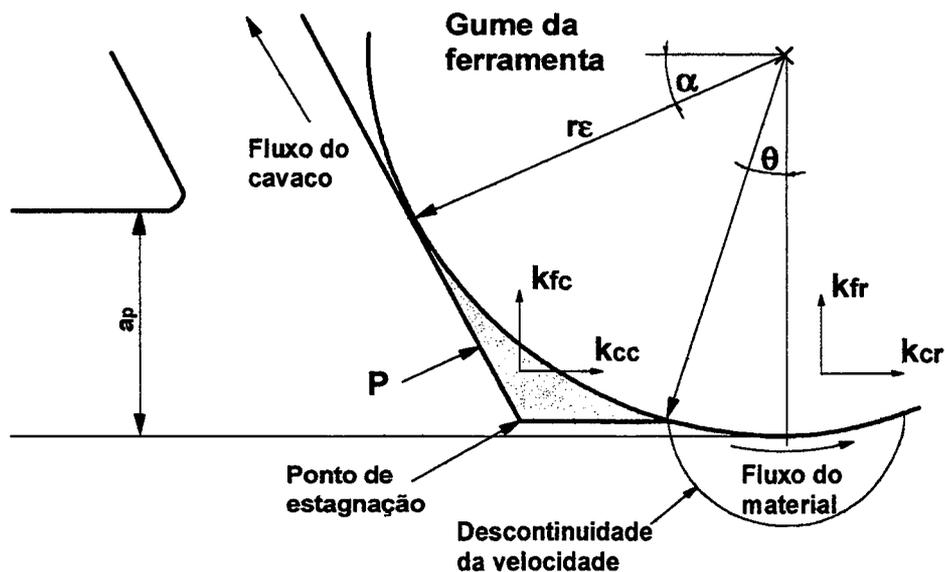
$$F_{z.cut} \approx 1,0 \cdot F_{y.cut} \quad e \quad F_{y.res} \approx 0,1 \cdot F_{z.res}$$



**Figura 2.20** - Componentes de força para o modelo de Drescher e Dow [78, 145]

Um problema existente neste modelo é a determinação do raio de gume  $\rho$  e do comprimento de contato  $w$  na superfície de incidência da ferramenta, os quais têm uma influência decisiva sobre as componentes de força, de forma que os resultados não são sempre satisfatórios [145].

Um método proposto posteriormente por Taminiou et al [157] sugere a existência de uma pequena zona morta estável abaixo do raio de quina da ferramenta (**figura 2.21**). Assume-se que parte do material desliza sobre um pequeno gume postiço e então transversalmente à região plástica ao redor da base da ferramenta, chamada de região de atrito. O resto do material flui ao longo da superfície em frente ao gume postiço e é removido em forma de cavaco. A região anterior e posterior ao gume postiço é chamada de região de corte. O assim chamado de "ponto de estagnação" no topo do gume postiço determina a dimensão na qual a ação de corte não ocorre. Esta dimensão é relacionada ao ângulo do ponto de estagnação  $\theta$ , que é de aproximadamente  $-14^\circ$ , segundo verificado experimentalmente.



**Figura 2.21** - Seção transversal da área de corte [157]

A partir de algumas condições iniciais, chega-se às equações abaixo, que relacionam as forças específicas a propriedades do material usinado e características geométricas da ferramenta e do processo.

$$k_c = k_{cc} + k_{cr} \cdot \frac{r_\varepsilon}{a_p} (1 - \cos \theta) \quad (2.27)$$

e

$$k_f = k_{fc} + k_{fr} \cdot \frac{r}{a_p} (1 - \cos \theta) \quad , \quad (2.28)$$

onde  $k_{cr} = f(\tau, \theta, r_\varepsilon, \alpha)$ ,  $k_{cc} = f(\tau, r_\varepsilon, a_p, \theta, \alpha, P)$ ,  $k_{fc} = f(\tau, r_\varepsilon, a_p, \theta, \alpha, P)$  e  $k_{fr} = f(\tau, \theta)$ .

Esta teoria pode ser aplicada apenas para os casos onde  $a_p \leq r_\varepsilon$ , o que normalmente é o caso na usinagem de ultraprecisão.

Uma sistemática diferente para a previsão das componentes de força é proposta por Lee [42], através de um modelo que descreve a dinâmica da força de usinagem, baseado na teoria da plasticidade de materiais policristalinos de Taylor. Segundo esta teoria, é possível relacionar a tensão normal de tração  $\sigma$  em um policristal e a tensão de tração  $\tau_c$  no plano de deslizamento de um monocristal através do fator de Taylor M, onde:

$$\sigma = M \cdot \tau_c \quad (2.29)$$

Uma comparação entre os resultados obtidos através do modelo de Lee e obtidos experimentalmente mostra diferenças significativas, que são explicadas pela existência de atrito entre a superfície de saída e o cavaco.

A análise do comportamento de forças através do método de elementos finitos tem sido bastante empregada nos últimos anos. Kim e Kim [64] utilizaram este método para elaborar um modelo que leva em conta que a ferramenta não é idealmente afiada, e sim tem um raio de arredondamento no gume. As forças de corte e passiva são definidas em função tanto de características geométricas do processo e da ferramenta quanto de propriedades mecânicas do material usinado. Uma comparação deste modelo, chamado de RECM (Round Edge Cutting Model) com o modelo proposto por Merchant e chamado de SECM (Sharp Edge Cutting Model) mostra que o raio de gume da ferramenta tem uma grande influência sobre os resultados força.

Stevens et al [160] também lançaram mão de um método de elementos finitos para simular o comportamento das forças na usinagem de ultraprecisão, levando em conta as características do material usinado, parâmetros de processo e geometria da ferramenta. A análise foi feita para ferramentas novas e desgastadas, e os resultados comparados com os obtidos experimentalmente na usinagem de uma liga de cobre. Tanto para ferramentas novas quanto para desgastadas, os resultados teóricos concordam em grande parte com os experimentais. Também Carroll [42] apresenta os resultados obtidos através da simulação do processo de usinagem com ferramentas de diamante com auxílio do método de elementos finitos, onde fatores como temperatura, atrito e deformações são levados em conta. Uma análise comparativa entre os resultados obtidos experimentalmente e os obtidos através do emprego do modelo mostra que, embora os valores absolutos divirjam significativamente, o comportamento das forças é semelhante para os dois casos.

Outro dos métodos de simulação do processo de usinagem de ultraprecisão e das forças que ocorrem durante este processo é o da dinâmica molecular. Este método, empregado por Inamura e Takezawa [141], Maekawa e Itoh [7], Belak e Stowers [163] e Ikawa et al [164, 165], entre outros, leva em conta o arranjo e potencial atômico, e baseia-se no fato de que os átomos de um material sempre vibram em torno de sua posição de mínima energia. Através do acompanhamento da vibração de cada átomo durante o processo de corte, com auxílio da equação de movimento de Newton com uma resolução no tempo muito grande, é possível prever o movimento dos átomos. A formulação matemática para estes casos pode ser feita de maneira similar à dos métodos de elementos finitos não lineares, usando a analogia entre o potencial interatômico e a energia de deformação [7]. Na **figura 2.22** é mostrada a representação do processo de formação de cavacos e da dinâmica das forças na nanousinagem obtida através deste método.

A proposição de modelos baseados em resultados obtidos experimentalmente também é encontrada para a descrição de forças na usinagem de ultraprecisão. Em trabalhos apresentados por Brinksmeier et al [46] e Furukawa e Moronuki [142] tem-se alguns exemplos desta metodologia, que busca, através de técnicas de regressão, encontrar e parametrizar a curva que melhor descreve o comportamento das forças durante o processo.

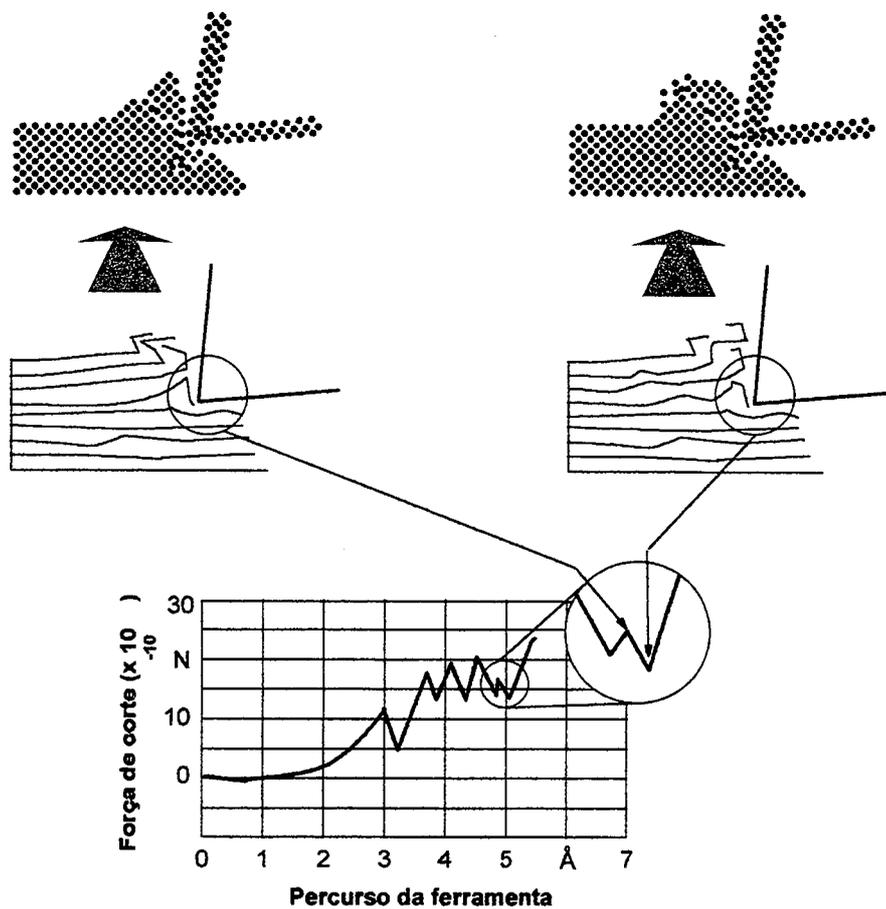


Figura 2.22 - Variação de  $F_c$  em simulação da usinagem de ultraprecisão [141]

### 3. Objetivos do Trabalho

A possibilidade de fabricação de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho através do emprego da tecnologia de usinagem de ultraprecisão com ferramentas de diamante monocristalino abre novas perspectivas para a produção de lentes anesféricas com alta qualidade de forma, superficial e dimensional. Com isto é possível melhorar o rendimento de sistemas ópticos que trabalham no comprimento de onda infravermelho ao mesmo tempo em que podem ser reduzidos os custos de produção destes sistemas. Entretanto, para uma aplicação da tecnologia de usinagem com diamante para a produção destes elementos é necessário um profundo conhecimento dos fenômenos que regem a usinagem dúctil de materiais de comportamento frágil, já que os materiais empregados para elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho são de comportamento assim chamado de "duro e frágil". Novos avanços na eficiência do processo de usinagem e na qualidade final da peça estão limitados por um incompleto conhecimento dos mecanismos básicos que governam este processo de fabricação. Vários trabalhos de pesquisa neste campo já esclareceram muitos destes fenômenos, todavia ainda restam muitos problemas a serem resolvidos antes que se possa considerar esta tecnologia como dominada.

A fabricação de peças com altíssima qualidade superficial, de forma e dimensional, exigidas no campo da óptica, somente pode ter sucesso com o domínio dos fatores de influência sobre o resultado final de trabalho. Em uma área onde as rugosidades típicas encontram-se na ordem de grandeza de poucos nanômetros e os desvios de forma admitidos são normalmente inferiores a 1  $\mu\text{m}$ , é necessário conhecer a influência que fatores como as condições do meio-ambiente, vibrações, parâmetros de usinagem, condições gerais de trabalho, estado da ferramenta, comportamento da máquina-ferramenta e material da peça, entre outros, exercem sobre a qualidade final da peça. Uma otimização do processo de fabricação com base apenas nos dados teóricos não é possível, entretanto, em função da grande quantidade de fatores de influência.

Principalmente na usinagem de ultraprecisão de sulfeto de zinco e Cleartran, assim como germânio, ainda faltam conhecimentos sobre a qualidade possível de se obter e sobre a

influência que os parâmetros de usinagem e as variáveis de processo têm sobre o resultado final de trabalho. Devido aos progressos na obtenção de sulfeto de zinco e Cleartran de alta pureza através da tecnologia CVD (Chemical Vapour Deposition), de maneira que suas características ópticas sejam semelhantes às do selenito de zinco, é de se esperar que tais materiais venham a ter no futuro um emprego cada vez maior em aplicações ligadas ao espectro infravermelho. Isto ocorre porque, embora o selenito de zinco tenha excelentes características ópticas, é tóxico e de manuseio perigoso, característica inexistente no sulfeto de zinco e Cleartran. O germânio, por sua vez, tem sua importância como material infravermelho já longamente reconhecida, e deve também ser estudado mais profundamente. Desta maneira, faz-se necessária uma análise sistemática do comportamento destes materiais para as diferentes condições de trabalho e uma otimização do seu processo de fabricação. Somente assim é possível uma garantia da qualidade e uma aplicação econômica desta tecnologia.

Com o objetivo de verificar o comportamento de cristais infravermelhos durante a microusinagem, é planejada uma pesquisa sistemática da influência do avanço, da profundidade de corte, da geometria da ferramenta e de diversas outras variáveis de processo de importância sobre a qualidade superficial da peça gerada. Para isto, devem ser realizados ensaios de usinagem em sulfeto de zinco, Cleartran e germânio com diamante sob diferentes condições de trabalho e analisada a rugosidade e qualidade óptica do elemento fabricado, comparando-se estes resultados com os já existentes para o germânio. Com base nos resultados obtidos, devem ser determinados os parâmetros mais adequados à produção de elementos ópticos em cada um dos materiais ensaiados e analisada com profundidade a influência que as diversas variáveis de processo têm sobre o resultado final de trabalho.

Devido ao seu nível extremamente baixo, as componentes de força na usinagem de ultraprecisão de materiais infravermelhos praticamente não foram, até o momento, pesquisadas. As forças durante a usinagem permitem, entretanto, aprofundar os conhecimentos sobre os fenômenos que regem o processo de corte. Para que isto seja possível é necessário, entretanto, desenvolver um sistema capaz de medir forças na usinagem em níveis significativamente inferiores a 100 mN, e com auxílio do mesmo, analisar o comportamento das forças sob diferentes condições de trabalho. Neste sentido,

---

deve ser projetado, construído e testado um sistema para medição de forças na usinagem de ultraprecisão destes materiais.

Além do projeto e construção de um sistema para medição de forças na usinagem com diamante de sulfeto de zinco, Cleartran e germânio, deve ser analisada a influência do avanço, da profundidade de corte, da velocidade de corte, do fluido de corte e de outras variáveis do processo sobre o nível e comportamento das forças de corte e passivas, de modo a estabelecer relações entre as mesmas e as diferentes condições de trabalho. Também a relação entre as forças e a qualidade superficial obtida deve ser analisada. Com isto, torna-se possível um maior entendimento dos fenômenos que ocorrem na microusinagem de materiais duros e frágeis, em especial de cristais infravermelhos, e uma otimização do processo de fabricação, com conseqüente aumento na qualidade e redução dos custos de fabricação.

## 4. Sistema de Medição de Forças na Usinagem

### 4.1. Projeto de um Sistema para Medição de Forças Ultrapequenas

O projeto e construção de sistemas de medição de forças para a usinagem de ultraprecisão implica na análise e solução de problemas não triviais. A dificuldade para a execução desta tarefa encontra-se principalmente no fato de que se por um lado é necessária uma grande sensibilidade no sistema para perceber níveis de força muito pequenos, o que significa ter um sistema de rigidez não muito elevada, por outro lado uma rigidez insuficiente do sistema de medição pode levar à ocorrência de vibrações e alterações de posição da ferramenta que, por sua vez, podem resultar em erros nos resultados. Ao mesmo tempo em que se deseja uma elevada sensibilidade em um sistema de medição de força, deseja-se portanto também uma rigidez suficiente, o que leva à necessidade de se estabelecer um compromisso entre estas duas características opostas [149, 166]. No caso da usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis, como é o caso de cristais transmissivos no espectro infravermelho, a medição de forças de usinagem é ainda mais crítica, visto que a maioria destes materiais, além de apresentarem forças de corte e passivas em níveis inferiores às que surgem na usinagem de ultraprecisão de materiais metálicos, apresentam um comportamento frágil durante o processo de remoção dos cavacos, de forma que a dinâmica do sinal de força gerada é mais alta que no caso de materiais de comportamento dúctil e os problemas relacionados a ruídos de sinal, maiores [167].

Diversos trabalhos no campo do projeto de sistemas para a medição de forças na usinagem de ultraprecisão foram realizados nos últimos anos no IPT-Aachen. Já em 1985 foi desenvolvido por Winzer [168] um sistema de posicionamento baseado no princípio piezelétrico, cujos conceitos básicos foram utilizados mais tarde por Pyra [110] para construir uma plataforma com sensores piezelétricos para a medição de forças na usinagem de ultraprecisão de materiais metálicos. Quando se substitui um suporte de ferramenta por um sistema de medição de forças, deve-se evitar que ocorram grandes variações no comportamento estático e dinâmico geral do sistema. Neste sentido os sensores piezelétricos mostram-se bastante adequados, visto terem alta sensibilidade e

freqüência natural também relativamente alta. Além disto, sistemas de medição que utilizam sensores piezelétricos caracterizam-se por grande linearidade e ausência de histerese, são de manuseio relativamente simples e têm grande durabilidade [113, 166, 169]. Com este sistema foram realizados os primeiros ensaios de força em cobre OFHC, sendo possível a verificação da influência dos parâmetros de usinagem sobre o comportamento estático e dinâmico das componentes de força. Este sistema, que tinha uma freqüência natural de aproximadamente 5,4 kHz na direção da força passiva, permitiu a medição de forças até um limite mínimo em torno de 100 mN.

Melhoramentos realizados na plataforma piezelétrica desenvolvida por Pyra [110] foram executados por Spenrath [1], através do emprego de um mini-sensor piezelétrico para três componentes de força ( $F_c$ ,  $F_f$  e  $F_p$ ). Embora com este sistema fosse possível a medição das forças que ocorrem na microusinagem de cobre OFHC para as profundidades de corte e avanço usuais na fabricação de elementos ópticos metálicos, o mesmo não permitiu a verificação das componentes de força que ocorrem na fabricação de ultraprecisão de germânio, visto ser a sensibilidade dos sensores empregados (em torno de 3 pC/N) insuficiente para esta tarefa.

Com base nas experiências de Winzer [168], Pyra [110] e Spenrath [1], foi projetado um novo sistema de medição de forças que permitisse a medição simultânea das três componentes da força de usinagem ( $F_c$ ,  $F_f$  e  $F_p$ ) durante o processo de usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis. Para isto foram empregados sensores piezelétricos de alta sensibilidade (aproximadamente 110 pC/N), do tipo 9205, do fabricante Kistler (vide características no item 9.1). Com os mesmos é teoricamente possível perceber alterações de força na ordem de 0,5 mN, embora a montagem de diversos sensores em uma plataforma faça com que esta sensibilidade seja de uma ordem de grandeza menor, pelos detalhes construtivos da plataforma. Deve-se observar que os sensores empregados apresentam uma freqüência natural em níveis bastante inferiores aos sensores habitualmente empregados para a medição de forças de usinagem, entretanto as vantagens apresentadas compensam esta característica negativa. Estes sensores, em virtude de suas características construtivas, têm uma rigidez relativamente pequena (freqüência natural em torno de 10 kHz), o que torna necessária a adoção de medidas construtivas na plataforma de medição no sentido de proteger a integridade dos

sensores. Desta forma, entretanto, podem ocorrer perdas na sensibilidade do sistema como um todo.

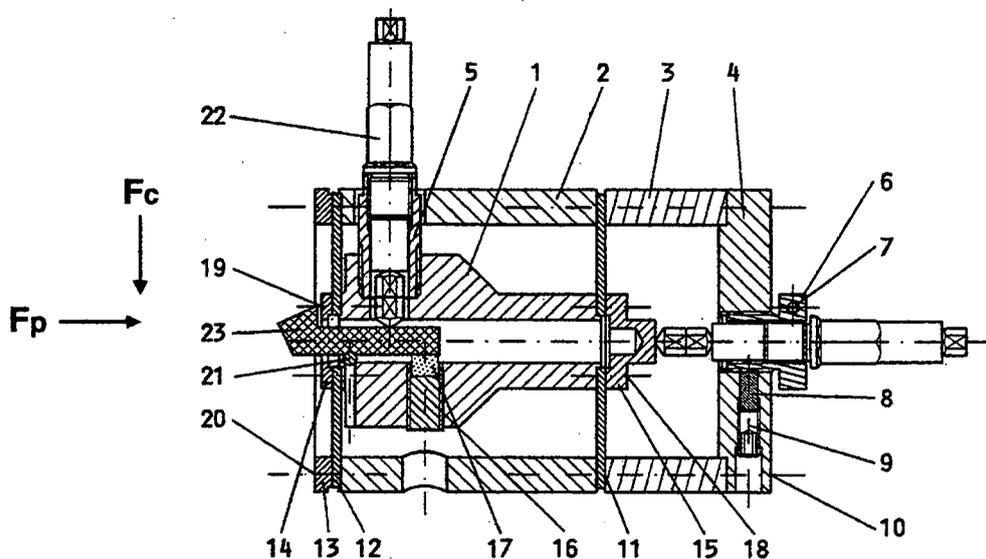
Para o projeto de uma nova plataforma piezelétrica adequada à verificação do comportamento das forças durante a microusinagem de cristais infravermelhos, partem-se entre outras das seguintes condições iniciais:

- O sistema de medição deve ser compatível com os sistemas de fixação da ferramenta na máquina de ultraprecisão Rank Pneumo Precision MSG 325;
- Deve ser possível o emprego de ferramentas de diamante já disponíveis;
- A rigidez do sistema deve ser suficiente para que não sejam introduzidos erros nos resultados de medição ou causados danos aos sensores piezelétricos empregados;
- A plataforma piezelétrica deve permitir o emprego de fluido de corte.

Devido à geometria em forma de apalpadores dos sensores disponíveis, foi necessário o desenvolvimento de um novo conceito de plataforma de medição, com a disposição dos sensores em um sistema cartesiano XYZ, para que cada um deles pudesse medir a componente de força em uma direção. Para as direções X e Y ( $F_f$  e  $F_c$ , respectivamente) foi adotada a solução de mecanismo de alavanca, onde a ferramenta tem dois graus de liberdade e sensibiliza independentemente os sensores para  $F_f$  e  $F_c$ . Para a direção Z foi adotada a solução de molas paralelas, que permite a movimentação precisa da ferramenta apenas na direção de  $F_p$  (**figura 4.1**).

Enquanto na direção Z é possível calcular teoricamente a rigidez do sistema de medição, em função das suas características construtivas (no caso de molas paralelas com 1,5 mm de espessura este valor é de aproximadamente 17 N/pm), nas direções X e Y a rigidez depende de diversas variáveis e pode ser verificada apenas experimentalmente. Em virtude dos sérios problemas apresentados neste sentido pelo sistema de medição já na fase inicial de testes, o projeto foi alterado no sentido de permitir a movimentação da ferramenta em apenas uma plano, e não mais espacialmente. Conseqüentemente, tomou-se possível a medição simultânea de apenas duas componentes de força ( $F_c$  e  $F_p$  ou  $F_f$  e  $F_p$ , conforme o posicionamento da plataforma e da ferramenta em relação à máquina-ferramenta). Como normalmente na análise de forças na usinagem de ultraprecisão a

componente  $F_f$  é desprezada, visto ser a mesma muito menor que  $F_c$  e  $F_p$  e, conseqüentemente, ter uma influência sobre os resultados de trabalho correspondentemente menor, a solução adotada não traz prejuízos maiores à análise do processo com relação às suas forças. Apenas com esta solução, também, torna-se viável o emprego desta plataforma piezelétrica para a medição das forças na usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos.

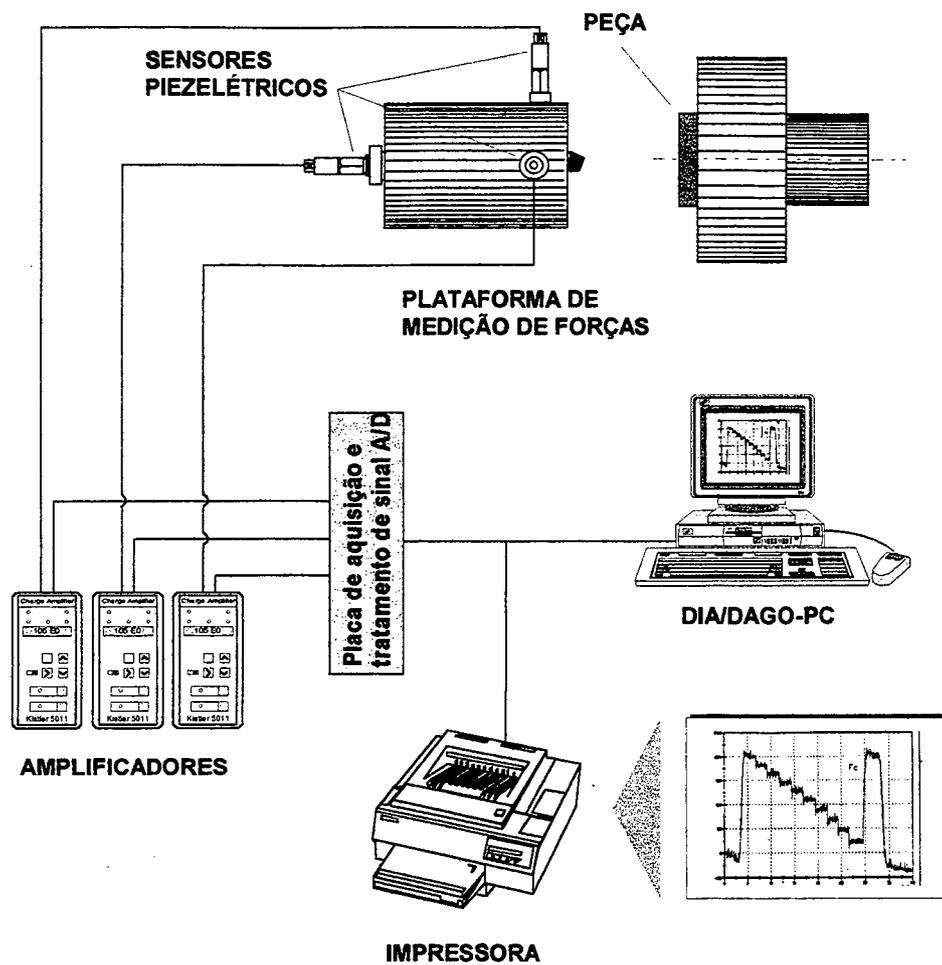


**Figura 4.1** - Plataforma para medição de forças na usinagem de ultraprecisão

#### 4.2. Configuração do Sistema de Medição de Forças

Para a medição de forças foi empregado um sistema composto dos seguintes elementos (vide características no item 9.1), mostrados esquematicamente na **figura 4.2**:

- Plataforma de medição com sensores piezelétricos de alta sensibilidade;
- Amplificadores de sinal;
- Sistema de aquisição e tratamento de sinal A/D;
- Um microcomputador PC;
- Um "software" de medição e análise dos dados.



**Figura 4.2 - Configuração do sistema para medição de forças na ultraprecisão**

Como cristais piezolétricos apresentam um sinal de carga muito pequeno sob a aplicação de forças, para que seja possível medir forças na usinagem é necessário um sistema de amplificação que permita o posterior tratamento e análise deste sinal. Para isto, os sensores piezolétricos devem ser ligados a amplificadores de sinal de alta sensibilidade através de cabos coaxiais com alta resistência de isolamento e com pequena capacitância. Também as conexões entre cabos e elementos do sistema são especialmente fabricadas de modo a evitar perdas de carga e sinais de ruído, que podem falsificar os resultados de medição ou mesmo tornar impraticável a medição de pequenos valores de força [100, 166].

Os amplificadores devem possuir alta resistência interna, na ordem de  $10^{14} \Omega$ , de maneira que as perdas de carga dos sensores piezelétricos são relativamente lentas e de acordo com uma função exponencial. Estes amplificadores transformam a carga elétrica dos sensores piezelétricos em um sinal analógico de tensão no âmbito de  $\pm 10$  V, sendo que a sensibilidade, o campo de medição e, com isto, a resolução dos mesmos pode ser modificada. O emprego de filtros é também possível, o que permite a regulação dos amplificadores para cada diferente tipo de aplicação [100].

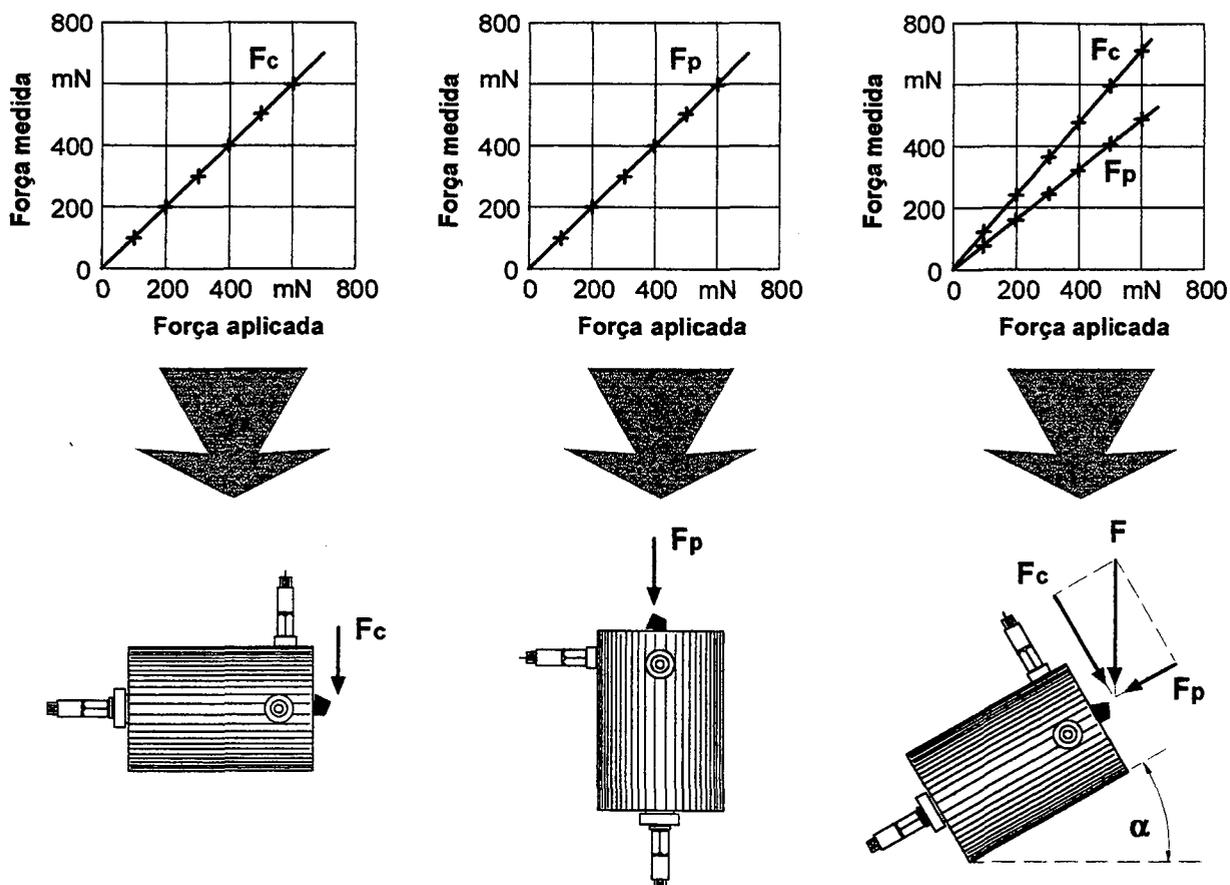
O sistema empregado para aquisição e análise dos sinais é composto de uma placa de aquisição de sinais, um microcomputador e um "software" para análise e cálculo dos resultados. Este sistema como um todo permite uma frequência de aquisição de dados máxima de 2 kHz, em sua configuração básica, que embora não permita uma análise completa da dinâmica do processo de usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis, representa um progresso neste sentido, além de permitir algumas conclusões sobre os fenômenos que ocorrem durante a usinagem deste materiais [385]. Com o "software" é possível, além do armazenamento dos sinais de força em forma digital e ordenada, uma análise dos resultados e ajustes de curvas geradas, bem como sua apresentação sob diversas formas.

### 4.3. Análise das Características do Sistema de Medição

A reprodutibilidade de um sistema de medição, assim como o conhecimento de seu comportamento estático e dinâmico durante o processo de medição, estão entre as exigências mínimas que se devem fazer a um sistema deste tipo. Para chegar a estes conhecimentos é necessário realizar uma calibração do sistema sob diferentes condições e analisar os resultados obtidos, entre outras medidas.

A calibração da plataforma piezelétrica construída foi realizada para as direções Z e Y, correspondendo às direções de  $F_p$  e  $F_c$  durante um processo de torneamento plano. Para isto cada uma das direções foi carregada estaticamente com massas de 20 a 600 mN, de forma a verificar o comportamento do sistema de medição e a influência de uma direção de medição sobre a outra, tanto para o carregamento independente de cada direção como

para o carregamento simultâneo. O carregamento de uma direção apenas ocorre através da aplicação vertical de carga sobre o canal que se quer medir, enquanto que para o carregamento simultâneo de duas direções a aplicação de carga se dá sob um ângulo entre 0 e 90° com relação às direções medidas. Na **figura 4.3** são mostrados exemplos de curvas de calibração para as duas sistemáticas adotadas.



**Figura 4.3** - Sistemática de calibração do sistema de medição de forças

Apesar de a plataforma de medição de forças apresentar boa linearidade e reprodutibilidade, o processo de calibração e emprego da mesma se mostra bastante demorado, visto que a cada nova troca de ferramenta a plataforma piezométrica deve ser ajustada e realizado um novo procedimento de calibração. Isto ocorre devido às características construtivas da plataforma, na qual a ferramenta é parte do sistema, e sua fixação na sua posição final não pode ser realizada sempre sob as mesmas condições. Através da análise de diferentes procedimentos de calibração, pode-se verificar que a

linearidade mantém-se dentro de limites característicos para sistemas de medição baseados no princípio piezelétrico e que a influência de um canal sobre o outro é desprezível. Esta influência que um canal apresenta sobre o outro pode ser neutralizada através de correções posteriores à medição, entretanto este é um procedimento relativamente oneroso e só faz sentido caso os erros introduzidos pela influência de um canal sobre o outro no resultado de medição sejam considerados demasiados.

Em função das perdas de cargas que sensores piezelétricos apresentam ao longo do tempo de medição ("drift") e que são críticas para a medição de valores absolutos de força muito pequenos, foi adotada a sistemática de trabalhar com valores relativos, ou seja, verificar a diferença entre o sinal de força imediatamente anterior à ação da ferramenta e imediatamente posterior à estabilização do processo de corte, conforme mostrado na figura 4.4.

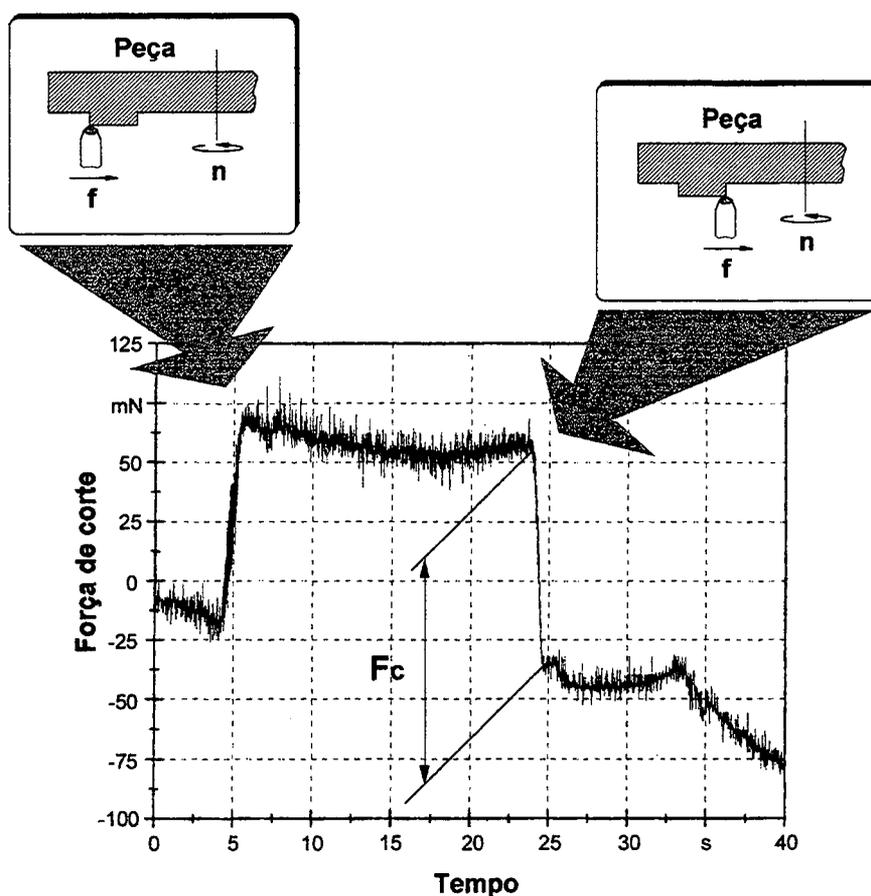
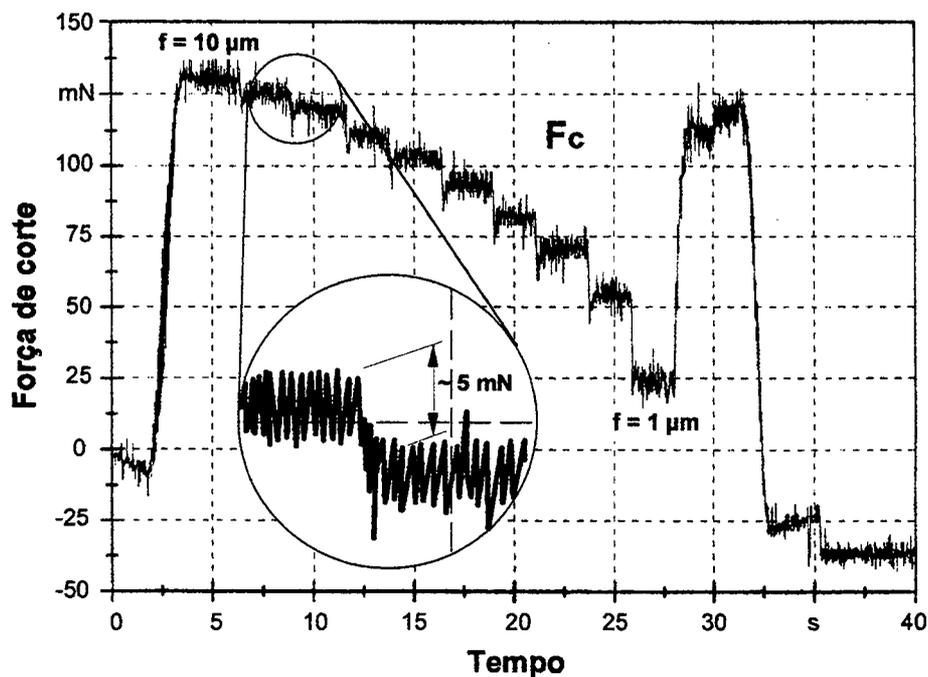


Figura 4.4 - Exemplo de medição relativa de forças

A sensibilidade do sistema de medição pode ser verificada experimentalmente através de testes com variação contínua do avanço ou da profundidade de corte, com uma análise posterior do sinal de força gerado e verificação dos limites onde ainda é possível perceber claramente a variação do sinal. Teoricamente sensores piezelétricos permitem a verificação de variações de sinal infinitamente pequenos [100], entretanto a existência de ruídos durante o processo de medição torna impossível a verificação das forças abaixo de um determinado limite. Testes de usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos com o sistema desenvolvido mostram que é possível verificar com clareza variações de força até um limite inferior a 5 mN. Na **figura 4.5** é mostrado um exemplo desta sensibilidade, onde as variações de avanço de 1  $\mu\text{m}$  são claramente percebidas no sinal de força medido.



**Figura 4.5** - Exemplo da sensibilidade do sistema de medição de forças

A análise dos sinais de força é dificultada pela existência de sinais de ruído durante o processo de usinagem. Como ruído são denominados os desvios dos valores de sinal de um certo valor médio, causados por processos elementares independentes. Estes sinais de ruído, causados por elementos do sistema de medição e pelo próprio processo de usinagem, podem dificultar ou até impossibilitar a análise dos resultados obtidos. A tensão

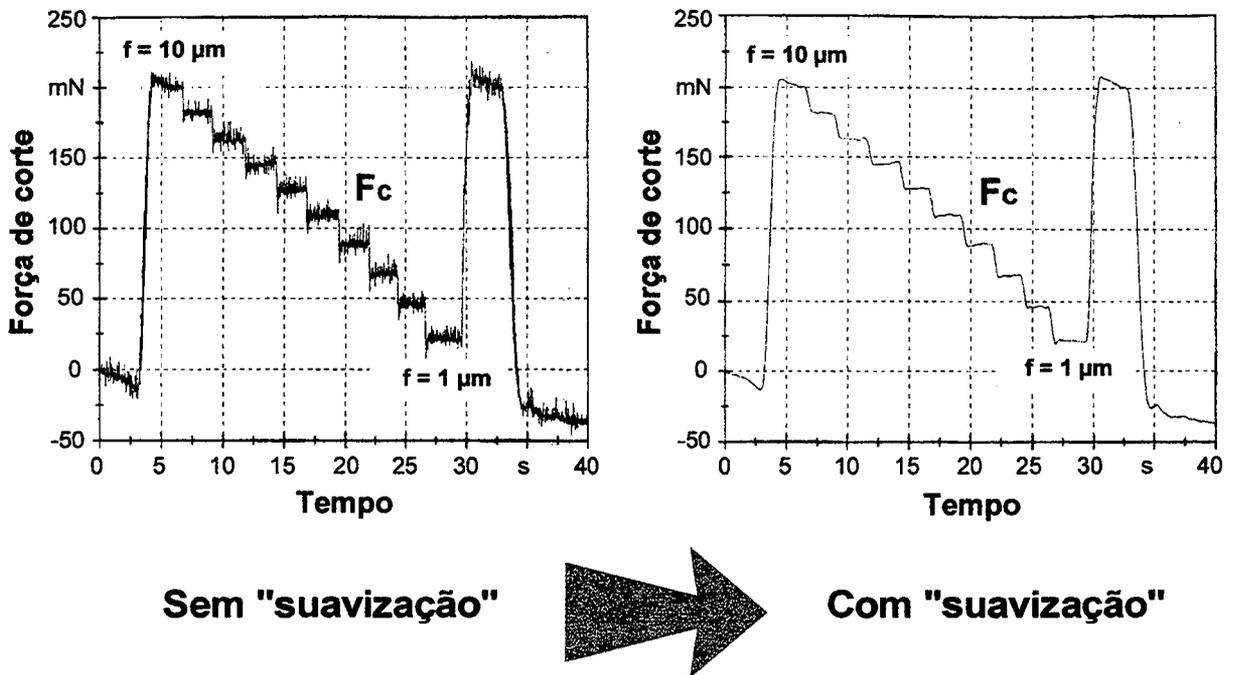
de saída de um sensor piezelétrico contém um certo nível de ruído, assim como cada conexão e elemento eletrônico contribuem para que o sinal de saída tenha perturbações [100].

Durante o procedimento de medição de forças na usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos, o emprego de filtros "passa-baixas" mostra-se útil para uma verificação de sinais de força muito pequenos durante o processo de usinagem. Através do emprego de filtros é possível verificar o nível estático das componentes de forças, sem que os resultados sejam alterados por este procedimento. Entretanto, para que isto ocorra, faz-se necessária a adoção de limites de filtragem, que devem ser ajustados à dinâmica do processo e às características da plataforma piezelétrica (frequência natural, por exemplo). Uma análise dos sinais obtidos para o emprego de diversos procedimentos de filtragem mostra que até um certo limite de frequência os resultados das médias de forças não são afetados pela filtragem, embora as curvas mostrem um comportamento cada vez mais suave (com uma menor dinâmica) para o emprego de filtros de menor frequência. Abaixo deste limite de frequência, que é diferente para os diversos procedimentos de medição e condições de ensaio, é possível perceber, eventualmente, uma queda gradual na média das forças medidas, o que torna aconselhável a análise deste valor de frequência para o uso de filtros "passa-baixas".

O tratamento dos sinais de força com o uso de filtros "passa-baixas" já durante o processo de medição das forças não é sempre necessário, visto que uma "suavização" das curvas pode ser feita através do "software" empregado. Esta "suavização", entretanto, somente pode ser utilizada caso a frequência de aquisição dos sinais de força tenha sido alta. Como frequências de aquisição muito altas implicam em uma quantidade de dados muito grandes, também entre a filtragem já durante a medição ou com o uso de "software" após a medição deve ser estabelecido um compromisso.

Para separar os sinais de força dos sinais de ruído, sempre presentes durante o processo de medição, da dinâmica de formação de cavacos, é possível fazer uso de uma "suavização" integrativa, de maneira que diversos dados individuais subseqüentes são empregados para calcular uma média de valores, sendo os mesmos substituídos por esta média. Quanto mais pontos forem empregados para calcular uma média, mais suaves

serão as curvas obtidas. Na **figura 4.6** pode-se verificar a influência desta "suavização" e da quantidade de pontos empregados para cálculo das médias dos valores.



**Figura 4.6** - Influência da "suavização" sobre o sinal de forças

O processo de formação de cavacos durante a usinagem é, normalmente, um fenômeno de alta dinâmica, sendo que esta dinâmica se reflete sobre os sinais de força. O deslocamento de discordâncias, diferentes orientações cristalinas, a não homogeneidade dos materiais usinados, as diferentes propriedades mecânicas dos mesmos, o uso de fluido de corte, os parâmetros de usinagem e as características das ferramentas estão entre os fatores que fazem com que os sinais de força durante a usinagem tenham variações significativas e de alta frequência [1, 7, 151, 165]. Segundo Komanduri et al [170], ensaios de usinagem convencional realizados em aço mostram que a frequência de variação de forças é muito grande, o que torna a análise dinâmica das mesmas extremamente difícil. Em simulações numéricas do processo de usinagem de ultraprecisão de cobre realizadas por Inamura et al [141], Ikawa et al [165] e por Maekawa et al [7] também torna-se evidente a variação das forças causadas por deslocamentos de discordâncias, conforme já mostrado na **figura 2.22** do item 2.4.

Ensaio de usinagem com diamante realizados por Furukawa et al [142] em diversos materiais tornam evidente a dependência da dinâmica dos sinais de força em relação às diferentes características dos materiais usinados. Materiais duros e frágeis, como o germânio e o fluoreto de cálcio ( $\text{CaF}_2$ ), apresentam uma dinâmica bem maior que materiais de comportamento dúctil, em função do seu mecanismo de formação de cavacos. Devido a esta elevada dinâmica que ocorre durante a usinagem de materiais de comportamento duro e frágil, a análise da mesma exige um sistema de medição com frequência natural muito superior à da plataforma desenvolvida, de forma que com a mesma somente deverão ser analisadas as componentes estáticas de força durante a usinagem dos cristais infravermelhos em questão.

Para uma avaliação comparativa do desempenho do novo sistema de medição de forças na usinagem de ultraprecisão, foram realizados ensaios prévios de medição das componentes da força de usinagem que ocorrem na microusinagem de cobre OFHC, visto ser este um material já profundamente estudado, e sobre o qual podem ser encontrados resultados de pesquisa sobre o comportamento das forças que ocorrem na usinagem com diamante. Na **figura 4.7** é feita uma comparação com os resultados de força obtidos por Spennath [1], onde fica evidente que o sistema desenvolvido permite a obtenção de resultados similares aos obtidos por outros pesquisadores. As pequenas diferenças existentes entre os resultados podem ser creditadas às variações existentes na condição da ferramenta de corte (estado do gume e pequenas diferenças de geometria, por exemplo), particularidades do processo de fabricação (torneamento ou "fly-cutting"), propriedades do material (estrutura cristalina, resistência mecânica, etc.) e demais variáveis de processo, além das diferenças reais existentes entre os dois sistemas de medição.

Em um trabalho cooperativo com a firma Kistler, que colocou à disposição um protótipo de plataforma piezométrica de alta sensibilidade para medição de forças ultrapequenas (vide características no item 9.1), foi possível realizar também ensaios comparativos entre os dois sistemas para a medição de forças na usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos. Através da análise dos resultados, apresentados no capítulo 6, foi possível verificar que o sistema desenvolvido no IPT-Aachen apresenta vantagens e desvantagens em relação ao sistema comercialmente disponível, sendo entretanto similares os

resultados obtidos com os dois diferentes sistemas. Dentre as vantagens que o sistema desenvolvido no IPT-Aachen apresenta podem-se citar a sensibilidade extrema, o que permite a medição de forças muito pequenas, e a possibilidade de se trabalhar com o processo de torneamento, que em função da não interrupção da usinagem permite uma análise mais completa das componentes da força de usinagem. Este sistema apresenta, entretanto, alguns problemas para a calibração, é de operação bastante mais complexa e exige mais experiência do operador. Já a plataforma da firma Kistler é mais estável e de operação mais simples, e permite a medição simultânea de três componentes de força, mas até o momento permite apenas operações de "fly-cutting" e tem um grau de sensibilidade inferior [9].

Geometria da ferramenta: $r_\epsilon = 0,5 \text{ mm}$ $\gamma = 0^\circ$		Spenrath		Schroeter	
		$F_c$ (mN)	$F_p$ (mN)	$F_c$ (mN)	$F_p$ (mN)
$f = 10 \text{ }\mu\text{m}$	$a_p = 5 \text{ }\mu\text{m}$	140	60	120	60
	$a_p = 10 \text{ }\mu\text{m}$	250	70	230	80
	$a_p = 20 \text{ }\mu\text{m}$	420	90	350	120

**Figura 4.7** - Comparação entre resultados de força

## 5. Planejamento Experimental

Os ensaios de usinagem de ultraprecisão com materiais duros e frágeis foram planejados para serem realizados com alguns dos cristais de maior importância e/ou maior potencial para a fabricação de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho. Principalmente no campo da tecnologia LASER existe um grande interesse no desenvolvimento de novos materiais, especialmente para a produção de equipamentos de LASER-CO<sub>2</sub> de alta energia. Até o momento, entretanto, existem relativamente poucos materiais próprios para a fabricação de elementos transmissivos no espectro infravermelho, visto que os materiais com boas características de transmissividade e baixa taxa de absorção são na maioria ou muito macios, ou muito duros e frágeis ou higroscópicos, de modo que as precisões de fabricação não podem ser obtidas ou mantidas. Principalmente o selenito de zinco (ZnSe) e arsenito de gálio (GaAs) são empregados para estas aplicações, entretanto em função dos altos custos e da toxicidade destes materiais, buscam-se alternativas a estes [20, 171, 172, 173].

Um material ideal para a uso em elementos transmissivos no espectro infravermelho é algo inexistente. Um material pode ter, por exemplo, boas qualidades com relação a algumas das características desejáveis e propriedades menos adequadas em relação a outras. Em virtude disto, a escolha do melhor material para uma determinada aplicação é uma tarefa complexa. Devem ser levados em conta não somente os aspectos de custo e campo de transmissão do material, mas também fatores como a resistência mecânica, usinabilidade, índice de refração, higroscopicidade, possibilidade de obterem-se bons acabamentos superficiais e bons revestimentos, entre outros [174].

Os desenvolvimentos na obtenção de novos materiais com alta pureza, como o sulfeto de zinco e o Cleartran, que nada mais é do que uma forma de sulfeto de zinco desidratado, vem ao encontro dos anseios dos fabricantes de elementos ópticos infravermelhos, já que trazem uma alternativa ao uso de materiais empregados até o momento, como o selenito de zinco, por exemplo. Este, apesar de boas características ópticas, tem alto custo e apresenta problemas de toxicidade e conseqüentes perigos durante a fabricação, conforme abordado anteriormente. Estes novos materiais e suas características ainda são,

entretanto, pouco conhecidos, e os problemas de fabricação com o uso da tecnologia de ultraprecisão com ferramenta de geometria definida ainda não estão completamente dominados. Devido a isto, foram escolhidos para as análises de força na usinagem de ultraprecisão e de qualidade superficial o sulfeto de zinco e o Cleartran, bem como o germânio, por ser este um material já de largo emprego na fabricação de lentes na campo infravermelho mas que todavia apresenta problemas de fabricação quando do uso da tecnologia de usinagem com diamante monocristalino.

Os materiais infravermelhos sulfeto de zinco, Cleartran e germânio caracterizam-se por uma resistência mecânica relativamente boa, necessária para elementos ópticos que trabalham sob condições difíceis, e por possuírem uma estrutura cristalina cúbica com granulometria fina. A dureza dos mesmos é bastante alta, principalmente em comparação com o selenito de zinco, sendo que os materiais previstos para os ensaios de usinagem apresentam também boa resistência química, não são higroscópicos e nem tóxicos [171, 172, 173, 175, 176, 177, 178]. O campo de transmissão dos mesmos não é tão amplo como o do seienito de zinco, entretanto outras características positivas, como a possibilidade de trabalhar sob condições extremas de calor, chuva e poeira, entre outras, compensam esta deficiência. O sulfeto de zinco apresenta também alta dispersão e, para comprimentos de onda inferiores a 11  $\mu\text{m}$ , uma alta absorção, o que certamente justifica seu uso limitado até o momento. Neste sentido o Cleartran mostra-se bastante superior. Já o germânio pode ser considerado o material mais popular dentre os cristais infravermelhos, devido às suas propriedades ópticas e físicas [27, 41].

Para os ensaios foram escolhidos materiais policristalinos, visto que os mesmos apresentam custos de aquisição sensivelmente inferiores aos dos materiais monocristalinos, sendo portanto economicamente mais viáveis, embora os problemas de fabricação de materiais duros e frágeis policristalinos sejam freqüentemente mais complexos que dos materiais monocristalinos. Na **figura 5.1** podem ser vistas algumas das principais características mecânicas, físicas e ópticas dos materiais analisados neste trabalho, bem como as do seienito de zinco, para efeitos de comparação.

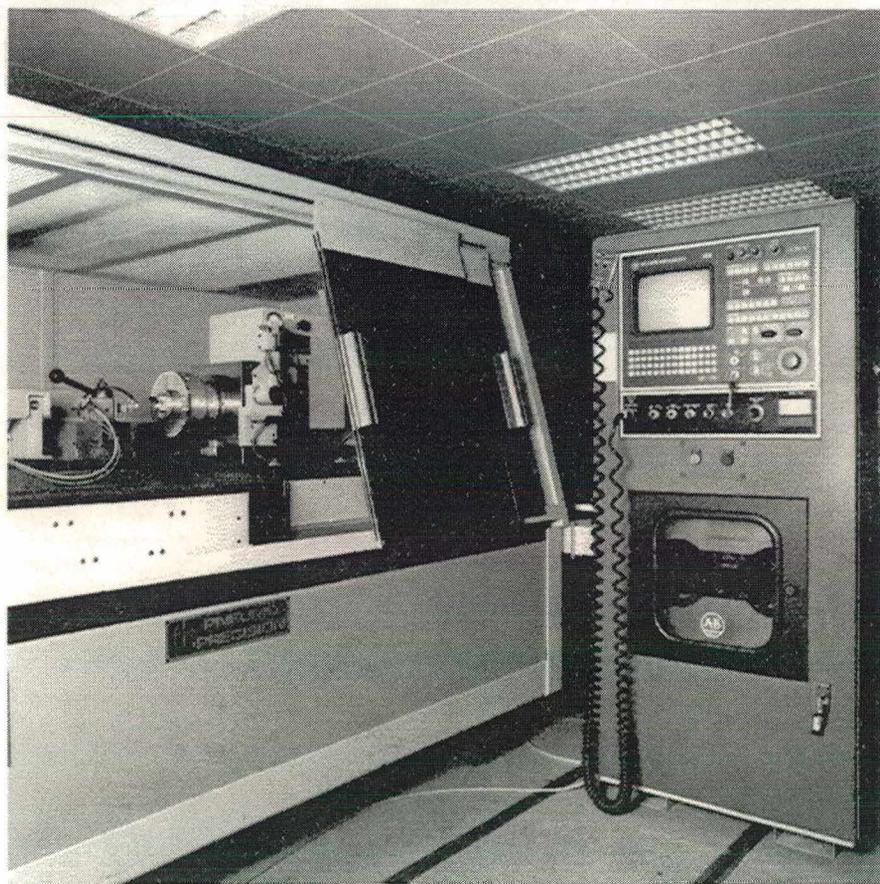
Propriedades dos materiais	Ge	ZnS	Cleartran	ZnSe
Campo de transmissão [ $\mu\text{m}$ ]	2,06 - 13,02	1,0 - 14	0,37 - 14	0,5 - 22
Transmissão máxima $\tau$ [%]	46	67	67	69
Índice de refração $n$ (para 1,06 $\mu\text{m}$ /10,6 $\mu\text{m}$ )	- / 4,005	2,292 / 2,192	2,272 / 2,190	2,489 / 2,403
Coefficiente de absorção $\alpha$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	- / 0,027	0,02 / 0,2	0,0006 / 0,2	0,005 / 0,0005
$\Delta n/\Delta T$ [ $\text{K}^{-1}$ ] (@ 273 K)	$40,8 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$
Coefficiente de transmissão de calor $\lambda$ [ $\text{J}/\text{K.m.s}$ ] (@ 273 K)	59	16,7	27,2	18
Capacidade térmica específica $c$ [ $\text{J}/\text{g.K}$ ]	0,310	0,469	0,527	0,356
Coefficiente de dilatação térmica $\alpha$ [ $\text{K}^{-1}$ ]	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$7,6 \cdot 10^{-6}$
Estrutura	cristalina	cristalina	cristalina	cristalina
Dureza [Knoop]	692	250	160	120
Módulo de elasticidade $E$ [ $10^3 \text{ N}/\text{mm}^2$ ]	100	74,5	74,5	67,2
Resistência à tração [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	93	103	60	55
Coefficiente de Poisson	0,27	0,29	0,28	0,28
Densidade $\rho$ [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	5,32	4,09	4,09	5,27
Higroscópico?	Não	Não	Não	Não
Tóxico?	Não	Não	Não	Sim

**Figura 5.1** - Características físicas, mecânicas e ópticas de cristais infravermelhos  
[20, 40, 171, 179]

Como ferramentas para os ensaios de usinagem dos cristais infravermelhos foram escolhidas ferramentas de diamante monocristalino do fabricante Winter, com geometrias variadas. Com o emprego de ferramentas de um só fabricante evitam-se em parte os problemas de dispersão dos resultados de ensaios devido a variações de qualidade das ferramentas entre diferentes fabricantes, já que os resultados de trabalho na usinagem de ultraprecisão com diamante são fortemente dependentes do estado da ferramenta empregada e grandemente influenciados por pequenas variações na qualidade do gume. Antes de cada bateria de ensaios analisaram-se as ferramentas com auxílio de microscopia óptica, na busca de sinais de desgaste que pudessem trazer influências negativas à análise dos resultados. A não ser em casos específicos onde se procurou verificar a influência do desgaste sobre o resultado de trabalho, as ferramentas utilizadas nos ensaios deste trabalho foram novas ou em estado de novas. Alterações visíveis por

microscopia óptica no estado do gume implicaram em substituição da ferramenta utilizada nos ensaios por outra com mesmas características geométricas, porém nova.

A máquina-ferramenta utilizada para os ensaios foi uma máquina de ultraprecisão MSG 325 (**figura 5.2**), do fabricante Rank Pneumo Precision, que permite trabalhos tanto de torneamento quanto de fresamento ("fly-cutting") com elevadíssima precisão superficial, de forma e dimensional. Isto é possível em função de suas características construtivas da mesma, quais sejam, mancais e guias aerostáticos, comando numérico em dois eixos com resolução de 10 nm e controle da posição com um sistema interferométrico LASER, entre outras. Através da adoção de diversas soluções construtivas e de controle, é possível também isolar a máquina das influências nocivas do meio-ambiente, como vibrações, variações de temperatura e umidade (vide descrição da máquina-ferramenta utilizada nos ensaios no item 9.1).



**Figura 5.2** - Máquina de ultraprecisão Rank Pneumo Precision MSG 325

Em virtude da grande influência que os elementos de fixação de peças exercem sobre o resultado final em operações de usinagem de ultraprecisão, foram projetados e construídos sistemas para a fixação dos corpos de prova por vácuo tanto para as operações de torneamento quanto de "fly-cutting". Os corpos de prova foram fornecidos pelos fabricantes em diâmetros de 50 mm e espessura de 6 mm (sulfeto de zinco e Cleartran) e 25 mm de diâmetro e 5 mm de espessura (germânio). Em casos específicos onde não foi possível a fixação das peças por vácuo, estas foram fixadas com o uso de uma resina própria para esta tarefa.

As grandezas de influência sistematicamente analisadas foram o avanço por rotação ( $f$ ), a profundidade de corte ( $a_p$ ) e a velocidade de corte ( $v_c$ ), bem como algumas das características geométricas de importância da ferramenta, como o raio de quina ( $r_e$ ) e o ângulo de saída ( $\gamma$ ), tanto para a análise de qualidade superficial quanto das forças na usinagem dos materiais infravermelhos em questão. Na análise de forças também foram realizados ensaios com variação do fluido de corte, embora a maior parte dos ensaios tenha sido realizada com aplicação do fluido de corte Clairsol 310 sob forma de névoa, visto terem pesquisas prévias demonstrado que superfícies de melhor qualidade podem ser obtidas quando da aplicação deste fluido de corte. O Clairsol 310 trata-se de uma mistura de hidrocarbonetos que tem como característica uma baixa reatividade química e um preço relativamente modesto, em comparação com outros fluidos de corte empregados em operações de usinagem de ultraprecisão, e permite a obtenção de superfícies de excelente qualidade em grande parte dos materiais usináveis com ferramentas de diamante [1, 20, 180]. Através do uso de fluido de corte é possível reduzir significativamente o nível estático e dinâmico das forças na usinagem, já que o atrito entre peça e ferramenta é reduzido, assim como facilita-se a saída de cavacos. Desta forma tem-se, normalmente, um incremento na qualidade da peça produzida quando este fluido de corte é utilizado [1, 77].

Para evitar variações na influência do trabalho de pré-usinagem sobre os resultados finais, os corpos de prova foram todos preparados através do mesmo procedimento. Para isto todos os corpos de prova foram pré-usinados com parâmetros de usinagem idênticos, escolhidos de forma a evitar ao máximo danos na camada-limite do material. Como medida preventiva para reconhecer um possível desgaste da ferramenta de corte, a

superfície gerada na pré-usinagem foi analisada em intervalos periódicos, na busca de possíveis alterações na sua qualidade. Também para os ensaios de força foram realizados ensaios periódicos com condições padronizadas, visto que principalmente através de alterações nas forças passivas é possível reconhecer desgaste na ferramenta de corte.

Para a análise da influência das variáveis de processo sobre a qualidade superficial, neste trabalho avaliada através dos valores de rugosidade e pela presença ou não de "pittings", os ensaios de usinagem onde foi objetivada uma velocidade de corte constante foram realizados por "fly-cutting". Desta forma a velocidade de corte é determinada apenas pela rotação da árvore da máquina-ferramenta, e não pelas variações no diâmetro da peça usinada. Em ensaios onde foi analisada a influência da variação da velocidade de corte sobre o resultado de trabalho foram realizados ensaios tanto de "fly-cutting" como de torneamento, sendo estudada também a importância da variação do nível de vibrações do sistema ferramenta-máquina-ferramenta sobre a qualidade superficial, que ocorre para as alterações na rotação do fuso da máquina-ferramenta, quando no "fly-cutting" é objetivada uma variação da velocidade de corte. Isto não ocorre em ensaios de torneamento plano, já que as alterações de velocidade ocorrem devido a uma variação no diâmetro da peça, mantendo-se a rotação constante. Desta forma evitam-se as conseqüências que variações de rotação do fuso e conseqüente estado de balanceamento dinâmico possam ter sobre os resultados obtidos. Com o processo de torneamento, entretanto, não é possível uma gama de variações de velocidade de corte tão extensa como no "fly-cutting".

Na análise de forças na usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos foi empregado o processo de torneamento para a maioria dos ensaios realizados, visto ensaios prévios terem mostrado que a velocidade de corte não tem influência significativa sobre as componentes de força. Além disto, o sistema para medição de forças ultrapequenas projetado e construído (vide capítulo 4) é adequado para a verificação das forças de usinagem durante o processo de torneamento. De fato, a análise dos sinais de força de usinagem no torneamento é mais completa, por serem os sinais contínuos, já que a ferramenta encontra-se permanentemente em contato com a peça usinada. Isto não ocorre no processo de "fly-cutting", onde o corte é interrompido e os sinais de força conseqüentemente também. Para uma análise comparativa, entretanto, também foram realizados ensaios de força para o processo de "fly-cutting" com um protótipo de

plataforma piezométrica de alta sensibilidade do fabricante Kistler. As características dos dois sistemas de medição de força empregados podem ser vistas no item 9.1.

A rugosidade dos materiais ensaiados, na forma dos parâmetros  $R_a$  e P-V, foi verificada com auxílio de um microscópio interferométrico Wyko TOPO-3D. Com este equipamento, que utiliza o princípio de franjas de interferência, é possível medir rugosidades de superfícies ópticas extremamente bem acabadas. Também foi utilizado um microscópio óptico Olympus, com aumento máximo de 1000x, para uma avaliação qualitativa do estado da superfície quanto à existência ou não de trincas e falhas (vide características dos equipamentos no item 9.1). Para as análises de qualidade superficial foi realizada também uma extensa análise estatística dos resultados obtidos, de forma a garantir a confiabilidade das informações fornecidas pelos sistemas de medição. Também para os resultados de força foi feita uma análise estatística, mostrada juntamente com a dos resultados de qualidade superficial no item 9.2.

Na **figura 5.3** a seguir é mostrado um resumo das condições de usinagem empregadas durante os ensaios analisados neste trabalho, tanto para a análise dos resultados de qualidade superficial quanto para os resultados de força na usinagem de ultraprecisão dos cristais infravermelhos sulfeto de zinco, Cleartran e germânio.

Variável de Trabalho	Qualidade Superficial	Forças na Usinagem
Avanço $f$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,5; 1; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 5; 10	0,8; 1; 1,7; 2,5; 4,2; 8,3; 10
Profundidade de corte $a_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,5; 1; 1,5; 2; 3; 5; 7,5; 10; 20	5; 10; 20
Velocidade de corte $v_c$ [m/min]	50 ... 800	25 ... 145
Raio de quina $r_e$ [mm]	0,5; 1,5; 5	0,5; 1,5; 5
Ângulo de saída $\gamma$ [graus]	0; -15; -25	0; -15; -25
Fluido de corte	com	com/sem

**Figura 5.3** - Condições de ensaios para análise da qualidade superficial e das forças

## 6. Análise dos Resultados

### 6.1. Influências sobre a Qualidade Superficial

Em cada um dos gráficos de rugosidade mostrados a seguir, os pontos que definem a curva representam a média de dez medições de rugosidade em diferentes pontos do corpo de prova, sendo também indicado nos gráficos o desvio-padrão de cada média. Como o sistema interferométrico de medição da rugosidade já apresenta como resultado de medição a média de quatro medições individuais, cada ponto dos gráficos de rugosidade representa na verdade a média de quarenta resultados de medição da rugosidade. Como em praticamente todos os pontos medidos o desvio-padrão mantém-se na ordem de grandeza da repetibilidade teórica do sistema de medição ( $\approx 0,5 \text{ nm } R_a$ ), e como foi realizada uma extensa análise estatística dos resultados obtidos (vide item 9.2), assegura-se assim a confiabilidade dos resultados de rugosidade obtidos.

#### 6.1.1. Avanço

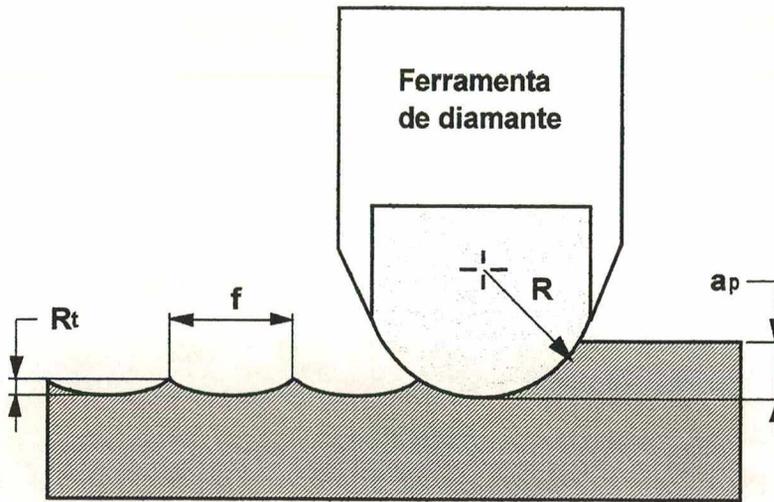
Na usinagem com ferramentas de geometria definida a rugosidade de uma superfície é determinada, no caso ideal, pela forma geométrica da ferramenta e pelo avanço [116]. Neste caso, a superfície gerada tem a forma de um perfil com ranhuras periódicas, que na usinagem com ferramentas que possuem um raio de quina definido resulta em um perfil em forma de arco de círculo (**figura 6.1**) [20, 77]. Teoricamente, portanto, é possível calcular a profundidade desta ranhura, que nada mais é do que a rugosidade  $R_{t,\text{teór}}$ , ou a rugosidade  $R_{a,\text{teór}}$ , através das equações 6.1 e 6.2 seguintes [20]:

$$R_{t,\text{teór}} = \frac{f^2}{8 \cdot r_e} \quad (6.1)$$

e

$$R_{a,\text{teór}} = 0,2566 \cdot R_{t,\text{teór}} \quad (6.2)$$

sendo estas equações válidas quando  $f < 2 \cdot r_\epsilon \cdot \text{sen} \left( \frac{180^\circ - \epsilon}{2} \right)$ .



**Figura 6.1** - Perfil de rugosidade ideal em função do avanço e do raio de quina da ferramenta [20]

Na prática, entretanto, não é possível calcular a rugosidade real de uma superfície microusinada, e sim é necessário medi-la. Na usinagem de materiais dúcteis com ferramentas de diamante, como o cobre OFHC, as rugosidades teóricas apenas coincidem com as rugosidades reais para avanços acima de aproximadamente 25  $\mu\text{m}$ , dependentemente do raio de ferramenta empregado, já que neste âmbito a rugosidade cinemática domina sobre a rugosidade determinada por propriedades do material usinado [20]. Avanços desta grandeza, entretanto, são muito superiores aos usualmente empregados para a geração de superfícies ópticas. Para valores usuais de avanço na usinagem de ultraprecisão as influências da máquina-ferramenta, do material da peça e da própria ferramenta são dominantes sobre o avanço, de modo que a qualidade superficial de uma superfície não pode ser melhorada simplesmente pela redução deste parâmetro [1].

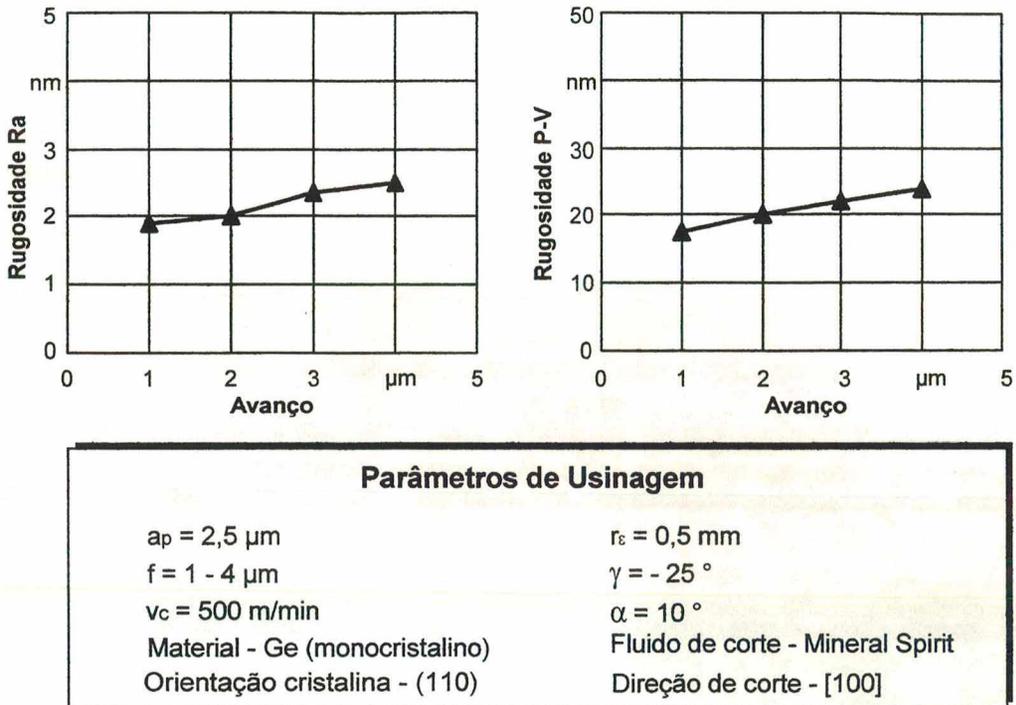
Para materiais dúcteis, como por exemplo os metais não ferrosos e os plásticos, a discrepância entre os valores de rugosidade teórica e real existente para pequenos avanços pode ser fundamentada na teoria de Bramertz, explanada anteriormente no item

2.2, segundo a qual abaixo de um determinado valor de avanço não é mais possível gerar um cavaco com forma definida. Este valor de avanço depende das propriedades do material usinado, do raio de gume da ferramenta e do seu estado de desgaste, entre outras características, o que tem influências negativas sobre a qualidade superficial. Na usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis, entretanto, este fato não ocorre obrigatoriamente, visto que este tipo de material, entre os quais encontram-se os cristais infravermelhos, pode ser usinado ductilmente apenas sob condições de pressão de compressão elevadas, o que é favorecido pelas pequenas espessuras de usinagem existentes para avanços muito pequenos e por um certo arredondamento do raio de gume da ferramenta [20].

Para a verificação da influência do avanço sobre a qualidade superficial de superfícies geradas através da usinagem com ferramentas de diamante monocristalino, é usual a realização de ensaios sistemáticos para diferentes valores de avanço, mantendo-se as demais grandezas de trabalho constantes, medindo-se posteriormente a rugosidade e analisando-se os danos superficiais porventura existentes. Na usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos, entretanto, existem até o momento relativamente poucos resultados deste tipo de ensaios sistemáticos e sua posterior análise. Dos resultados existentes todavia já é sabido que, na usinagem de ultraprecisão da maioria dos materiais de comportamento duro e frágil analisados, para avanços superiores a  $5\ \mu\text{m}$  dificilmente é possível obter superfícies com qualidade óptica [77, 102, 138]. Avanços maiores que estes são, entretanto, empregados para operações de desbaste, de modo que uma análise da influência do avanço sobre a qualidade superficial para valores de avanço superiores pode trazer importantes informações sobre a profundidade de danos existente para grandes avanços e se estas trincas podem ser completamente removidas da superfície pela operação de acabamento [20].

Na usinagem de germânio monocristalino, Burghardt [77] verificou que, de uma forma geral, para avanços superiores a  $3\ \mu\text{m}$  tanto as rugosidades  $R_a$  e P-V quanto os danos superficiais do tipo "pittings" têm aumentos súbitos, de tal forma que já não é mais possível obter superfícies com qualidade óptica. Esta constatação é válida para todas as direções cristalográficas usinadas. Para avanços inferiores a  $3\ \mu\text{m}$  ocorre um decréscimo nos valores de rugosidade, cuja progressão depende da direção cristalográfica usinada, até

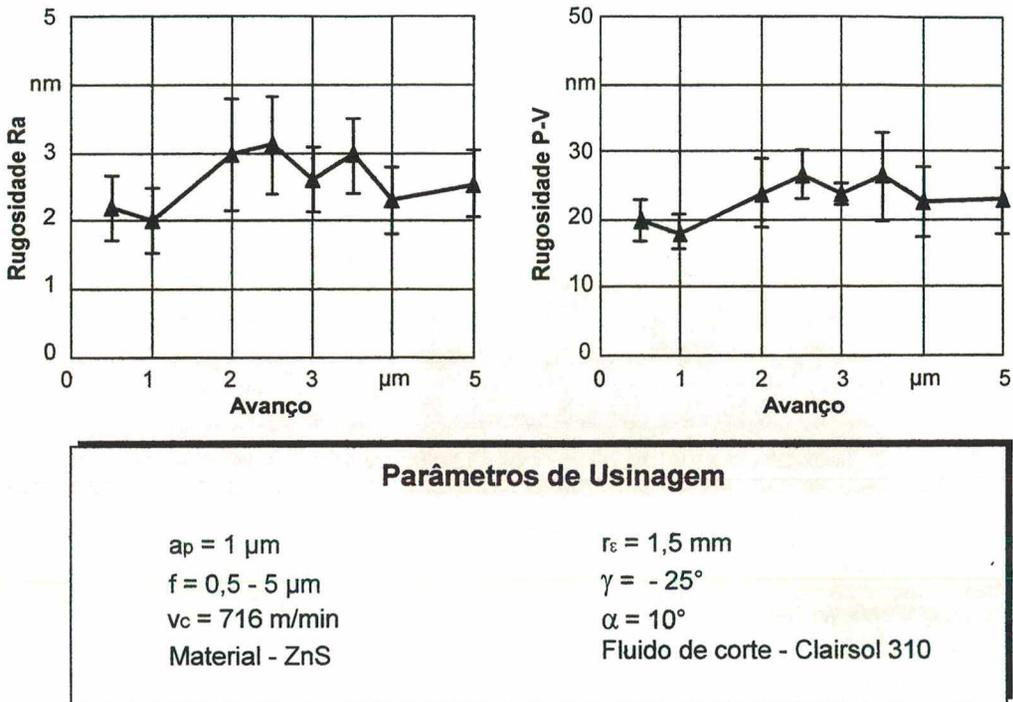
que os valores de rugosidade tornam-se praticamente idênticos e independentes da orientação cristalina, quando os avanços assumem valores em torno de  $1\ \mu\text{m}$ . Neste limite as rugosidades  $R_a$  tem valores de aproximadamente  $2\ \text{nm}$ , enquanto que as rugosidades P-V situam-se em torno dos  $20\ \text{nm}$  (figura 6.2).



**Figura 6.2** - Influência do avanço sobre a rugosidade de germânio [77]

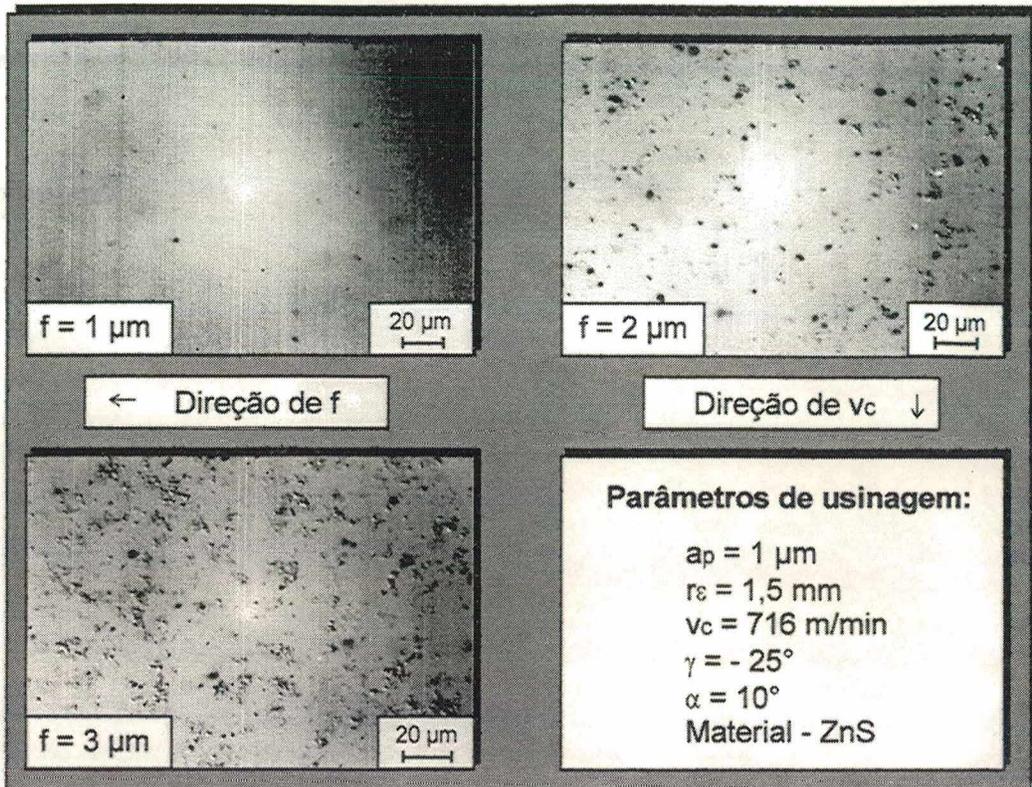
Na usinagem de ZnS e Cleartran com ferramenta de diamante é possível verificar que para avanços inferiores a  $5\ \mu\text{m}$  as rugosidades são pouco afetadas por variações do avanço, sendo este fato perceptível apenas quando esta variável assume valores superiores a este limite. Deve-se observar que as diferenças entre o comportamento da rugosidade destes dois materiais com as variações de avanço, em relação aos obtidos na usinagem de germânio, podem estar relacionados, além das diferenças nas propriedades entre estes materiais, ao diferente raio de quina da ferramenta empregada durante os ensaios. No caso do ZnS, os valores da rugosidade  $R_a$  não sofrem alterações significativas no intervalo entre  $1$  e  $5\ \mu\text{m}$ , sendo entretanto perceptível um leve aumento da rugosidade para avanços entre  $2$  e  $3,5\ \mu\text{m}$ . Este aumento pode ser causado, entre outros fatores, pela modulação de vibrações de baixa frequência que ocorrem na superfície gerada ( $\lambda_s \approx 20 -$

35  $\mu\text{m}$ ,  $f \approx 0,5 - 2 \text{ Hz}$ ,  $\hat{A}_s \approx 10 - 15 \text{ nm}$ ). Um comportamento análogo a este pode ser verificado nos valores da rugosidade P-V, que também sofrem pouca variação no intervalo de 1 a 5  $\mu\text{m}$ , com uma tendência de um leve crescimento dos valores em um âmbito intermediário (**figura 6.3**).



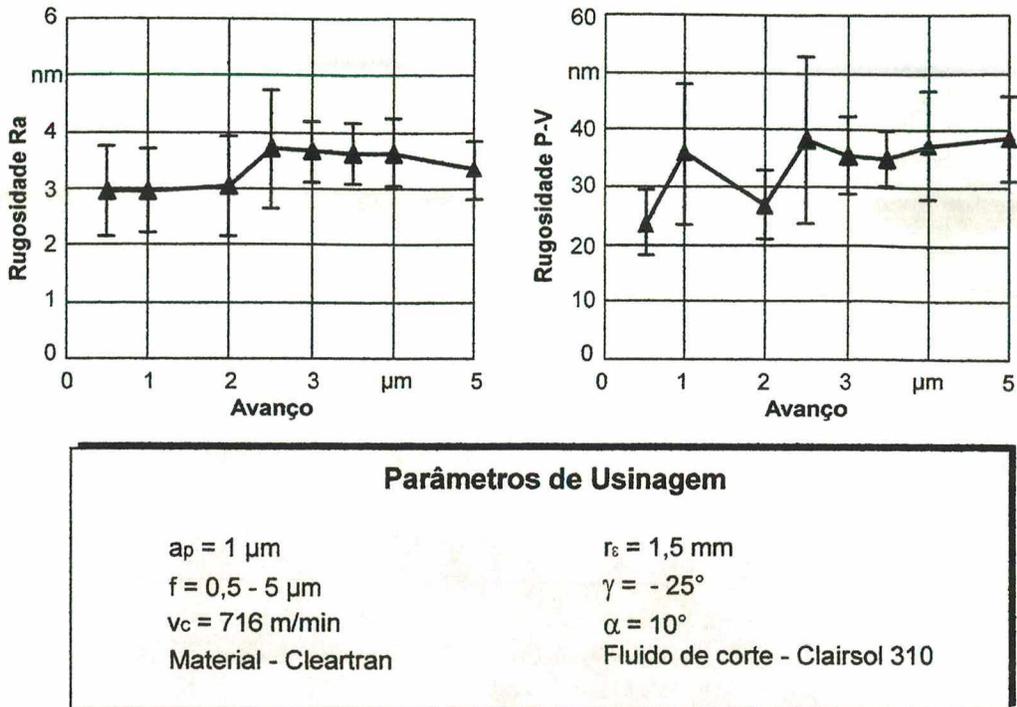
**Figura 6.3** - Influência do avanço sobre a rugosidade de ZnS

Embora com base nos valores de rugosidade a qualidade superficial aparentemente sofra apenas leves alterações com as variações de avanço abaixo de um limite de 5  $\mu\text{m}$ , através de uma análise dos danos superficiais é possível verificar que, enquanto para avanços em torno de 1  $\mu\text{m}$  praticamente não são verificados "pittings", à medida que os avanços crescem aumenta a quantidade destes danos superficiais (**figura 6.4**). Esta aparente discrepância entre os resultados obtidos através da medição de rugosidade e da análise por microscopia Nomarski pode ser explicada pela resolução lateral relativamente baixa do sistema de medição interferométrico (1  $\mu\text{m}$ ), que impede que na medição de rugosidade os "pittings" de pequena dimensão sejam considerados. Estes "pittings" tem, de acordo com a observação visual, uma dimensão aproximada do tamanho de grão do ZnS, que se encontra na ordem de 2 a 8  $\mu\text{m}$  [176].



**Figura 6.4** - Resultados de microscopia Nomarski em ZnS

Da mesma forma que para o ZnS, na usinagem de ultraprecisão de Cleartran verificam-se apenas pequenas alterações nos valores de rugosidade para as variações do avanço, principalmente para os valores de  $R_a$ . A tendência de uma leve elevação nos valores da rugosidade para avanços em torno de  $2,5 \mu\text{m}$ , possivelmente causada por vibrações no sistema, também ocorre, sendo que acima deste valor a rugosidade permanece em um patamar relativamente constante até avanços de  $5 \mu\text{m}$ , o que é verificado também para os resultados da rugosidade P-V. Em uma comparação com os resultados obtidos para o ZnS, entretanto, para o Cleartran a média dos valores de rugosidade situa-se em um patamar mais elevado, sendo o desvio-padrão dos mesmos também maior (**figura 6.5**).



**Figura 6.5** - Influência do avanço sobre a rugosidade de Cleartran

Embora através de uma análise da rugosidade de superfícies de Cleartran não seja possível verificar uma maior influência do avanço sobre os valores de  $R_a$  e P-V, a observação visual através de microscopia Nomarski mostra uma forte deterioração da qualidade superficial para avanços progressivamente maiores. Apesar de mesmo para avanços da ordem de  $1 \mu\text{m}$  não ser possível a obtenção de superfícies totalmente livres de "pittings", a qualidade superficial é nitidamente melhor do que para avanços maiores. Como o tamanho médio de grão do Cleartran, na ordem de  $25$  a  $30 \mu\text{m}$ , é bastante superior ao do ZnS, a estrutura cristalina do Cleartran é melhor reconhecível através de microscopia óptica. Assim, conforme mostrado na **figura 6.6**, é possível verificar que mesmo em superfícies fortemente danificadas, ainda podem ser reconhecidas regiões com excelente qualidade superficial, cuja dimensão média encontra-se na ordem de grandeza do tamanho médio de grão. Deste fato pode-se concluir que o sucesso da usinagem dúctil para um material de comportamento frágil como o Cleartran é fortemente dependente da orientação cristalina. Além disto, a variação periódica do regime de usinagem dúctil para um regime de usinagem frágil que ocorre em função das diferentes orientações cristalinas em uma superfície usinada leva a uma variação de alta frequência

nas condições de usinagem. A alta dinâmica do processo, causada principalmente por variações nas forças na usinagem deste material, pode explicar por sua vez as maiores dispersões existentes nos valores de rugosidade  $R_a$  e P-V.

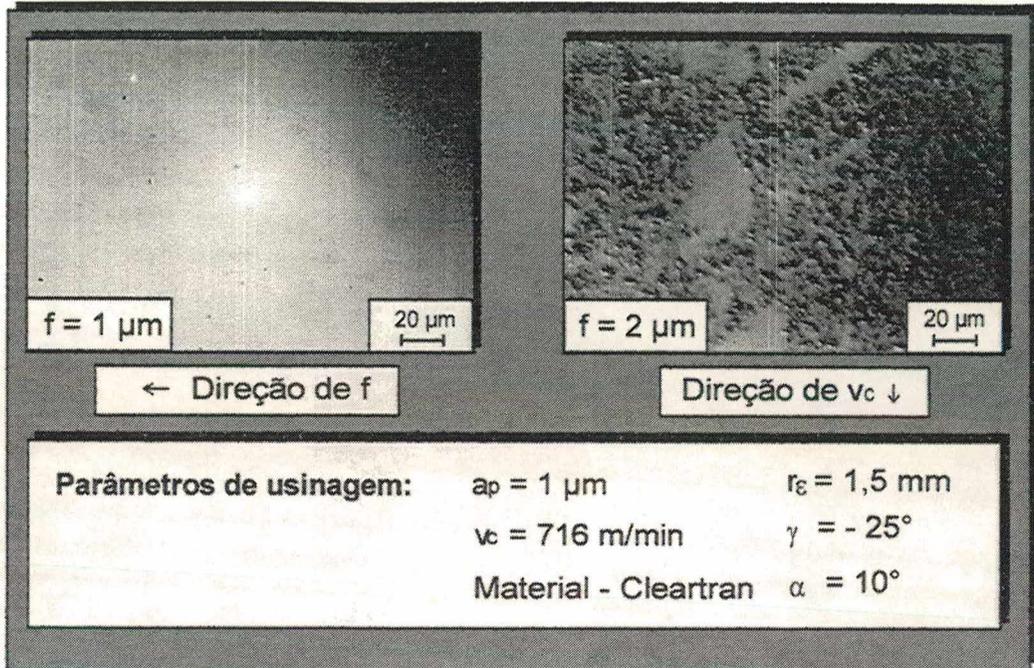


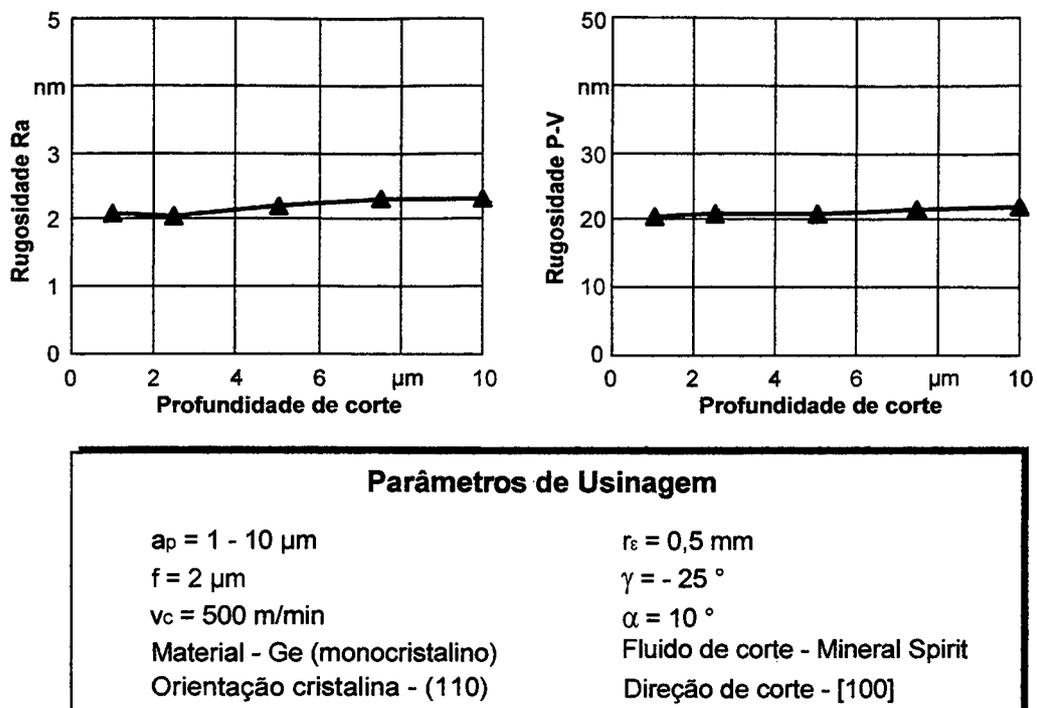
Figura 6.6 - Resultados de microscopia Nomarski em Cleartran

### 6.1.2. Profundidade de corte

Na usinagem convencional a profundidade de corte normalmente não tem influência sobre a qualidade superficial, desde que seja satisfeita a condição  $a_p > a_{p,\text{min}}$  [116]. Isto ocorre porque a rugosidade cinemática é dependente apenas do avanço e do raio de quina da ferramenta, conforme a equação 6.1 mostrada anteriormente. Analogamente tem-se na usinagem de ultraprecisão também uma independência da rugosidade teórica dos valores de profundidade de corte adotados. Na prática, entretanto, diferentes resultados de pesquisa mostram que na usinagem com diamante de diferentes materiais a rugosidade de uma superfície é afetada pelo valor de profundidade de corte adotado. Esta fato é explicado pelos diferentes mecanismos de formação de cavacos, energias de corte e forças de usinagem que ocorrem para diferentes profundidades de corte [1].

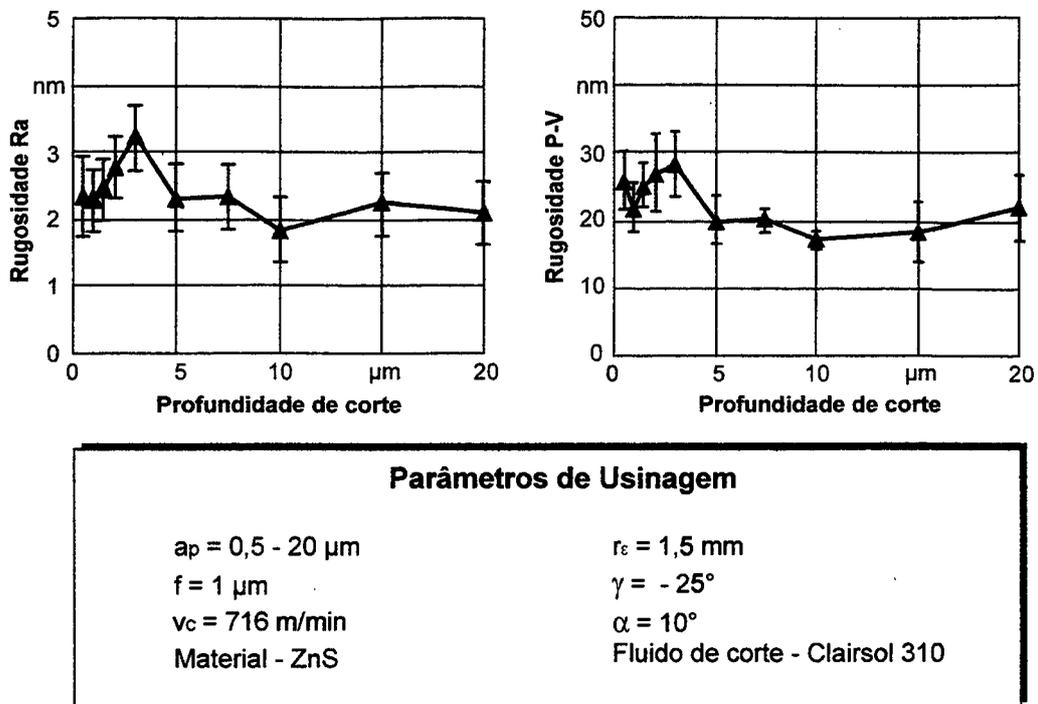
De acordo com a teoria da usinagem dúctil de materiais duros e frágeis, explanada anteriormente no item 2.3, a qualidade superficial não é afetada por alterações de profundidade de corte, visto que as mesmas levam apenas a uma conseqüente alteração no valor da largura de usinagem  $b_{cu}$ , sem influência sobre a rugosidade cinemática. Os aumentos na profundidade de corte, todavia, levam normalmente a maiores forças de usinagem e a uma maior energia gerada durante o processo, o que na prática pode influenciar a rugosidade da superfície usinada. Conforme a rigidez e as demais características do sistema ferramenta-máquina-ferramenta, aumentos nas forças podem induzir vibrações durante a operação de usinagem, de forma que, de acordo com o processo, a profundidade de corte tem um limite superior a partir do qual existe uma tendência de diminuição da qualidade superficial. Um limite inferior para a profundidade de corte adotada na usinagem com diamante também existe, determinado pelo raio de arredondamento do gume da ferramenta. Abaixo de um certo valor de  $a_p$  não existem mais condições para a formação de cavacos definidos, o que leva a um processo de usinagem instável, com conseqüências negativas sobre a qualidade superficial obtida. Normalmente este limite inferior para a profundidade de corte encontra-se abaixo de  $0,5 \mu\text{m}$ , conforme o grau de afiação da ferramenta de diamante empregada [20].

Ensaio realizados em germânio monocristalino com diferentes orientações cristalinas mostram que variações na profundidade de corte para valores entre 1 e  $10 \mu\text{m}$  não têm influência significativa sobre a rugosidade (**figura 6.7**). Apenas para profundidades de corte superiores a  $15 \mu\text{m}$  ocorrem aumentos significativos na rugosidade e danos superficiais, o que torna a superfície gerada inadequada para aplicações ópticas [77]. Esta diminuição na qualidade superficial para grandes profundidades de corte pode ser explicada pelo incremento das vibrações na máquina-ferramenta, que por sua vez ocorre devido ao aumento nas forças de usinagem relacionado às maiores seções de usinagem.



**Figura 6.7** - Influência da profundidade de corte sobre a rugosidade de germânio [77]

Na usinagem com diamante de ZnS e Cleartran verifica-se que, analogamente ao verificado por diversos pesquisadores da área, a profundidade de corte tem uma influência relativamente pequena sobre a rugosidade de uma superfície usinada, dentro dos limites de profundidade de corte usuais para a usinagem de ultraprecisão. Através da **figura 6.8** é possível observar que tanto os valores médios de rugosidade  $R_a$  e P-V quanto as dispersões de resultado variam pouco para os diferentes valores de  $a_p$  adotados, em ensaios com ZnS. Ao longo de todo o campo de profundidades de corte é possível obter superfícies com qualidade óptica, sendo que os leves aumentos nos valores de rugosidade que ocorrem para valores de profundidade de corte em torno de  $3 \mu\text{m}$  devem-se provavelmente a vibrações autoinduzidas existentes no processo de usinagem, conforme exposto anteriormente. Já a tendência de aumento da rugosidade observada para  $a_p < 1 \mu\text{m}$  deve ser creditada à crescente influência negativa do raio de arredondamento do gume da ferramenta, que leva a uma progressiva dificuldade de remoção de cavacos de forma definida, a um aumento das forças específicas passivas e, conseqüentemente, a um maior nível de vibrações no sistema.



**Figura 6.8** - Influência da profundidade de corte sobre a rugosidade de ZnS

Uma análise da qualidade superficial através de microscopia Nomarski mostra que também com relação a danos superficiais a profundidade de corte exerce pouca influência sobre o resultado de trabalho na usinagem de ZnS para o intervalo  $0,5 < a_p < 20 \mu\text{m}$ , sendo possível a geração de superfícies de qualidade óptica ao longo de todo este campo de profundidades de corte. Entretanto, em função de uma leve melhoria tanto dos resultados de rugosidade quanto das dispersões de resultado, pode-se concluir que, mantendo-se as demais condições de trabalho idênticas às utilizadas para os ensaios de usinagem de ZnS, a adoção de valores de  $a_p \approx 10 \mu\text{m}$  são os mais indicados para a produção de superfícies onde é exigida uma qualidade superficial extrema.

Na usinagem de Cleartran uma variação da profundidade de corte leva a resultados muito semelhantes aos obtidos para o ZnS, ou seja, não se verifica uma influência muito pronunciada da profundidade de corte sobre a rugosidade. Em profundidades de corte entre 1 e 5  $\mu\text{m}$  ocorre uma maior dispersão dos resultados, enquanto que para valores de  $a_p \approx 7,5 \mu\text{m}$  são obtidos os melhores resultados de rugosidade, tanto com relação ao valor da média de  $R_a$  e P-V quanto à dispersão dos resultados (**figura 6.9**). Esta maior

dispersão da rugosidade para  $a_p < 5 \mu\text{m}$  pode ser explicada, além da existência de vibrações no sistema para esta faixa de profundidade de corte, a uma maior ocorrência de "pittings", que levam a um aumento nos valores médios de rugosidade medidos.

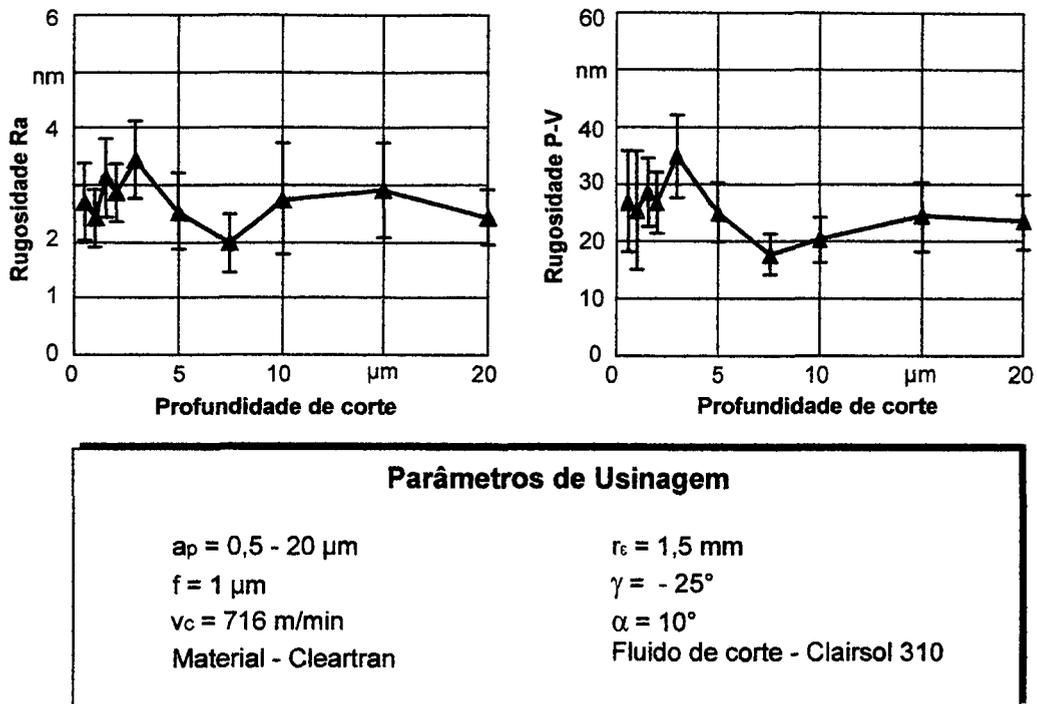


Figura 6.9 - Influência da profundidade de corte sobre a rugosidade de Cleartran

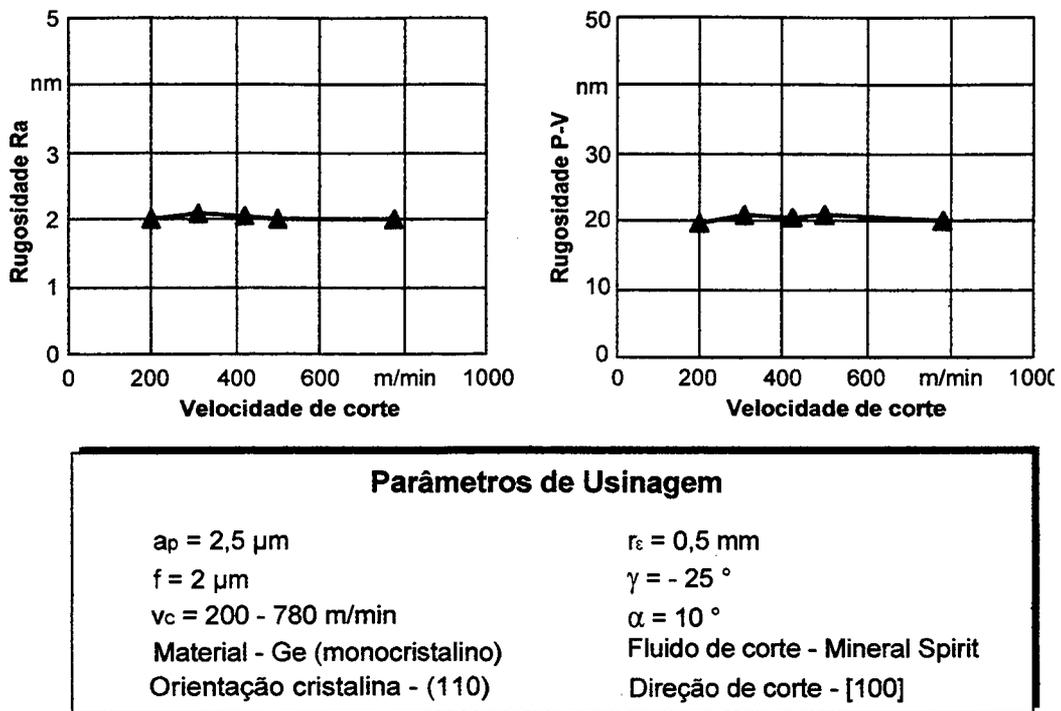
### 6.1.3. Velocidade de corte

Enquanto na usinagem convencional de metais a velocidade de corte mostra ter uma influência significativa sobre os resultados de trabalho [116], na usinagem de ultraprecisão de metais não ferrosos as alterações na velocidade de corte normalmente não mostram influência sobre os resultados de qualidade superficial, para uma variação de velocidades de corte dentro de limites bastante amplos. Mesmo para a situação onde  $v_c \approx 0 \text{ m/min}$ , que ocorre em operações de torneamento quando o centro de rotação da peça é atingido, o material ainda é perfeitamente usinado, sem conseqüências negativas sobre a rugosidade. Deve-se observar, entretanto, que em alguns processos de usinagem, como o "fly-cutting", a variação da velocidade de corte está relacionada a alterações na rotação da árvore da máquina-ferramenta, o que pode levar a diferentes níveis de vibrações no sistema. Este

fato pode ter, por sua vez, conseqüências negativas sobre a qualidade superficial da peça usinada. Também as maiores energias decorrentes de maiores velocidades de corte podem influenciar o resultado de trabalho, de modo que, embora de uma forma geral alterações na velocidade de corte não tragam problemas de qualidade final no material usinado, alguns cuidados neste sentido devem ser tomados, como a observação das características dinâmicas da máquina-ferramenta, entre outras [1, 20, 77].

Na usinagem de materiais de comportamento duro e frágil com ferramentas de diamante, como os cristais infravermelhos, existem resultados contraditórios com relação à influência da velocidade de corte sobre a qualidade superficial. Estas contradições podem, entretanto, ser explicadas pelas diferentes condições de ensaio e processos de usinagem adotados pelos diversos pesquisadores. Enquanto o torneamento plano é um processo contínuo e as variações de velocidade de corte se dão em função dos diferentes diâmetros usinados, para uma mesma rotação do eixo-árvore da máquina, no "fly-cutting" o processo de corte é interrompido e as diferentes velocidades de corte são obtidas por alterações na rotação da árvore. Assim, tanto as vibrações induzidas pelo corte interrompido quanto a variação da dinâmica decorrente de alterações na rotação têm efeitos sobre a qualidade superficial que são dificilmente separáveis dos efeitos causados simplesmente por alterações na velocidade de corte [20].

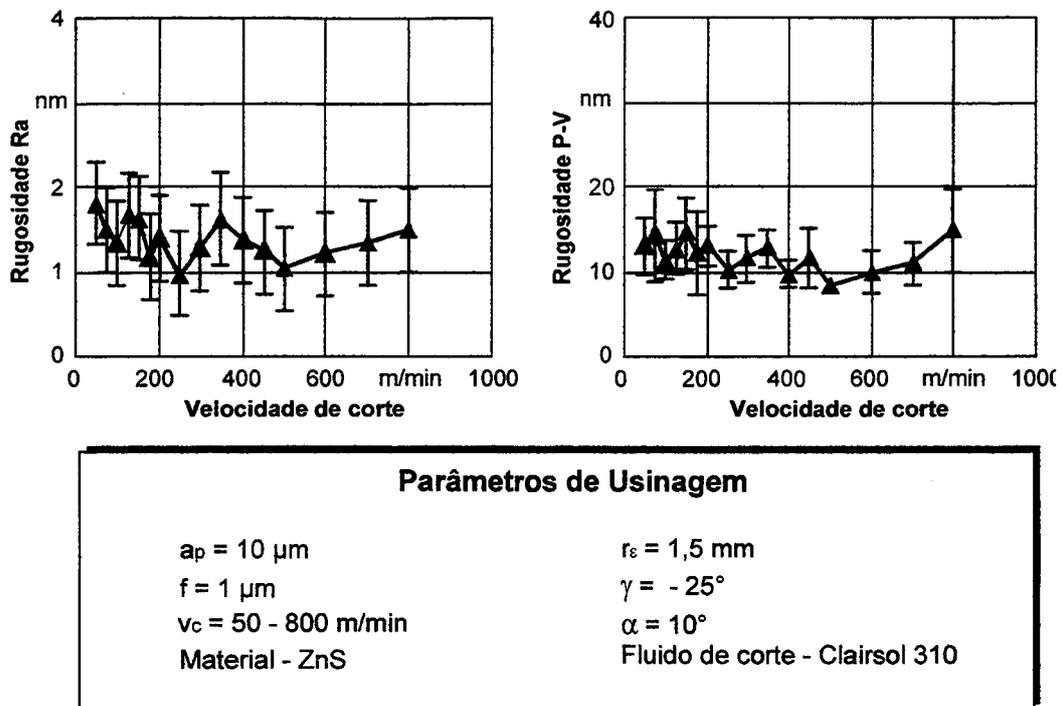
Ensaio de "fly-cutting" realizados em germânio por Burghardt [77] mostram que a qualidade superficial não é significativamente influenciada pela velocidade de corte (**figura 6.10**). Apenas para velocidades de corte muito altas ocorre um leve aumento na rugosidade, que pode ser creditado às variações dinâmicas da máquina-ferramenta causadas por um conseqüente aumento na rotação do fuso. Já Blacke e Scattergood [102] verificaram que no torneamento de germânio a ocorrência de danos superficiais é menos intensa à medida que ocorrem incrementos na velocidade de corte, sendo que a dependência dos danos superficiais e a velocidade de corte também foi verificada por Decker et al [15] na usinagem de materiais duros e frágeis.



**Figura 6.10** - Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade de germânio [77]

Através de ensaios de usinagem de ultraprecisão com ZnS, verifica-se que para variações na velocidade de corte os resultados de rugosidade apresentam uma leve alteração nos valores médios. Ao longo de todo o intervalo de velocidades de corte testado a qualidade superficial obtida mantém-se, entretanto, dentro de limites que permitem a classificação da superfície como "óptica", ou seja, rugosidades  $R_a$  abaixo de 2 nm, rugosidades P-V inferiores a 20 nm e ausência quase completa de danos superficiais (figura 6.11). A oscilação nos valores de rugosidade pode ser imputada, portanto, antes aos diferentes níveis de vibração introduzidos no sistema pela variação da rotação do fuso da máquina-ferramenta, visto que o processo empregado nos ensaios é o "fly-cutting", do que a um efeito real da variação da velocidade de corte sobre o resultado final de trabalho. Disto pode-se concluir que, mais importante do que a adoção de uma determinada velocidade de corte, a obtenção de um resultado ótimo na usinagem com diamante de ZnS depende da otimização do nível de vibrações existentes no sistema. Tal conclusão é abalizada também em ensaios complementares de torneamento de ZnS, nos quais uma variação da velocidade de corte de um valor máximo até praticamente 0 m/min, devido à redução do diâmetro da peça usinada, não mostra uma influência significativa sobre a qualidade

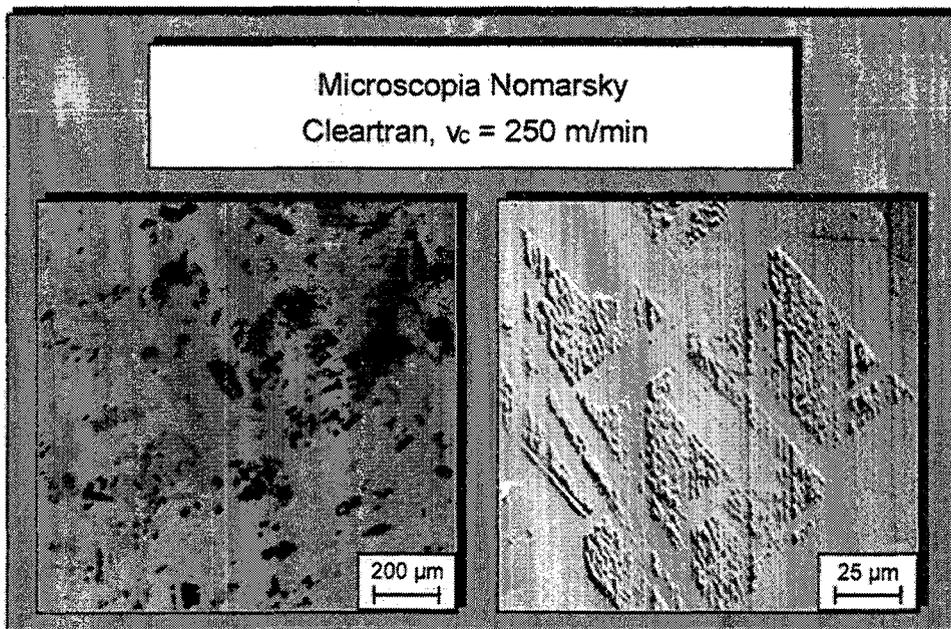
superficial. Neste caso o nível de vibrações da máquina-ferramenta permanece constante, visto que a rotação não sofre alterações de valor.



**Figura 6.11** - Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade de ZnS

Ao contrário do que ocorre na usinagem do ZnS, os resultados de rugosidade de Cleartran mostram que este material sofre de fato uma influência marcante da velocidade de corte sobre o resultado de trabalho. Para mesmas condições de usinagem que o ZnS, a partir de um limite de velocidade de corte em torno dos 150 m/min as rugosidades obtidas no Cleartran tendem a aumentos progressivos. Já a partir de velocidades de corte relativamente pequenas a análise da superfície através de microscopia óptica evidencia estruturas com dimensões na ordem de grandeza do tamanho médio de grão deste material (25 - 30  $\mu\text{m}$ ), que melhor observadas mostram-se não como quebras ou arrancamento de um cristal da superfície, e sim como o resultado de uma deformação elástica deste grão em um grau diferente dos grãos vizinhos. Este efeito pode ser observado também na usinagem de ultraprecisão de metais não ferrosos, como o cobre, por exemplo [1].

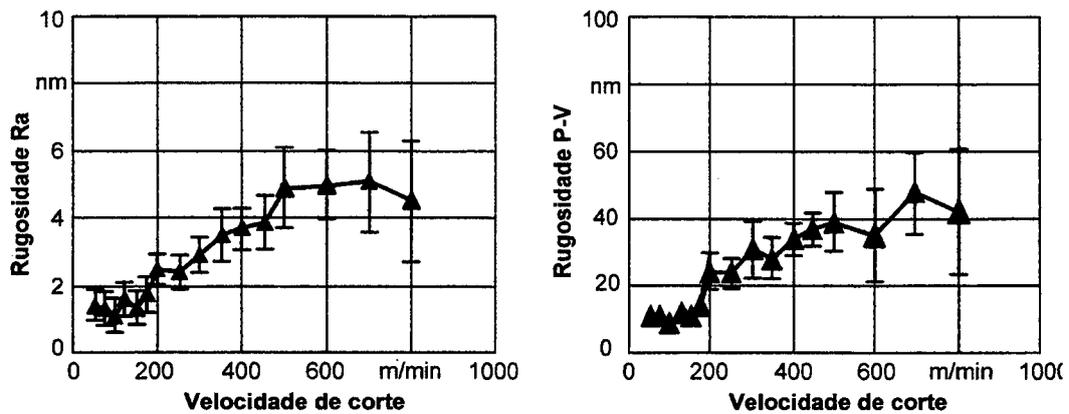
O comportamento elástico de grãos de Cleartran em diferente grau para as diferentes orientações cristalinas pode ser explicado pela anisotropia das propriedades elásticas que este material apresenta, ou seja, pela dependência que o módulo de elasticidade tem da direção de um cristal. O Cleartran, assim como o ZnS, apresenta uma anisotropia elástica relativamente alta ( $A = 2,31$ ), em comparação com outros materiais de comportamento duro e frágil, de forma que sob a ação de forças de usinagem os cristais deste material deformam-se elasticamente em diferente grau conforme suas diferentes orientações e recompõem-se também diferentemente após cessada a ação da força. Assim, após a passagem da ferramenta a superfície usinada apresenta degraus nas dimensões dos diferentes grãos cristalinos, conforme pode ser visto na **figura 6.12**. Este comportamento observado no Cleartran confirma a tese que mesmo materiais que macroscopicamente têm um comportamento frágil podem apresentar um comportamento elástico a nível microscópico.



**Figura 6.12** - Deformação elástica em diferente grau para cristais de Cleartran

Para aumentos na velocidade de corte ainda maiores, é possível verificar que a partir de um determinado limite esta recomposição elástica dos diferentes cristais já não é mais totalmente possível, ocorrendo uma ruptura desta região. Este efeito, que ocorre na usinagem de materiais frágeis e é conhecido como "spalling" [20], ocorre de forma

progressiva na usinagem do Cleartran para velocidades de corte acima dos 200 m/min, e pode ser considerado o grande responsável pelo incremento na rugosidade  $R_a$  e P-V para altas velocidades de corte (**figura 6.13**). Com base nos resultados de rugosidade e da análise microscópica da superfície gerada, pode-se verificar que apenas as superfícies geradas com velocidades de corte inferiores aos 200 m/min apresentam uma qualidade óptica, com rugosidades baixas e poucos danos superficiais.



#### Parâmetros de Usinagem

$a_p = 10 \mu\text{m}$

$f = 1 \mu\text{m}$

$v_c = 50 - 800 \text{ m/min}$

Material - Cleartran

$r_e = 1,5 \text{ mm}$

$\gamma = -25^\circ$

$\alpha = 10^\circ$

Fluido de corte - Clairsol 310

**Figura 6.13** - Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade de Cleartran

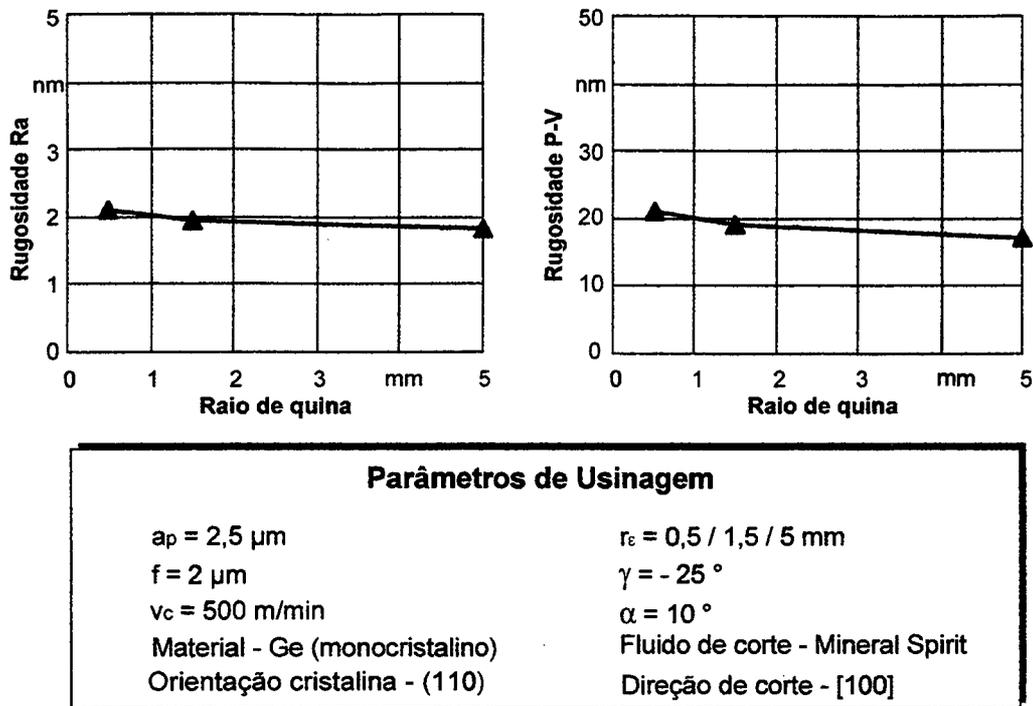
#### 6.1.4. Raio de quina

Assim como o avanço, o raio de quina da ferramenta apresenta teoricamente uma grande influência sobre a rugosidade de uma superfície gerada por usinagem com ferramentas de geometria definida [116]. De acordo com a equação 6.1 apresentada anteriormente, mantendo-se os avanços constantes e aumentando-se o raio de quina da ferramenta, a rugosidade cinemática diminui. Este comportamento da qualidade superficial em função de variações no raio de quina é verificado também na usinagem de metais não ferrosos com ferramenta de diamante [1]. Entretanto, se os avanços forem proporcionalmente

incrementados com os aumentos no raio de quina, é possível teoricamente obter-se as mesmas rugosidades cinemáticas para diferentes condições de usinagem, de modo que a escolha do valor de raio de quina é dependente também, além de um avanço correspondente, de outras variáveis. Grandes raios de quina tendem a trazer como consequência maiores forças de usinagem, que por sua vez podem influir na qualidade final do trabalho, enquanto pequenos raios de quina obrigam a adoção de avanços correspondentemente menores, o que leva a maiores tempos de usinagem e, conseqüentemente, maiores custos de fabricação. Assim sendo, também a escolha do valor ideal do raio de quina deve ser feita em função do resultado desejado, tipo de processo, tipo de material usinado e demais grandezas de trabalho.

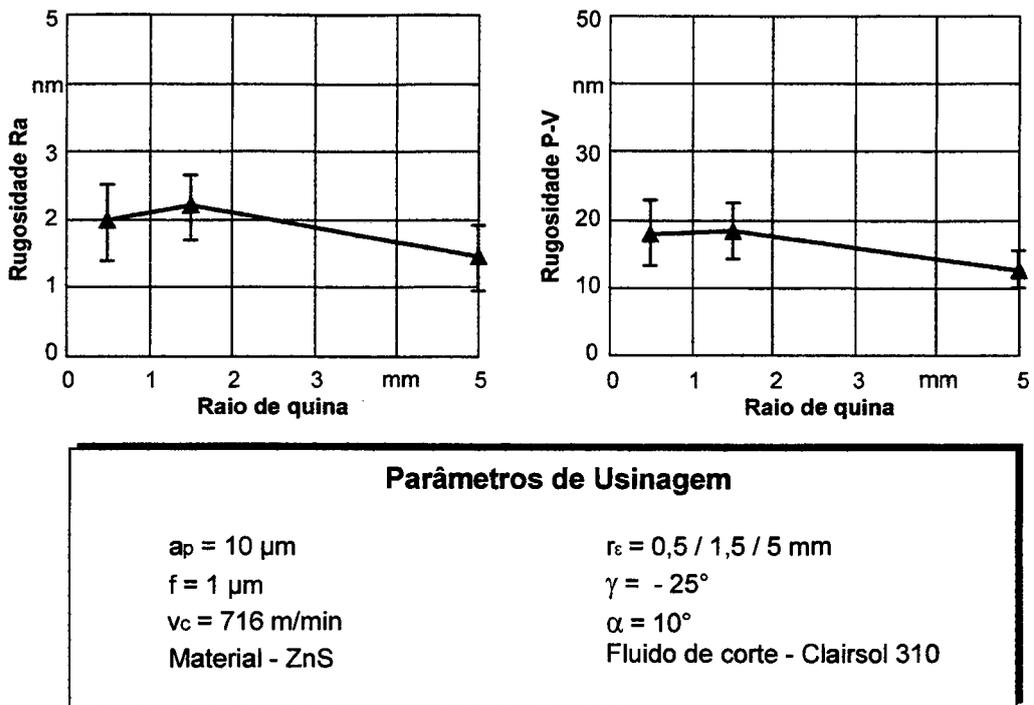
Na usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis, além da relação existente entre a rugosidade cinemática e o raio de quina, sabe-se que também a espessura crítica de usinagem  $h_k$ , abaixo da qual ocorre a usinagem dúctil de materiais de comportamento frágil, tem uma relação com o raio de quina da ferramenta. Segundo Blackley e Scattergood [136], à medida que se aumentam os raios de quina a espessura crítica de usinagem  $h_k$  desloca-se para regiões superiores da seção de cavaco formado, de modo que se encontra a uma maior distância da superfície gerada, ao mesmo tempo que a profundidade de danos  $S$  também cresce (vide **figura 2.13** do item 2.3). A explicação para este fato pode ser encontrada no aumento das tensões de compressão decorrentes do aumento das forças passivas para maiores raios de quina. Na região de corte forma-se uma zona de maior deformação plástica, de forma que o aumento nas tensões próprias do material pode ocasionar maiores danos.

Segundo Burghardt [77], na microusinagem de germânio verifica-se a dependência entre o raio de quina e a qualidade superficial. Mantendo-se o avanço constante, com o aumento de  $r_s$  ocorre uma redução na rugosidade, o que condiz com a expectativa teórica. Esta redução na rugosidade, que é praticamente independente da orientação cristalina, é relativamente pequena, o que pode ser justificado por uma sobreposição do efeito positivo do aumento do raio de quina sobre a rugosidade cinemática e do efeito negativo deste mesmo aumento sobre o nível de vibrações no sistema e aumento na profundidade de danos  $S$ , conforme explicado anteriormente (**figura 6.14**).



**Figura 6.14** - Influência do raio de quina sobre a rugosidade de germânio [77]

A observação dos resultados de rugosidade obtidos para diferentes raios de quina da ferramenta, na usinagem com diamante de ZnS, mostra que para maiores raios de quina ocorre a esperada tendência de redução das rugosidades. Principalmente o valor da rugosidade P-V é positivamente afetado pela adoção de maiores raios de quina, visto que tanto a média dos valores quanto o desvio-padrão dos mesmos decresce. Esta menor dispersão dos resultados da rugosidade P-V pode ser creditada a uma menor ocorrência de danos superficiais quando a usinagem é realizada com ferramentas de maiores raios de quina, danos estes que se refletem com mais intensidade nos resultados de rugosidade P-V do que de rugosidade  $R_a$  (figura 6.15). O leve aumento nos valores de rugosidade observados para  $r_\epsilon = 1,5 \text{ mm}$  deve-se possivelmente a um estado de desgaste mais pronunciado ocorrido na ferramenta com esta geometria, visto a mesma ter sido utilizada para uma maior quantidade de ensaios de usinagem que as demais.



**Figura 6.15** - Influência do raio de quina sobre a rugosidade de ZnS

Assim como para o ZnS, também na usinagem de Cleartran é possível verificar o efeito positivo dos aumentos do raio de quina sobre a rugosidade (**figura 6.16**). Os valores absolutos tanto da rugosidade  $R_a$  quanto P-V para o Cleartran são, entretanto, levemente superiores aos obtidos na usinagem de ZnS, visto que o comportamento do Cleartran mostra-se mais frágil durante a usinagem e a ocorrência de "pittings", mais freqüente. Estes danos superficiais ocorrem, todavia, com maior intensidade para pequenos raios de quina do que para grandes  $r_e$ , o que pode ser verificado através da observação da superfície em microscópio óptico. Deste modo, também para a obtenção de superfícies de boa qualidade óptica em Cleartran devem ser utilizadas preferencialmente ferramentas de diamante com maiores raios de quina.

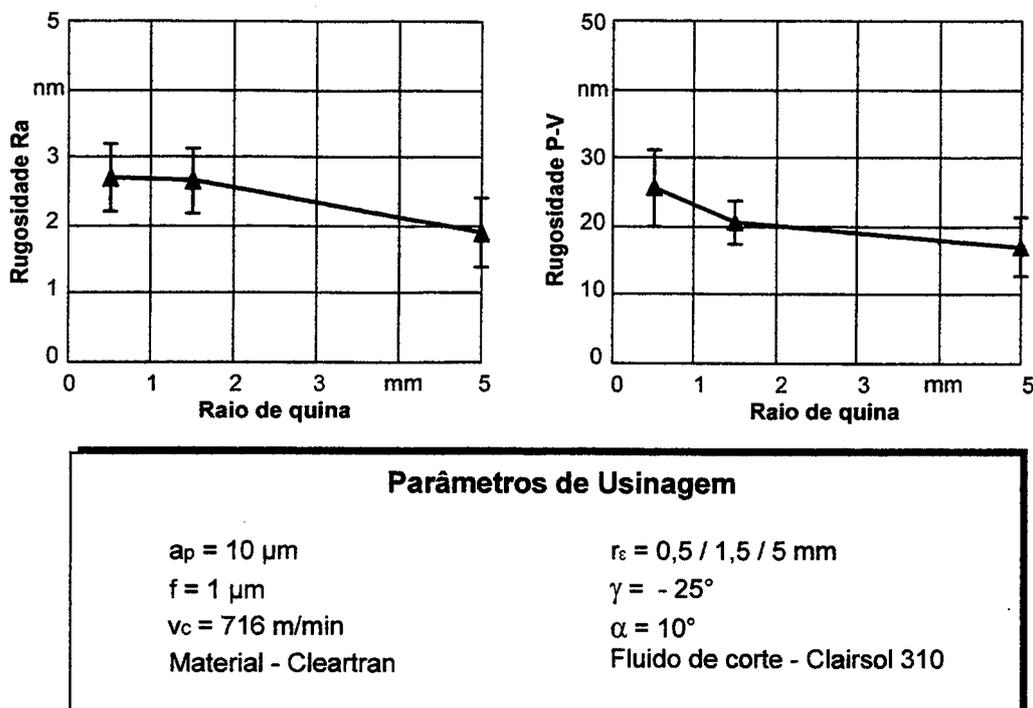


Figura 6.16 - Influência do raio de quina sobre a rugosidade de Cleartran

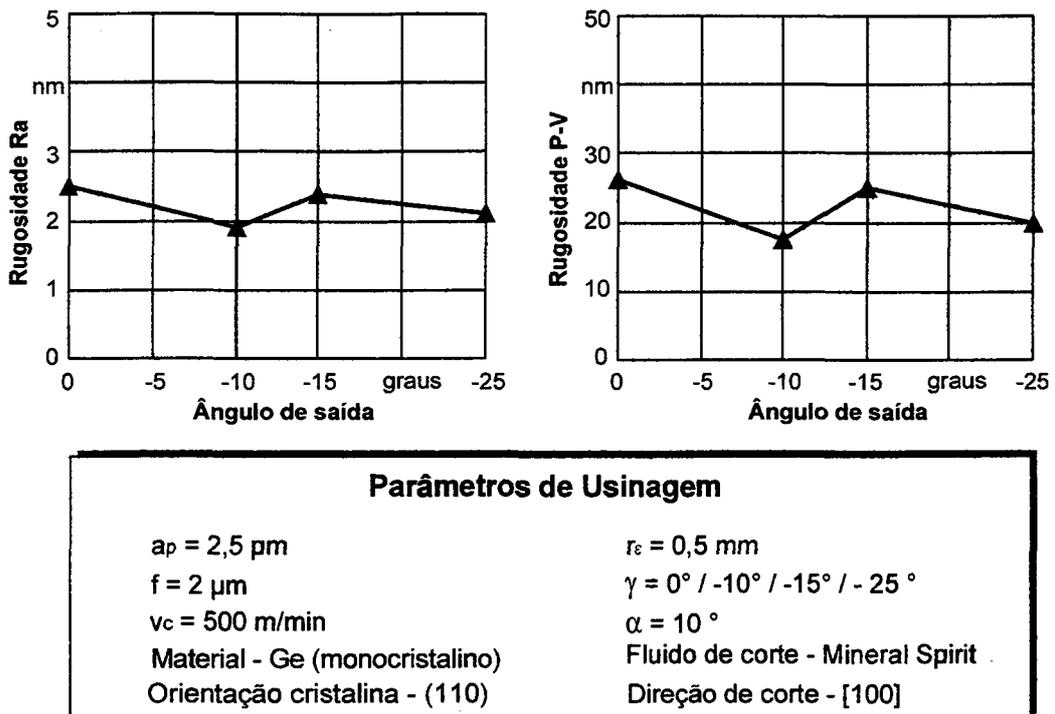
### 6.1.5. Ângulo de saída

Ensaio realizados na usinagem convencional de materiais dúcteis mostram que aumentos no sentido positivo do ângulo de saída da ferramenta levam normalmente a melhores resultados de rugosidade [116]. Já na usinagem de metais não ferrosos e outros materiais de comportamento dúctil com ferramentas de diamante as suposições de que o mesmo ocorra não puderam ser até o momento completamente confirmadas. Enquanto Osenberg e Weinz [149] relatam inclusive uma melhoria na qualidade superficial para leves aumentos no sentido negativo do ângulo de saída da ferramenta, na usinagem de diferentes metais não ferrosos com ferramenta de diamante, ensaios de usinagem de ultraprecisão realizados por Spenrath [1] em cobre OFHC não mostram variações significativas da rugosidade para alterações no ângulo de saída dentro de um intervalo de  $0^\circ < \gamma < -10^\circ$ .

Enquanto na usinagem de materiais dúcteis com ferramenta de diamante o ângulo de saída tem uma influência relativamente pequena, na usinagem de ultraprecisão de

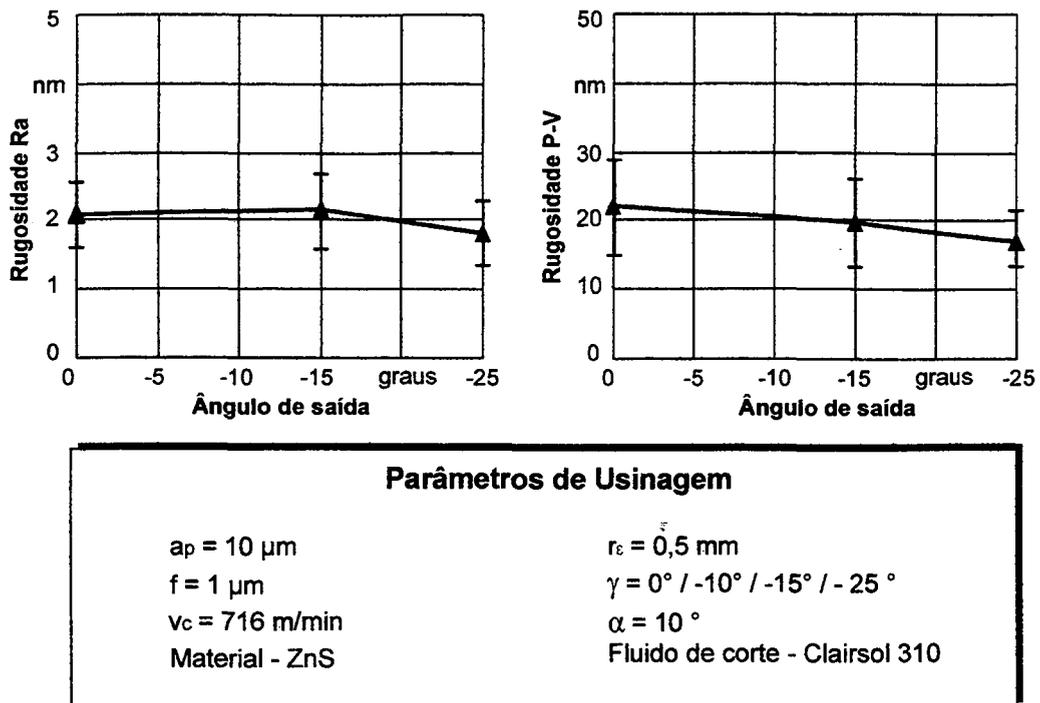
materiais de comportamento duro e frágil, como o germânio e o silício, por exemplo, sabe-se que melhores qualidades superficiais podem ser obtidas para ângulos de saída fortemente negativos [2, 20, 77, 135, 158, 181]. Neste tipo de material é necessária uma grande tensão de compressão na região de corte, de modo a permitir a usinagem dúctil e a obtenção de uma superfície com qualidade óptica [20, 35, 77]. O aumento dos ângulos de saída na direção negativa não leva necessariamente, entretanto, a um incremento na qualidade superficial. Segundo Blackley e Scattergood [138], com a alteração do ângulo de saída ocorrem dois efeitos simultâneos e antagônicos, que são um aumento da espessura de usinagem crítica  $h_k$  para aumentos negativos no ângulo de saída e, ao mesmo tempo, um aumento da profundidade média dos danos  $S$ . Assim, também na usinagem de cristais infravermelhos o ângulo de saída ideal varia conforme as características do material usinado, parâmetros de usinagem e demais características geométricas da ferramenta, entre outros fatores.

Na usinagem de germânio, Burghardt [77] observa que o ângulo de saída exerce uma forte influência sobre o resultado de trabalho, não somente sobre os valores de rugosidade, mas principalmente sobre a ocorrência de trincas e danos superficiais. Superfícies com qualidade óptica somente puderam ser obtidas para ângulos de saída fortemente negativos, na ordem de  $-25^\circ$ , sendo que para superfícies usinadas com ferramentas com ângulos de saída menos negativos que estas ocorrem danos superficiais para todas as orientações cristalinas usinadas. Devido a isto, os valores de rugosidade obtidos devem ser observados com reservas, já que para o cálculo de  $R_a$  e P-V são levados em conta tanto as regiões com danos quanto sem (**figura 6.17**).



**Figura 6.17** - Influência do ângulo de saída sobre a rugosidade de germânio [77]

A análise dos resultados de rugosidade em corpos de prova de ZnS usinados com ferramentas de diamante com diferentes ângulos de saída mostra que, embora possa ser verificada uma melhoria da rugosidade para ângulos de saída fortemente negativos, esta variação não é muito pronunciada. Mesmo com ferramentas com  $\gamma = 0^\circ$ , é possível a obtenção de rugosidades razoavelmente baixas (figura 6.18). A observação através de microscopia Nomarski destas superfícies mostra, entretanto, que as mesmas possuem uma maior incidência de danos superficiais, ao contrário das superfícies obtidas com ângulos de saída  $\gamma = -25^\circ$ . Assim, da mesma forma que para outros materiais de comportamento duro e frágil, confirma-se a teoria que afirma que a usinagem dúctil de materiais frágeis, ou seja, a obtenção de um estado de tensões de compressão na região de corte, pode ser favorecida pela adoção de ferramentas com ângulos de saída fortemente negativos.



**Figura 6.18** - Influência do ângulo de saída sobre a rugosidade de ZnS

Ao contrário do que ocorre com o ZnS, na usinagem de Cleartran verifica-se que os valores de rugosidade, apesar de aparentemente pouco afetados por variações no ângulo de saída da ferramenta, são levemente menores quando a ferramenta de corte apresenta um valor de  $\gamma = 0^\circ$  (figura 6.19). Este fato, que pode ser verificado tanto pela observação dos valores de  $R_a$  quanto de P-V, deve ser analisado em profundidade, visto contradizer a teoria da usinagem dúctil de materiais frágeis, segundo a qual melhores resultados superficiais podem ser obtidos com a adoção de ferramentas com ângulos de saída negativos.

Uma explicação para as menores rugosidades ocorridas para as ferramentas com  $\gamma = 0^\circ$ , em comparação com ferramentas com ângulos de saída negativos, pode ser a pequena profundidade e largura dos danos superficiais que ocorrem na usinagem de Cleartran com ferramentas de  $\gamma = 0^\circ$ , que podem ser verificados visualmente com auxílio de microscopia Nomarski mas que aparentemente não são percebidos pela medição da rugosidade por interferometria óptica, visto que o microscópio interferométrico empregado para a medição da rugosidade (vide descrição no item 9.2) tem uma resolução lateral limitada. Também a

alteração da microgeometria do gume das ferramentas utilizadas para os ensaios, que sabe-se exercer uma grande influência sobre o resultado final de trabalho, pode ser responsável pelas contradições existentes entre a teoria da usinagem dúctil de materiais frágeis e os resultados de usinagem de Cleartran. A análise da microgeometria do gume de ferramentas de diamante apresenta, todavia, grandes dificuldades, não sendo portanto realizada no escopo deste trabalho.

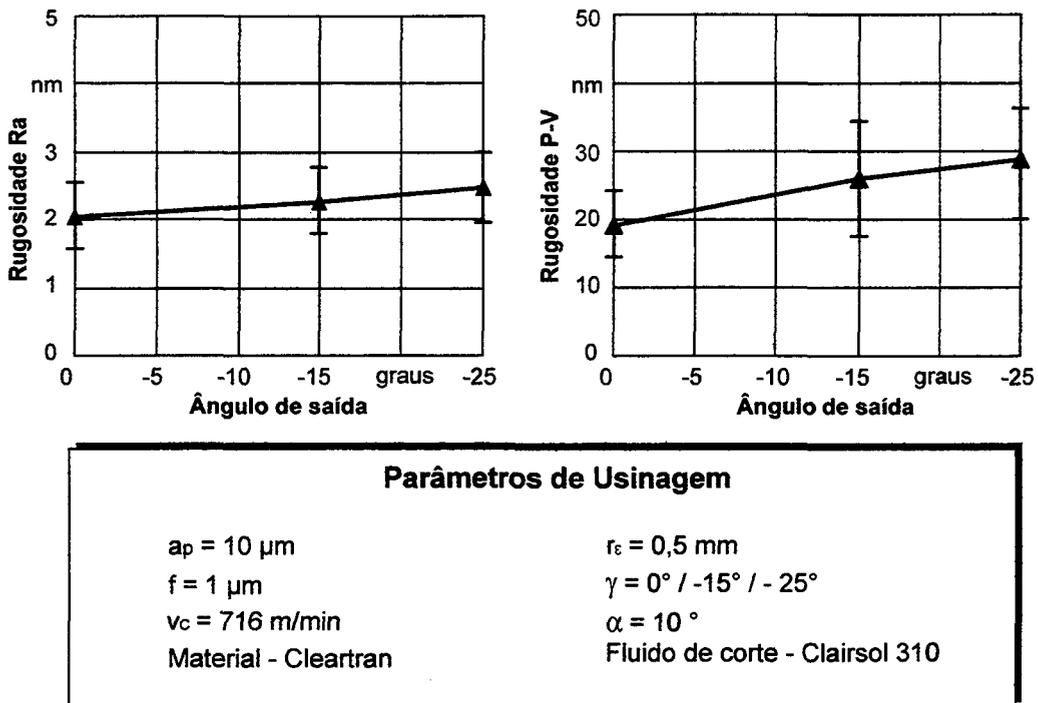


Figura 6.19 - Influência do ângulo de saída sobre a rugosidade de Cleartran

### 6.1.6. Material da peça

As propriedades específicas de um material determinam, normalmente, a qualidade final que se pode obter através de uma operação de usinagem em geral. Este fato é válido também para o processo de usinagem de ultraprecisão. Esta influência das características de um material tem um peso ainda maior quando se trata da usinagem de materiais de comportamento duro e frágil com ferramentas de diamante, visto que principalmente a qualidade superficial depende do sucesso da usinagem em regime dúctil. Na usinagem dúctil destes materiais a profundidade de danos  $S$  e a espessura crítica de usinagem  $h_k$ ,

que exercem uma grande influência sobre a qualidade superficial final, são primordialmente influenciados pela dureza, resistência à ruptura e módulo de elasticidade do material usinado, conforme a equação 2.6 apresentada anteriormente no item 2.3. Também a pureza, homogeneidade, estrutura cristalina, tamanho de grão e demais propriedades físicas e mecânicas determinam a qualidade final de trabalho possível de se obter [20]. Devido a isto, além do efeito da variação dos parâmetros de trabalho anteriormente analisados sobre a qualidade superficial na usinagem de ultraprecisão dos cristais infravermelhos ensaiados, também as características específicas destes materiais devem ser relacionadas ao resultado de trabalho.

Segundo Burghardt [77], na usinagem de germânio é possível verificar a influência que a orientação cristalina exerce sobre a qualidade superficial. Em ensaios realizados em corpos de prova de germânio monocristalino com diferentes orientações cristalinas, observam-se diferentes valores de rugosidade para a usinagem com diamante nas diferentes orientações cristalinas, mantendo-se todos os demais parâmetros de usinagem e variáveis de processo constantes. Também o surgimento de "pittings" na superfície usinada pode ser relacionado à orientação cristalina, sendo entretanto de um modo geral muito difícil obter superfícies ópticas para avanços superiores a 3  $\mu\text{m}$  ou com ferramentas cujos ângulos de saída não sejam fortemente negativos. Sob condições de usinagem otimizadas foram obtidas superfícies de qualidade óptica, ou seja, sem danos superficiais de monta, com rugosidades  $R_a$  inferiores a 2 nm e P-V em torno de 20 nm.

Com relação aos ensaios realizados em ZnS e Cleartran, uma comparação entre as propriedades mecânicas destes materiais mostra que, embora os dois sejam quimicamente idênticos, a dureza do Cleartran é em torno de 35 % menor que a do ZnS, e que sua resistência à ruptura é aproximadamente 25 % inferior à do ZnS. Com base nos valores de dureza e resistência à ruptura, e considerando que o fator de processo  $\beta$  e o módulo de elasticidade  $E$  permanecem constantes para os dois materiais comparados, através da equação 2.6 verifica-se que a profundidade de penetração crítica para os mesmos tem valor semelhante. A análise dos resultados de qualidade superficial de ensaios comparativos de usinagem tanto de torneamento quanto de "fly-cutting" mostra, entretanto, que no Cleartran é mais freqüente a ocorrência de "pittings" e que as rugosidades são significativamente piores, para as mesmas condições de usinagem. Uma

observação mais acurada deste fato leva à conclusão que, além das propriedades mecânicas dos materiais ensaiados, também o tamanho de grão, orientação cristalina e demais características cristalográficas exercem uma importante influência sobre o resultado final do trabalho. Enquanto no ZnS o tamanho médio de grão encontra-se na ordem de 5  $\mu\text{m}$ , no Cleartran sua dimensão é em torno de cinco vezes maior, sendo que no Cleartran são também observadas estruturas semelhantes a macias no contorno dos grãos, o que pode levar a uma perturbação do estado de tensões de compressão necessário para o sucesso da usinagem dúctil de materiais de comportamento frágil. Também uma análise de fratura do ZnS e do Cleartran mostra que neste último material a região da fratura apresenta-se irregular e com a orientação cristalina mais evidente que no caso do ZnS, o que leva a suportar drásticos processos de recristalização em função do processo de fabricação do material (figura 6.20). Assim, pode-se esperar uma maior incidência de danos superficiais e maiores valores de rugosidade na usinagem com diamante do Cleartran, o que de fato é verificado.

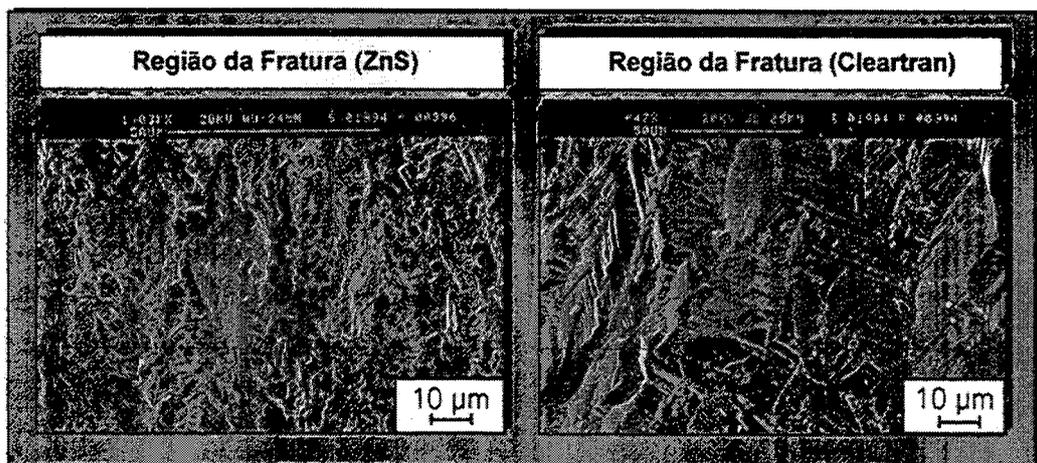


Figura 6.20 - Região da fratura em ZnS e Cleartran

Em ensaios de torneamento sob condições otimizadas, quais sejam, com os parâmetros de usinagem que mostraram trazer a melhor qualidade superficial, foram obtidas superfícies de ZnS com rugosidades  $R_a$  de 1,2 nm e P-V de 11 nm, sendo a superfície gerada livre de "pittings". Já os resultados de usinagem com Cleartran mostram rugosidades  $R_a$  de 1,9 nm e P-V de 19 nm, com superfícies não totalmente livres de "pittings", mas ainda assim com qualidade considerada óptica. Estes resultados mostram

que, apesar das pequenas diferenças de qualidade superficial entre os cristais infravermelhos analisados, com ambos é possível a usinagem em regime dúctil e fabricação de elementos ópticos de qualidade extrema através da tecnologia de usinagem com diamante monocristalino.

## **6. 2. Influências sobre as Forças na Usinagem**

Devido à semelhança entre o comportamento das forças ocorridas durante a usinagem dos diferentes cristais infravermelhos e do espaço necessário à apresentação de todos os resultados obtidos, a análise da variação das componentes de força em função das grandezas variadas é realizada preferencialmente para o ZnS. Em caso de discrepâncias entre as tendências observadas para os diferentes materiais de ensaio, as mesmas são discutidas individualmente.

### **6.2.1. Avanço**

Pesquisas realizadas na usinagem convencional de materiais metálicos mostram que incrementos no avanço levam a um aumento não linear tanto da força de corte como da força passiva [116]. Segundo Drescher e Dow [145] e Spenrath [1], este comportamento é verificado também na usinagem de ultraprecisão de materiais metálicos, embora sejam encontrados resultados de pesquisa neste campo onde o crescimento das componentes de força na usinagem de ultraprecisão se dá de forma praticamente linear, dentro de certos limites de avanço [8, 93]. De uma forma geral, verifica-se que apenas para avanços muito pequenos as forças de corte e passivas tendem a comportar-se não linearmente, enquanto que a partir de um certo valor de avanço este crescimento torna-se praticamente linear, e também que as forças de corte tem um crescimento mais acentuado que as forças passivas, à medida que os avanços tornam-se maiores [44, 93, 131, 145]. As forças passivas tendem, inclusive, a praticamente não sofrerem alterações a partir de um certo valor de avanço [1, 13].

Assim como na usinagem convencional e na usinagem de ultraprecisão de materiais metálicos, na usinagem de ultraprecisão dos cristais infravermelhos ensaiados o avanço

mostra ter uma significativa influência sobre as componentes da força de usinagem. Esta influência mostra-se, de maneira geral, sob a forma de um crescimento não proporcional no nível de forças para incrementos no avanço, que entretanto apresenta algumas particularidades para cada diferente material e para as diversas geometrias de ferramenta e demais grandezas de trabalho. Apesar destas particularidades no comportamento das forças em relação ao avanço para cada diferente condição de trabalho, algumas generalizações podem ser feitas. Verifica-se, por exemplo, que incrementos no avanço exercem uma influência mais marcante sobre a força de corte do que sobre a força passiva. Enquanto para pequenos avanços a força passiva tende a dominar, ou seja, apresente valores absolutos mais elevados que a força de corte, com o aumento do avanço a força de corte tende a um crescimento constante, sendo que as forças passivas crescem de maneira mais suave. Pode-se inclusive verificar uma tendência de estagnação nos valores de força passiva acima de um determinado avanço, enquanto que as forças de corte tendem a crescer continuamente, de um modo similar ao observado na usinagem de ultraprecisão de materiais metálicos (figuras 6.21).

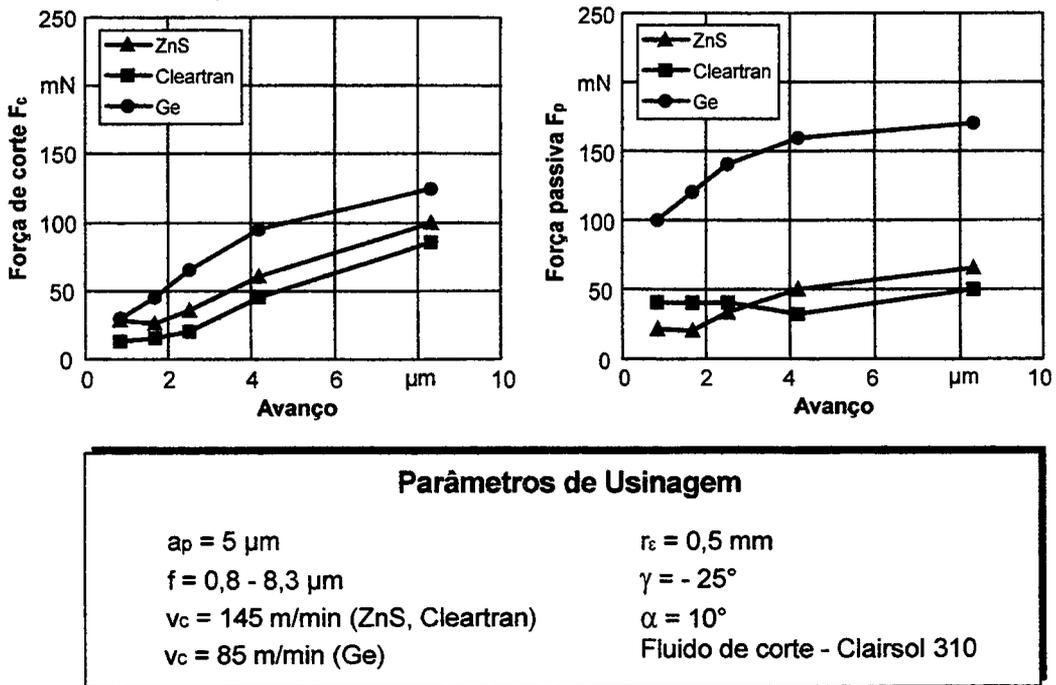
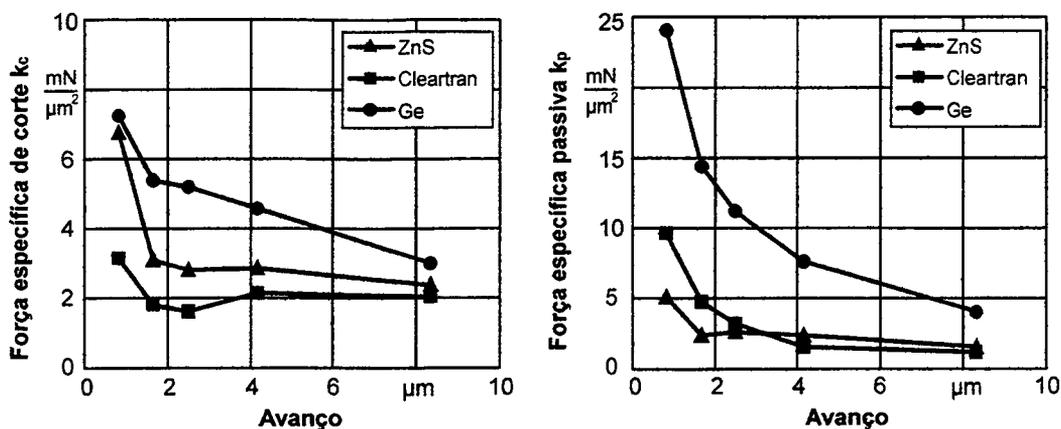


Figura 6.21 - Influência do avanço sobre as forças na usinagem

A análise das forças específicas de corte e passiva mostra que, para todos os materiais ensaiados e sob todas as condições de ensaio, é também possível verificar que, abaixo de um determinado valor de avanço, ocorre um crescimento hiperproporcional das componentes de força específica, ou seja, as forças por unidade de área tornam-se maiores. A região de avanço onde este fenômeno ocorre é principalmente dependente do material ensaiado, da profundidade de corte e do raio de quina da ferramenta, sem que se possa entretanto desconsiderar os efeitos que o ângulo de saída, raio de gume, fluido de corte, vibrações da máquina-ferramenta e demais variáveis de trabalho exercem sobre os resultados de força. Na usinagem de ultraprecisão de ZnS, Cleartran e Ge, por exemplo, a região de avanços onde ocorre o início do aumento hiperproporcional nas forças específicas de corte encontra-se entre 1 e 8  $\mu\text{m}$ , com uma tendência a ocorrer para avanços menores no caso do Cleartran e para avanços maiores para Ge. Para todos os materiais ensaiados este ponto de inflexão desloca-se em direção a valores maiores de avanço quando ocorrem aumentos no raio de gume e aumentos no sentido negativo do ângulo de saída da ferramenta.

Com relação ao comportamento das forças específicas passivas na usinagem de ultraprecisão dos cristais infravermelhos ensaiados, verifica-se que o aumento hiperproporcional da força específica para variações de avanço ocorre para avanços mais baixos que para a força específica de corte, tendendo entretanto a um crescimento mais rápido (**figura 6.22**). Semelhantemente ao que ocorre com as forças específicas de corte, também as forças específicas passivas sofrem influência, além do avanço, das demais grandezas de trabalho, como por exemplo das características geométricas da ferramenta. Alterações tanto do raio de quina quanto do ângulo de saída levam a um deslocamento do ponto onde se inicia o aumento hiperproporcional da força específica passiva. Como no caso das forças específicas de corte, as forças específicas passivas aumentam subitamente para maiores valores de avanço no caso de maiores raios de quina e ângulos de saída mais negativos.



### Parâmetros de Usinagem

$a_p = 5 \mu\text{m}$

$f = 0,8 - 8,3 \mu\text{m}$

$v_c = 145 \text{ m/min}$  (ZnS, Cleartran)

$v_c = 85 \text{ m/min}$  (Ge)

$r_e = 0,5 \text{ mm}$

$\gamma = -25^\circ$

$\alpha = 10^\circ$

Fluido de corte - Clairsol 310

**Figura 6.22** - Influência do avanço sobre as forças específicas

O crescimento das forças específicas para avanços progressivamente menores, observado por diversos pesquisadores na usinagem de ultraprecisão e denominado de "size-effect", e que domina o sistema de forças para espessuras de usinagem submicrométricas, pode ser explicado pelo empobrecimento de discordâncias com capacidade de movimentação ou por um bloqueio de discordâncias que ocorre com mais frequência à medida que diminuem as espessuras de usinagem [1, 46, 52, 64, 71, 142, 159]. Este efeito, verificado na usinagem de materiais metálicos com ferramentas de diamante, é verificado também na usinagem de ultraprecisão de materiais de comportamento frágil, como os cristais infravermelhos ensaiados, favorecendo inclusive a usinagem dúctil destes materiais. Conforme abordado anteriormente no item 2.3, para a usinagem dúctil de materiais frágeis é necessário um estado de tensões de compressão elevado na região do gume da ferramenta, o que por sua vez é favorecido por forças específicas mais elevadas [43].

### 6.2.2. Profundidade de corte

Segundo König [116], na usinagem convencional com ferramentas de geometria definida ocorrem aumentos lineares nas forças de corte e passivas à medida que a profundidade de corte sofre incrementos. Isto é válido, entretanto, apenas quando as profundidades de corte tem uma dimensão maior do que o raio de quina da ferramenta. Este crescimento linear das componentes de força foi também observado por Drescher e Dow [145] na usinagem de ultraprecisão de ligas de cobre e de alumínio, e por Iwata et al [8] na usinagem de cobre OFHC com ferramentas de diamante, para profundidades de corte relativamente grandes. Também Carroll et al [153] puderam verificar que a força de corte cresce linearmente para profundidades de corte acima de 5  $\mu\text{m}$ , na usinagem de ligas de alumínio de aviação. Para profundidades de corte abaixo deste valor, entretanto, foi observado um comportamento não linear das forças. Esta não linearidade nas componentes de força para pequenas profundidades de corte é um fenômeno confirmado por diversos pesquisadores na usinagem com ferramentas de diamante de diferentes materiais metálicos.

A análise sistemática das componentes de força na usinagem de ultraprecisão mostra que, de uma forma geral, tanto as forças de corte quanto as passivas apresentam um comportamento praticamente linear acima de um determinado valor de profundidade de corte, enquanto que abaixo de um certo limite as componentes de força apresentam uma variação não linear [8, 46, 64, 93, 142, 145, 153, 159, 160]. Assim, o comportamento das forças na usinagem de ultraprecisão para variações na profundidade de corte mostra uma grande analogia com o que se observa para variações de avanço [1, 182], com a ressalva que, ao contrário do que ocorre para aumentos de avanços, as forças passivas tendem a crescer continuamente para aumentos na profundidade de corte.

Com relação à variação das forças específicas de corte e passiva, com a diminuição da profundidade de corte é verificado um aumento hiperproporcional tanto da força de corte quanto da força passiva, semelhantemente ao que ocorre para avanços gradualmente menores. Ensaios de usinagem com diamante realizados por Furukawa e Moronuki [142] em diversos materiais metálicos e não metálicos mostram que este crescimento hiperproporcional da força de corte, ou "size-effect", inicia-se para profundidades de corte

normalmente abaixo de 3  $\mu\text{m}$ . Este limite é influenciado pelo material da peça e, conseqüentemente, por suas propriedades físicas e mecânicas, pelo grau de afiação e geometria da ferramenta, forma dos cavacos e por outras variáveis de trabalho. O "size-effect", responsável pela forma hiperbólica das curvas de forças específicas característica na usinagem de ultraprecisão onde as espessuras de usinagem encontram-se no âmbito submicrométrico, foi observado também por Spennath [1], Kroos [13] e Rhores [70], na usinagem de cobre OFHC, e por Stevens et al [160], em ligas de cobre-telúrio, entre outros.

Através dos ensaios de força realizados em cristais infravermelhos, é possível verificar que, da mesma forma que na usinagem de ultraprecisão de materiais metálicos, a profundidade de corte tem uma influência marcante tanto sobre as forças de corte quanto sobre as forças passivas. O comportamento das forças mostra uma boa linearidade a partir de uma determinada profundidade de corte, que varia em função do material usinado, da geometria da ferramenta e das demais variáveis de processo (figuras 6.23).

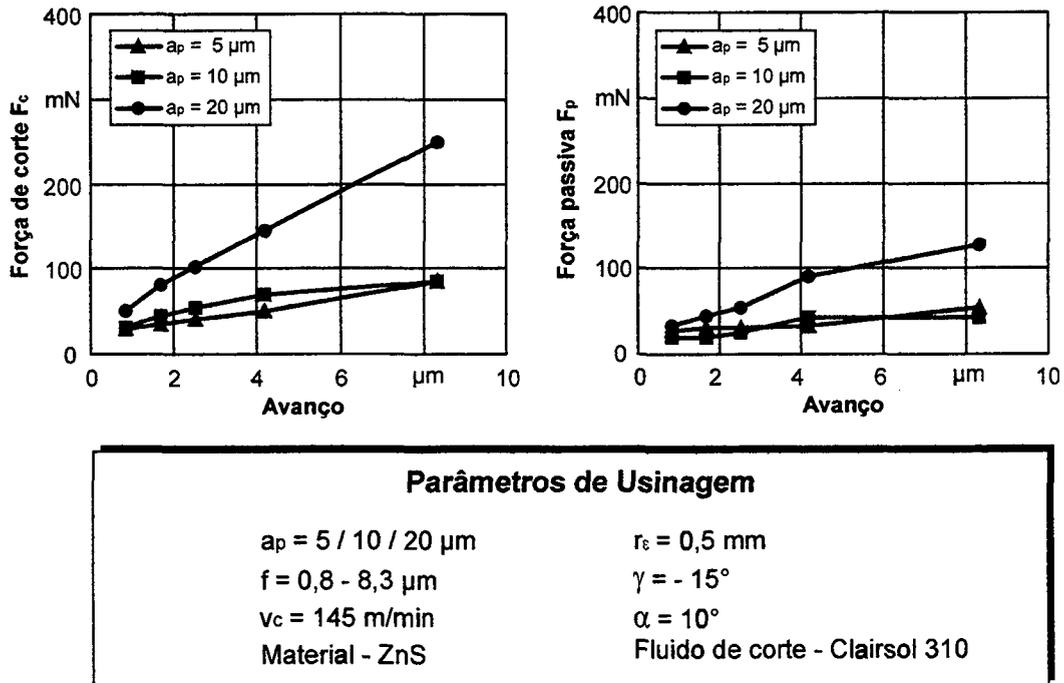


Figura 6.23 - Influência da profundidade de corte sobre as forças na usinagem

O crescimento hiperproporcional das forças específicas para pequenas profundidades de corte ("size-effect") é também observado na usinagem dos materiais de comportamento frágil ensaiados, e de forma geral o comportamento das curvas de forças específicas para variação das profundidades de corte tem semelhança com as curvas de força específica ocorrida para uma variação dos avanços. O limite onde se inicia o "size-effect" varia fortemente com os parâmetros de trabalho, geometria da ferramenta e demais variáveis de processo, e é observado normalmente para profundidades de corte abaixo de  $5 \mu\text{m}$ , quando os avanços escolhidos encontram-se em valores usuais na usinagem de ultraprecisão de elementos ópticos transmissivos em materiais duros e frágeis (figura 6.24).

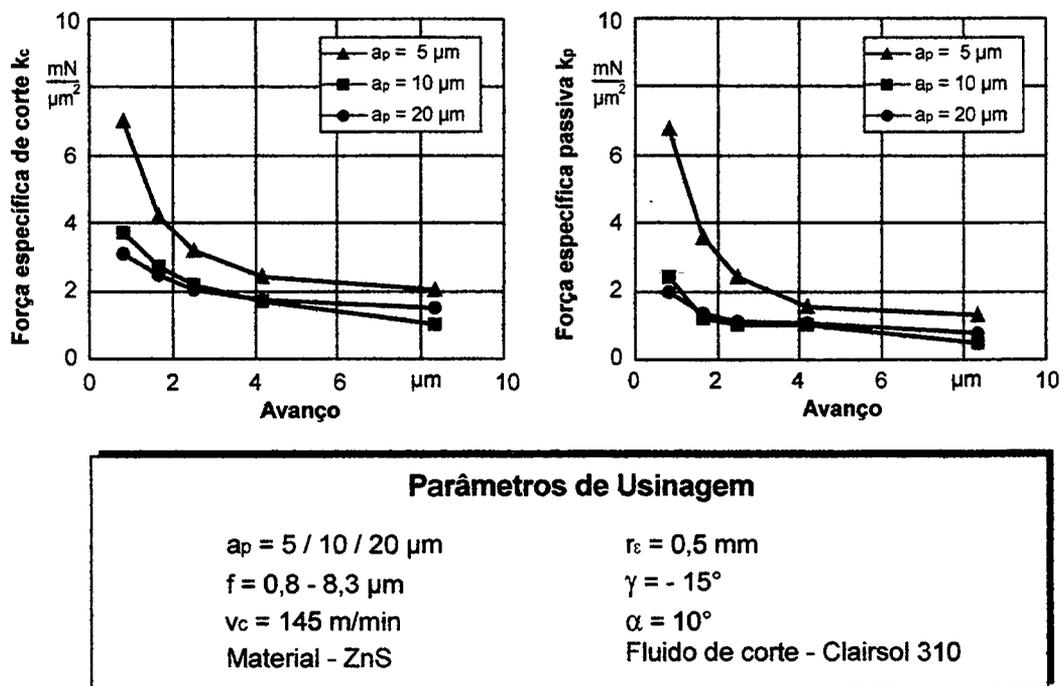


Figura 6.24 - Influência da profundidade de corte sobre as forças específicas

### 6.2.3. Velocidade de corte

Diversas pesquisas realizadas no campo da usinagem de ultraprecisão de ligas metálicas mostram que as componentes da força de usinagem sofrem pouca ou nenhuma influência das alterações de velocidade de corte, dentro dos limites usuais de trabalho. Resultados nestes sentido são apresentados, entre outros, por Spennath [1], Kroos [13] e Iwata et al

[8], para a microusinagem de cobre OFHC, por Sugano e Takeushi [146] na usinagem de ligas de alumínio e Drescher e Dow [145], para ligas de alumínio e cobre OFHC. Segundo Osenberg e Weinz [149], entretanto, na usinagem de ultraprecisão de algumas ligas metálicas com velocidades de corte muito pequenas podem ocorrer acréscimos nas componentes da força de usinagem. Estes resultados conflitam com os obtidos por Sugano e Takeushi [146], que na usinagem de ligas de alumínio verificaram decréscimos nas forças de corte para diminuição da velocidade de corte, embora as componentes de força passiva não sofressem alterações.

A exemplo do que ocorre na usinagem de ultraprecisão de metais não ferrosos, também para os cristais infravermelhos pesquisados a velocidade de corte não apresenta influência significativa sobre as forças de corte força passivas, dentro dos limites de velocidade de corte testados. As pequenas diferenças observadas nos resultados de força para diferentes velocidades de corte encontram-se dentro das dispersões de resultado que normalmente ocorrem em ensaios deste tipo, e devem ser relacionadas mais à incerteza de medição do que a fatores tecnológicos. A constância no nível de forças ao longo de um largo espectro de velocidades de corte permite, portanto, esperar que as variações de condições de corte no processo de torneamento, onde existe uma grande variação de velocidade de corte devido à variação do diâmetro, permaneça dentro de limites que favoreçam a obtenção de qualidade constante em toda a superfície usinada.

#### **6.2.4. Fluido de corte**

Na usinagem de ultraprecisão com ferramentas de diamante é feita, em princípio, a divisão dos trabalhos em "a seco" ou "com fluido de corte". Estes fluidos de corte devem cumprir as seguintes funções:

- Redução do desgaste da ferramenta através da redução do atrito na face e na superfície de incidência;
- Evitar o surgimento de gume postiço;
- Retirar o calor gerado na região de corte;
- Facilitar a retirada dos cavacos da zona de trabalho.

A redução do atrito e o impedimento da formação de gume postiço têm, também, influência sobre as forças na usinagem. Um maior atrito apresenta efeitos negativos não somente sobre o desgaste da ferramenta de corte, mas também faz com que as componentes de força sejam maiores [110].

Diversos autores mostram que os níveis de força na usinagem de ultraprecisão são influenciados pelo emprego de fluido de corte [1, 110, 149, 153]. Para cortes a seco normalmente tem-se forças superiores às que surgem durante a usinagem com emprego de fluido de corte para as mesmas condições de corte, e em alguns casos esta diferença chega a ser de uma ordem de grandeza. Este fato deve ser observado criticamente, já que um aumento das forças pode trazer um aumento nas vibrações no sistema ferramenta-máquina-ferramenta e, com isto, ter conseqüências negativas sobre o resultado final de trabalho. Também a capacidade de remover os cavacos através do uso de fluido de corte deve ser considerada, já que principalmente em processos onde há uma tendência de formação de cavacos contínuos a não retirada dos mesmos da região de corte pode causar uma diminuição na qualidade superficial da peça tanto pelo esmagamento de cavacos entre a ferramenta e a peça quanto através de aumentos súbitos nas forças decorrentes do desprendimento destes cavacos [110].

Outra característica importante que se deve objetivar nos fluidos de corte em operações de usinagem de ultraprecisão é a sua capacidade de evaporar da superfície sem deixar elementos residuais sobre a mesma, de modo a tornar desnecessária uma limpeza posterior da superfície gerada. O calor de vaporização do fluido deve, entretanto, ser baixo, para que a peça não sofra grandes variações de temperatura, que podem refletir-se sobre a qualidade final de forma. Além disto, fluidos de corte devem ter propriedades químicas compatíveis com o material usinado, ou seja, não deve haver uma reação química entre fluido e peça, o que pode ter conseqüências negativas sobre as características superficiais da mesma [1].

Em ensaios realizados por Osenberg e Weinz [149] e por Carroll et al [153], foi verificado que o emprego de fluido de corte em operações de usinagem com diamante monocristalino para alguns dos metais usualmente empregados na usinagem de ultraprecisão normalmente acarreta um decréscimo no nível de forças de corte. Este

decréscimo, diferente para os diferentes materiais usinados e para os diversos fluidos de corte utilizados, é na ordem de 30%, de um modo geral. Já Spennath [1] observou que o emprego de fluido de corte na usinagem de cobre OFHC com diamante tem influência não somente sobre o nível estático das forças na usinagem, mas principalmente sobre suas componentes dinâmicas, o que pode inclusive levar a que a superfície gerada por usinagem de ultraprecisão sem fluido de corte não tenha mais características ópticas. Embora as forças na microusinagem de cobre OFHC sejam influenciadas pelo uso de fluido de corte ou não, o tipo de fluido de corte empregado aparenta ter uma importância relativamente pequena sobre o nível de forças. Em ensaios sistemáticos realizados com cinco dos fluidos de corte mais empregados em operações de usinagem de ultraprecisão não foi possível verificar diferenças significativas entre o nível de força passiva e de corte para os diferentes tipos de fluido de corte [1].

Assim como na usinagem de metais não ferrosos com ferramentas de diamante, na usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos verifica-se uma influência do uso de fluido de corte sobre o nível das componentes da força de usinagem. No caso da utilização de Clairsol 310 aplicado em forma de névoa, observa-se um decréscimo tanto na força passiva quanto na força de corte, em relação a ensaios realizados a seco (**figura 6.25**). As diferenças no nível estático de forças são maiores, em termos percentuais, para avanços menores, visto que a componente de atrito, grandemente afetada pelo emprego de fluido de corte, tem maior peso para pequenos avanços. Também é possível verificar um aumento na diferença entre os picos máximos e mínimos de força durante a usinagem a seco de cristais infravermelhos, o que leva a supor uma dinâmica de processo maior, com possíveis conseqüências sobre a qualidade superficial da peça usinada.

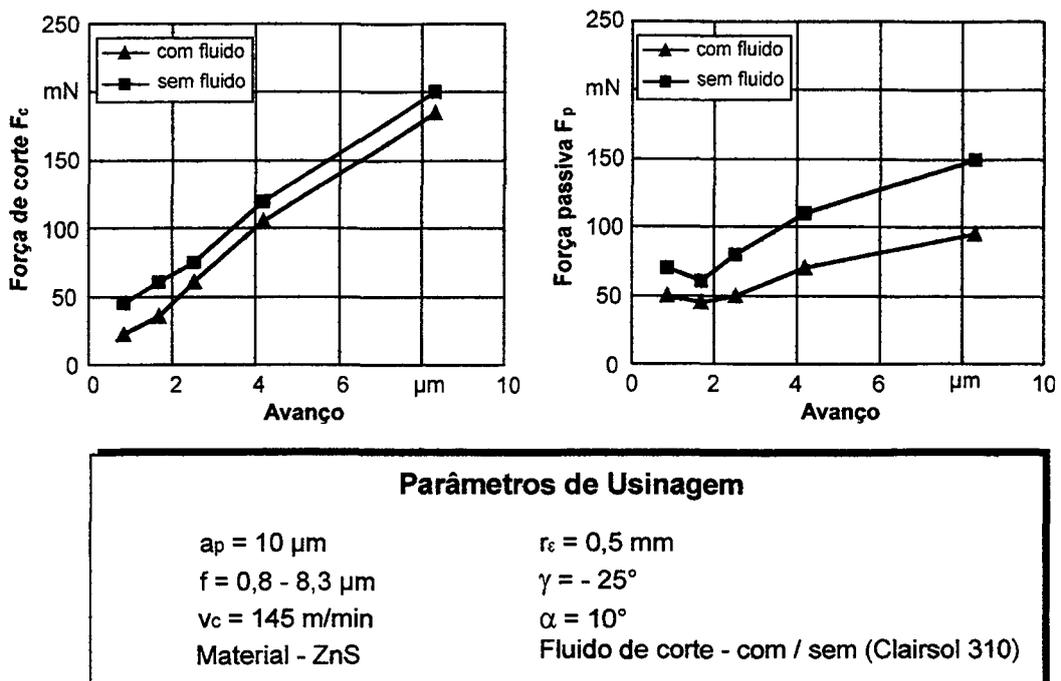


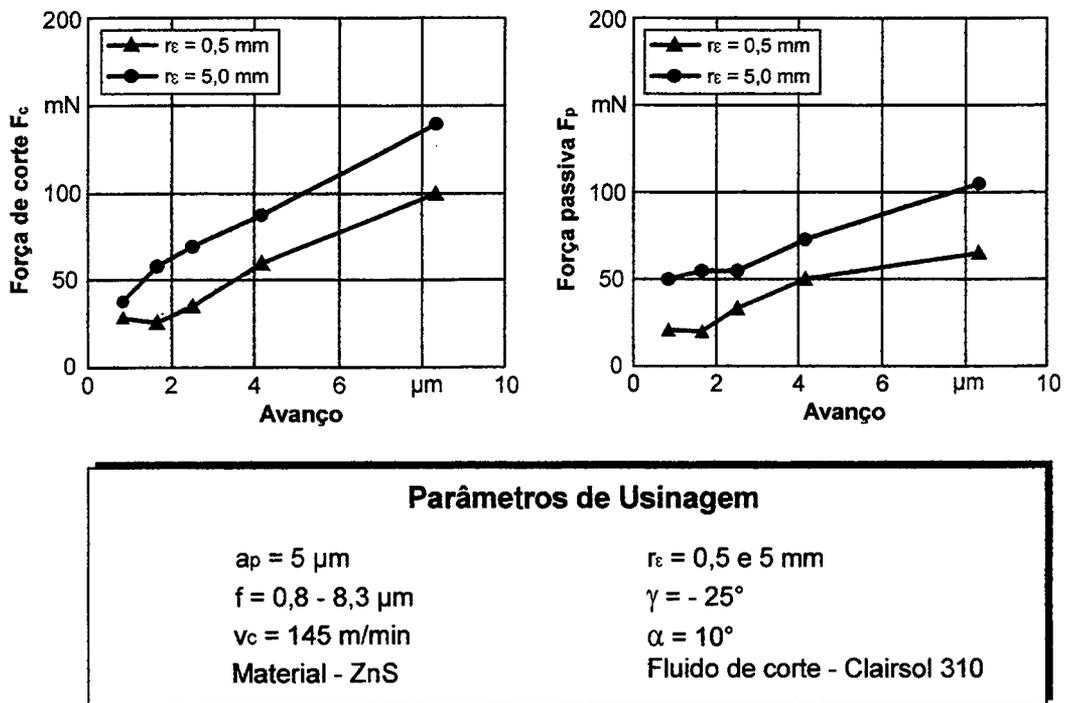
Figura 6.25 - Influência do fluido de corte sobre as forças de corte e passiva

### 6.2.5. Raio de quina

Em operações de usinagem nas quais o raio de quina tem uma dimensão significativamente maior que o avanço e a profundidade de corte, como é o caso da usinagem de ultraprecisão, o raio de quina mostra uma influência clara sobre as componentes da força de usinagem. Resultados de ensaios neste sentido são apresentados, entre outros, por Spenrath [1], Kroos [13] e por Hartel [5], para a usinagem de cobre OFHC. As forças passivas podem sofrer aumentos de mais de 100% para alterações de raio de quina de 0,5 mm para 2 mm, por exemplo, enquanto que as forças de corte sofrem um aumento menos drástico (na ordem de 30%), para a mesma variação no raio de quina [1, 5]. A explicação para este fato pode ser encontrada na variação da forma do cavaco formado para diferentes raios de quina da ferramenta (vide figura 2.14). Como para pequenos  $r_\epsilon$  o comprimento de contato entre a ferramenta e a peça usinada é menor que para grandes  $r_\epsilon$ , para uma mesma seção de cavaco, o atrito por unidade de área usinada cresce para aumentos no raio de quina, assim como a região de corte do material usinado.

O atrito tem uma influência mais forte sobre a componente passiva do que sobre a força de corte, o que justifica o crescimento mais pronunciado da força passiva do que a de corte, para aumentos progressivos no raio de quina. Ao lado da componente de atrito que resulta em função de incrementos no raio de quina da ferramenta, resulta também uma maior região de corte para maiores raios de quina. A conseqüente diminuição da espessura de usinagem que advém deste fato leva a uma maior plastificação do material usinado, o que implica também em maiores forças durante a usinagem. Este fenômeno tem conseqüências tanto sobre a força de corte quanto sobre a força passiva.

Na usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos, verifica-se que o raio de quina tem também uma forte influência sobre a grandeza das forças de usinagem. Tanto a força de corte quanto a força passiva sofrem aumentos marcantes quando o raio de quina da ferramenta é aumentado (**figuras 6.26**). Observa-se, entretanto, que as variações que ocorrem nas componentes da força de usinagem para os diferentes raios de quina durante a usinagem dos materiais ensaiados são inferiores às observadas por Spennath [1] na usinagem de ultraprecisão de cobre OFHC. Este fato pode ser creditado à diferença de propriedades físicas e mecânicas que existe entre materiais metálicos e cristais infravermelhos. Enquanto em materiais metálicos é verificada predominantemente uma plastificação do material durante o processo de usinagem, o comportamento de cristais infravermelhos é basicamente frágil.



**Figura 6.26** - influência do raio de quina sobre as forças na usinagem

A variação do raio de quina na usinagem de materiais duros e frágeis mostra, assim como na usinagem de materiais metálicos, uma influência sobre o comportamento das forças específicas. Uma análise da influência do raio de quina sobre as componentes de força específica realizada por Spennath [1] em cobre OFHC mostra que as forças específicas, além de serem maiores para maiores raios de quina, tem o início do seu comportamento hiperproporcional ("size-effect") deslocado para maiores avanços, à medida que se aumentam os raios de quina. Tal comportamento é verificado também na usinagem com diamante dos cristais infravermelhos ensaiados (figura 6.27).

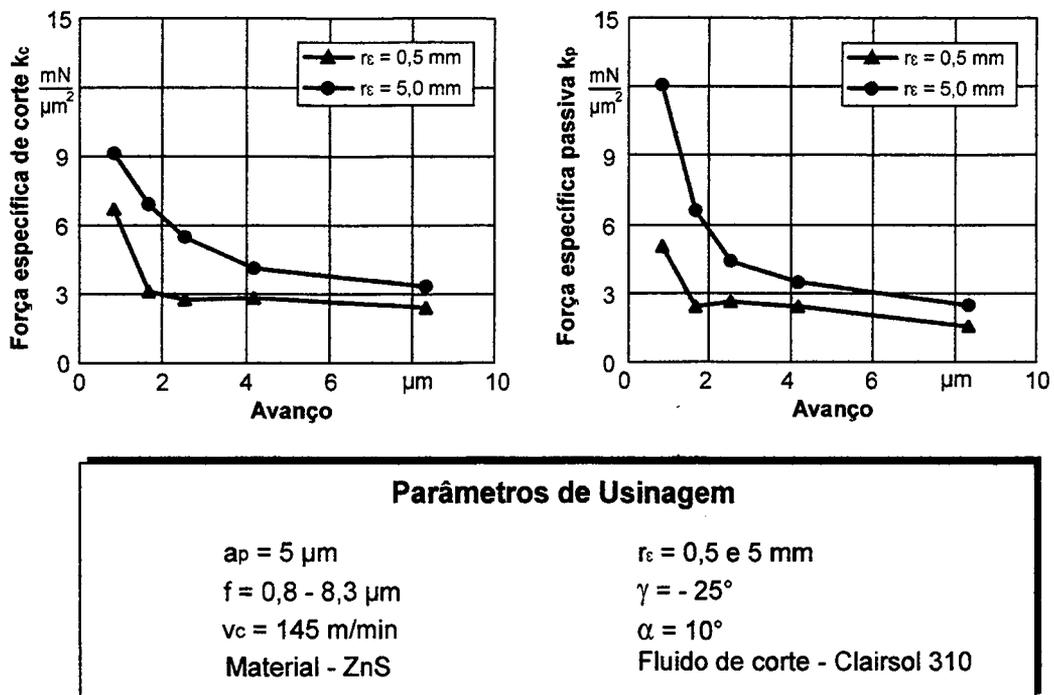


Figura 6.27 - Influência do raio de quina sobre as forças específicas

### 6.2.6. Ângulo de saída

A análise sistemática da influência do ângulo de saída sobre as componentes de força durante a usinagem foi realizada por diversos pesquisadores tanto na área de usinagem convencional quanto de ultraprecisão, com resultados bastante semelhantes. Resultados obtidos por König et al [116, 183] e por Victor [162] na usinagem convencional com ferramentas de geometria definida mostram que para cada grau de alteração no ângulo de saída ocorre uma variação de aproximadamente 1,5% na força de corte e de aproximadamente 4% na força passiva. Para aumentos negativos no ângulo de saída ambas as componentes de força crescem, ou seja, em ferramentas onde o ângulo de saída é positivo as forças tanto de corte quanto passivas são menores que no caso de ferramentas com ângulos de saída negativos.

Em ensaios de usinagem com diamante realizados por Carroll et al [153], Osenberg e Weinz [149] e Lucca e Seo [131] em diferentes ligas metálicas, verifica-se que as componentes da força de usinagem aumentam à medida que os ângulos de saída tomam-

se mais negativos, de modo similar ao que ocorre na usinagem convencional. É possível verificar inclusive que o valor das alterações de força para variações no ângulo de saída durante a usinagem de ultraprecisão de materiais metálicos coincide aproximadamente com as usualmente observadas na usinagem convencional.

Na usinagem de ultraprecisão de materiais de comportamento duro e frágil são normalmente empregadas ferramentas com ângulos de saída fortemente negativos, já que com esta geometria a qualidade superficial obtida é freqüentemente melhor. Isto ocorre porque nestes materiais objetivam-se grandes pressões de compressão na região de corte, de modo a evitar as tensões de tração na superfície, que causam trincas e falhas superficiais e subsuperficiais, conforme já descrito no item 2.3.

O comportamento das forças na usinagem de cristais infravermelhos mostra que existe, assim como na usinagem convencional, uma dependência entre o ângulo de saída e as forças de corte e passiva. Esta relação mostra-se mais evidente para avanços maiores, onde as forças de corte e passivas para ferramentas com  $\gamma = -25^\circ$  chegam a ser mais de 100% maiores que para ferramentas com  $\gamma = 0^\circ$  (**figura 6.28**). Isto representa variações na ordem de 4% tanto para a força de corte quanto para a força passiva por cada grau de variação no ângulo de saída. Enquanto os resultados de força passiva na usinagem de cristais infravermelhos mostram uma boa semelhança com os que ocorrem na usinagem convencional e de ultraprecisão de materiais metálicos, a influência do ângulo de saída sobre as forças de corte na usinagem dos materiais frágeis ensaiados com ferramentas de diamante mostra-se maior que na microusinagem de materiais dúcteis. Motivo para isto pode ser a maior parcela de comportamento dúctil que ocorre na usinagem de materiais frágeis à medida que o ângulo de saída torna-se mais negativo.

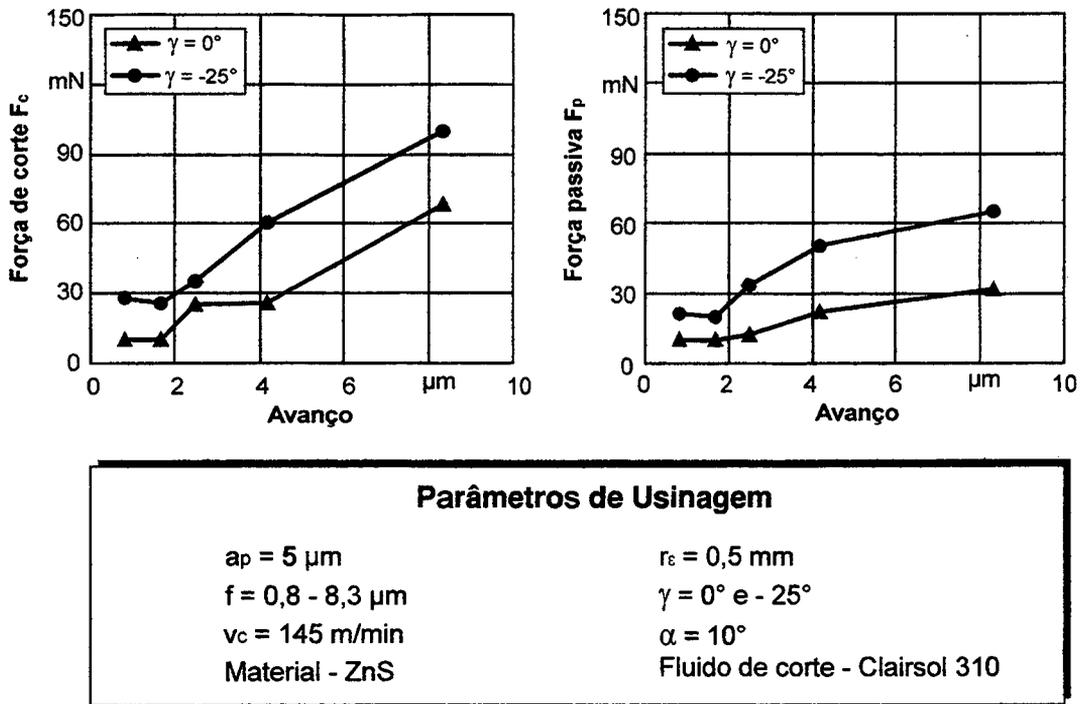


Figura 6.28 - Influência do ângulo de saída sobre as forças na usinagem

Para avanços progressivamente menores verifica-se que a diferença que existe entre a força de corte e passiva para ângulos de saída diferentes torna-se cada vez menor, a ponto de em alguns casos deixar de existir a partir de uma certa região de avanço. Isto pode ser explicado pelo fato de que, em condições onde o raio de gume da ferramenta assume valores na mesma ordem de grandeza que a espessura de corte  $h_{cu}$ , o ângulo de saída efetivo, definido pelo raio de gume e portanto fortemente negativo, independe do ângulo de saída nominal (figura 6.29).

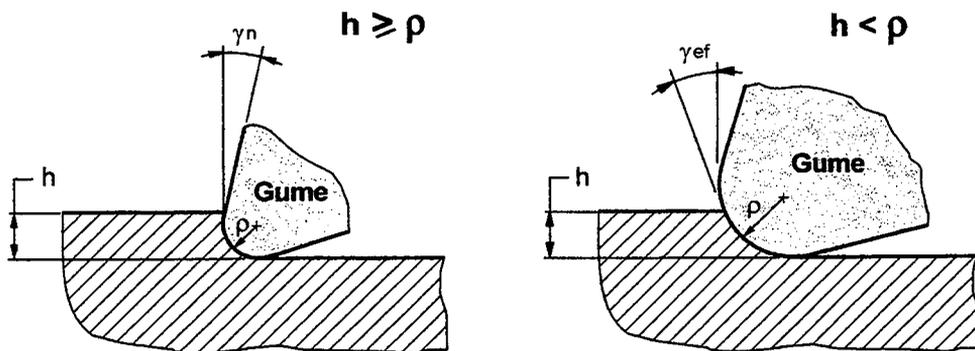


Figura 6.29 - Relação entre o ângulo de saída efetivo e nominal para pequenos  $h_{cu}$

Uma análise das forças específicas de corte e passiva mostra que o comportamento das curvas de força específica é influenciado pelas alterações no ângulo de saída, de um modo semelhante ao que ocorre para as variações no raio de quina da ferramenta. Para ângulos de saída fortemente negativos ( $\gamma = -25^\circ$ , por exemplo) o crescimento das forças específicas para um mesmo intervalo de avanços é mais brusco, sendo que o "size-effect" tem seu início para avanços gradualmente maiores à medida que os ângulos de saída tornam-se mais negativos (figura 6.30).

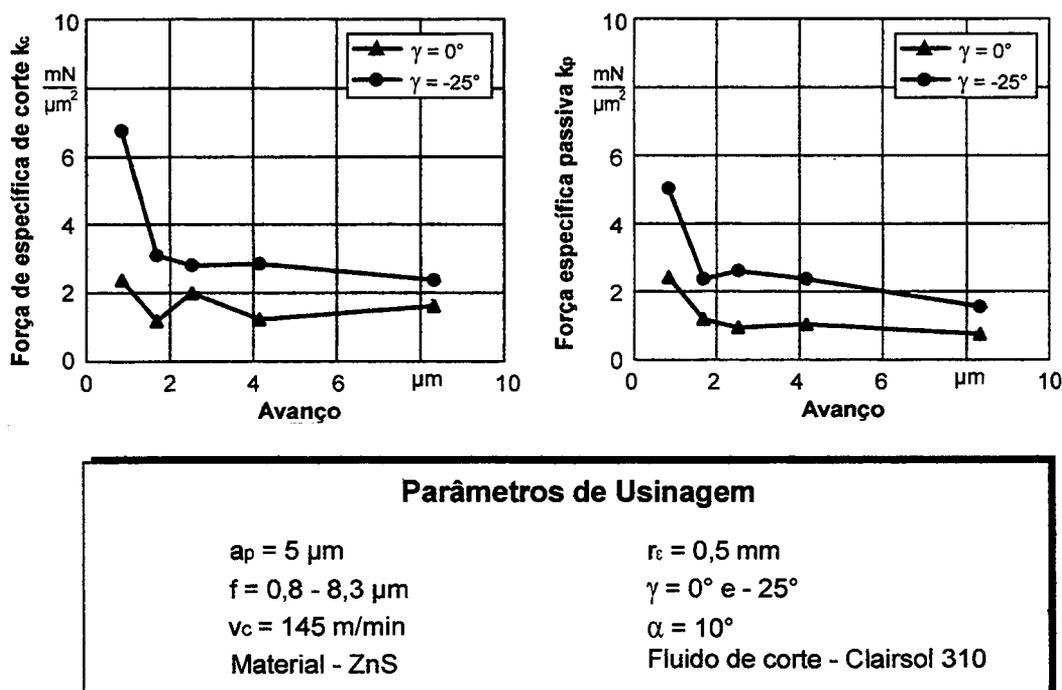


Figura 6.30 - Influência do ângulo de saída sobre as forças específicas

### 6.2.7. Desgaste e raio de gume

Diversos pesquisadores envolveram-se nos últimos anos com a análise da influência do desgaste de ferramentas de diamante sobre as componentes de força na usinagem de precisão e de ultraprecisão. A importância deste estudo reside no fato de que, com o incremento das forças que normalmente é possível observar à medida que progride o desgaste em uma ferramenta, ocorrem aumentos na dissipação de potência durante o processo, o que por sua vez causa aumentos de temperatura e, conseqüentemente,

maiores problemas com a qualidade de forma da peça em função de dilatação térmica [157]. Também o aumento de vibrações causado por maiores forças na usinagem pode levar a uma diminuição na qualidade final da peça, por aumentos na rugosidade da superfície gerada.

Através da observação do comportamento da grandeza e direção da força de usinagem é possível monitorar o desgaste da ferramenta também na usinagem de ultraprecisão, de modo que o nível das componentes de força pode ser adotado como um critério para definir indiretamente o fim da vida de uma ferramenta [146]. Este comportamento das forças em função do desgaste deve, entretanto, ser estudado para os diferentes materiais usinados e condições de trabalho, visto que os mecanismos de desgaste não são idênticos para todos os materiais nem as exigências de qualidade final de trabalho são as mesmas para todos os casos. Assim sendo, o nível das forças de corte e passiva, bem como a seu comportamento dinâmico, têm também particularidades para cada caso de fabricação através da tecnologia de usinagem de ultraprecisão.

Em pesquisas realizadas na microusinagem de ligas de alumínio, Bex [113] observou a existência de uma estreita relação entre a progressão do desgaste e os incrementos na força passiva. Segundo este pesquisador os incrementos nesta componente da força de usinagem podem chegar a valores acima de 1000% dos verificados para ferramentas novas, ao longo do tempo de utilização da ferramenta. Resultados semelhantes são mostrados por Masuda et al [154] e Sugano e Takeushi [146], também na usinagem de ligas de alumínio, por Ikawa et al [44] e Warziniak e Patz [184], na usinagem de cobre OFHC e por Loe-A-Foe et al [78], na usinagem de ligas de latão e alumínio. Alguns destes pesquisadores também observam o comportamento das forças de corte que, da mesma forma que as forças passivas, aumentam com a progressão do desgaste. Entretanto, enquanto as forças passivas têm um aumento marcante, as forças de corte apresentam um crescimento mais suave em dependência do desgaste. Segundo Stevens et al [160], esta diferença de comportamento entre as forças de corte e passiva torna-se cada vez mais pronunciada à medida em que se diminui a profundidade de corte. Em ensaios e simulação do processo de usinagem de ultraprecisão de cobre OFHC, estes autores verificaram que para profundidades de corte abaixo de 1  $\mu\text{m}$  ocorrem aumentos exponenciais na força passiva para ferramentas desgastadas, enquanto que a força de

corte mantém um comportamento linear. Para profundidades de corte acima de 1  $\mu\text{m}$ , entretanto, os resultados de força mostram uma dependência relativamente pequena do estado de desgaste da ferramenta, ao contrário do observado por outros pesquisadores. Resultados semelhantes foram obtidos por Lucca e Seo [131], na usinagem de ultraprecisão de ligas de cobre-telúrio.

Através de ensaios sistemáticos realizados por Oomen e Eisses [53] em diversos materiais metálicos de importância no campo da usinagem de ultraprecisão, como ligas de cobre e de alumínio e níquel eletrolítico, observa-se que o comportamento das forças na usinagem com diamante é dependente do tipo de desgaste que ocorre na ferramenta. Principalmente formas de desgaste que levam a um arredondamento do gume de corte causam um incremento pronunciado nas forças passivas, e aumentos mais suaves nas forças de corte. Em ensaios comparativos entre ferramentas de diamante policristalino e monocristalino realizados em cobre OFHC por Iwata et al [8], verificam-se também maiores forças quando a ferramenta é de diamante policristalino, as quais apresentam gumes sensivelmente menos afiados ( $\rho$  maior). Maiores forças de usinagem para gumes de maior raio também foram observadas por Jochmann [185] na usinagem dura de precisão de materiais ferrosos, e por Maekawa e Itoh [7], Moriwaki et al [51] e Ikawa et al [165], em ensaios de usinagem e simulação do processo de usinagem com diamante de diferentes materiais metálicos. Segundo estes autores, o grau de afiação (ou seja, a grandeza de  $\rho$ ) predomina sobre as forças na microusinagem, onde as profundidades de corte e os avanços são muito pequenos e as espessuras de usinagem têm dimensões próximas ao raio de arredondamento do gume. Objetivando um maior conhecimento da influência do raio de gume sobre as componentes de força na usinagem de ultraprecisão, Moriwaki et al [51] e Taminiu e Dautzenberg [157] também realizaram pesquisas neste campo. A análise dos resultados de ensaios e simulação numérica em cobre e latão mostram que, com os aumentos nos raios de gume da ferramenta, as componentes de força também crescem.

Na usinagem dos cristais infravermelhos analisados neste trabalho, foi possível verificar que, da mesma forma que na usinagem de materiais metálicos, o tempo de utilização da ferramenta, ou seja, a progressão do desgaste, também se reflete sobre as componentes de força. Embora não tenha sido possível comprovar um desgaste da ferramenta ao longo

do tempo de ensaio, visto que o processo de arredondamento do gume ocorre no âmbito submicrométrico e somente com processos de medição complexos o mesmo pode ser comprovado, verifica-se que tanto a força passiva quanto a força de corte sofrem aumentos à medida que o percurso usinado cresce. Este aumento mostra-se mais pronunciado com relação à força passiva do que com relação à força de corte. Enquanto que para uma ferramenta já utilizada para uma grande quantidade de ensaios de usinagem as forças passivas podem atingir valores superiores a 100% em relação aos valores obtidos com a ferramenta nova, as forças de corte sofrem incrementos na ordem de 10%, para o mesmo tempo de utilização da ferramenta.

### **6.2.8. Material da peça**

As propriedades físicas e mecânicas dos materiais mostram ser um fator primordial no nível estático e dinâmico das forças durante a usinagem, sendo que o comportamento das mesmas é inclusive utilizado como critério de usinabilidade [116]. Elementos de liga, estrutura cristalina, dureza, resistência à tração, módulo de elasticidade e coeficiente de atrito, entre outras, são características de um material que exercem forte influência sobre as componentes da força de usinagem, de tal forma que diversos pesquisadores têm-se ocupado deste assunto, tanto na área de usinagem convencional como de precisão e ultraprecisão.

Um estudo comparativo realizado por Furukawa e Moronuki [142] na usinagem de ultraprecisão de diversos materiais com diferentes estruturas cristalinas, durezas, módulo de elasticidade e demais características mostra a existência de uma forte correlação entre propriedades físicas e mecânicas dos materiais e as forças durante a usinagem. Segundo estes pesquisadores, a dinâmica das componentes de força é fortemente influenciada pelas propriedades dos materiais usinados. Enquanto materiais frágeis ou policristalinos apresentam uma grande diferença entre os valores máximos e mínimos de força, materiais amorfos ou monocristalinos apresentam bem menos variações nos valores de força em um determinado espaço de tempo.

Na análise de forças na usinagem de materiais de comportamento duro e frágil, como os cristais infravermelhos ZnS, Cleartran e germânio, verifica-se que tanto a força de corte

quanto a força passiva são fortemente influenciadas pelas propriedades mecânicas e demais características dos diferentes materiais usinados. O germânio, com dureza bem maior que ZnS e Cleartran (vide propriedades dos materiais no item 5), leva a forças passivas também sensivelmente maiores. ZnS, por sua vez, tem forças passivas maiores que Cleartran, o qual apresenta uma dureza algo inferior. A diferença de forças passivas entre os materiais analisados mostra uma grande semelhança com as diferenças de dureza existentes entre estes materiais. Este comportamento mantém-se para alterações na geometria da ferramenta, como raio de quina e ângulo de saída, dentro de certos limites de avanço e profundidade de corte. Acima destes, principalmente o germânio mostra uma tendência de crescimento das forças passivas mais suave que Cleartran e ZnS.

A análise do comportamento das forças passivas na usinagem dos cristais infravermelhos ensaiados permite a comprovação da teoria apresentada por Drescher e Dow [145], segundo a qual a dureza dos materiais usinados tem uma relação de proporcionalidade com o nível de força, conforme equações 2.22 e 2.23 apresentadas no item 2.4. Este modelo, desenvolvido para materiais metálicos, apresenta validade também com relação às forças passivas de materiais de comportamento duro e frágil. Através da **figura 6.31** é possível verificar, por exemplo, que o nível de força passiva na usinagem de germânio, cuja dureza é em torno de quatro vezes maior que a do Cleartran, é também em torno deste valor maior em relação a este último material. Já com relação às forças de corte outros fatores parecem ter um maior peso, visto ser o nível de força de corte dos três materiais bastante semelhante, apesar das grandes diferenças de dureza entre os mesmos.

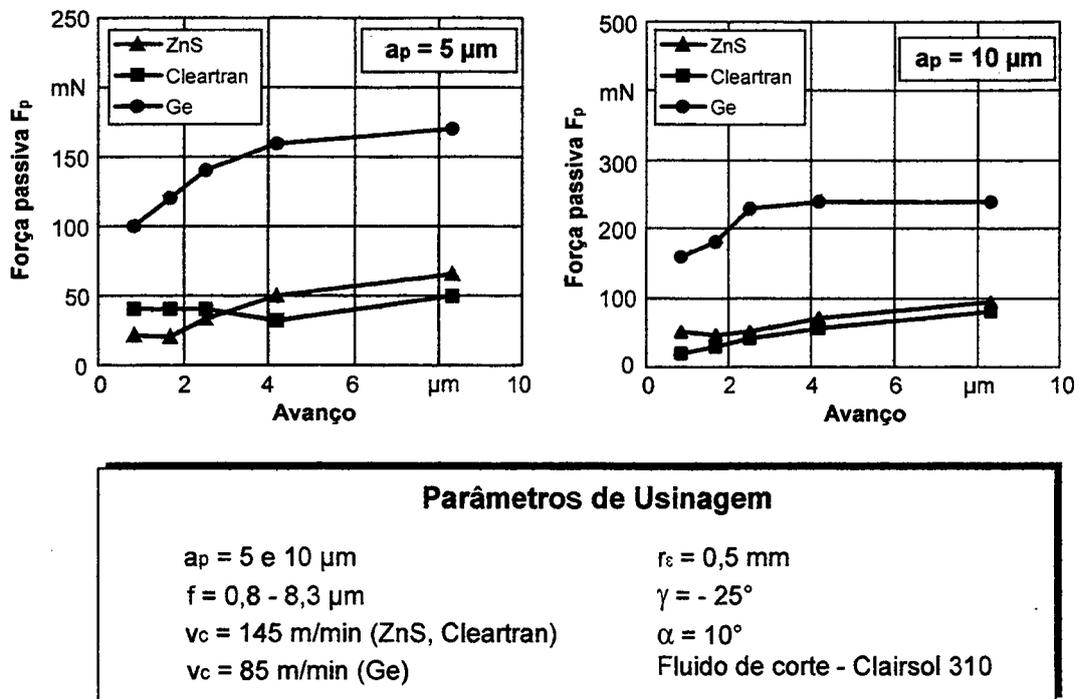
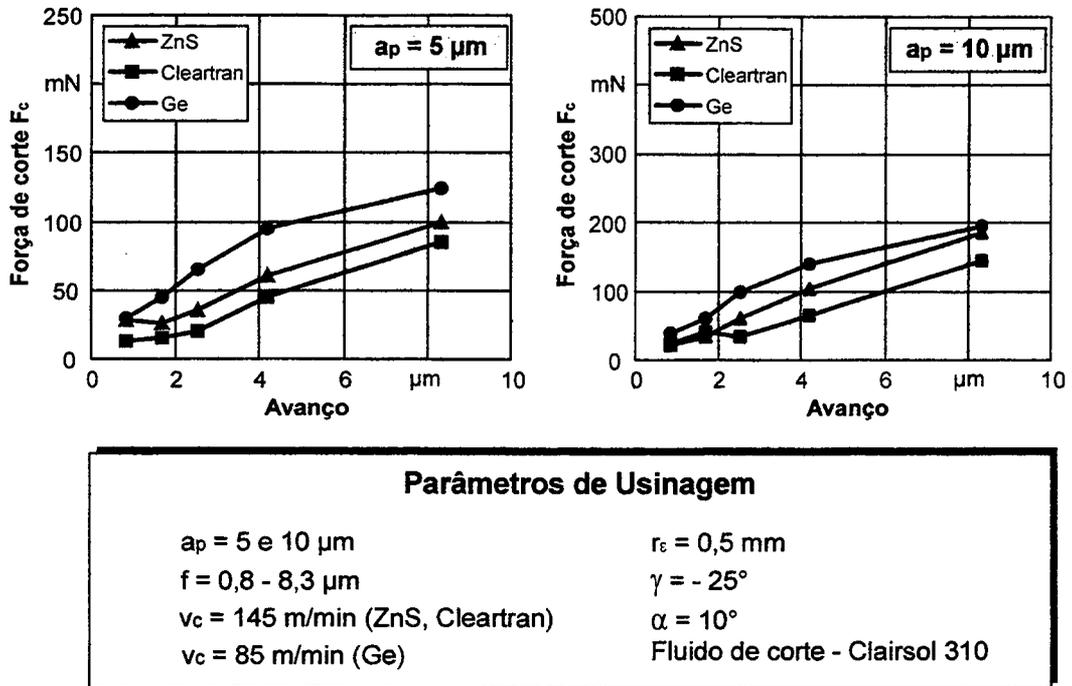


Figura 6.31 - Influência do material da peça sobre as forças passivas

Com relação às forças de corte, observa-se também uma dependência entre a dureza do material usinado e o nível de forças, embora não tão forte como no caso das forças passivas. Esta dependência tende a tomar-se menor quando os ângulos de saída fortemente negativos que normalmente são empregados para a usinagem de materiais duros e frágeis são alterados na direção positiva. Ou seja, é mais nítida a influência da dureza do material sobre a força de corte para  $\gamma = -25^\circ$  do que para  $\gamma = 0^\circ$ . No caso de  $\gamma = 0^\circ$  ocorre inclusive uma sobreposição dos resultados de força de corte, o que leva a supor que neste caso ocorre uma influência maior do comportamento frágil do material do que propriamente sua dureza (figura 6.32). De fato, dentre os cristais infravermelhos, o germânio apresenta a maior dureza, mas também a menor resistência à tração (vide figura 5.1, capítulo 5). Em ensaios realizados por Furukawa e Moronuki [142] em germânio pode-se também verificar um nível de força de corte inferior ao de materiais com menor dureza, mas de comportamento menos frágil.



**Figura 6.32** - Influência do material da peça sobre as forças de corte

Através da análise da força específica passiva resultantes durante a usinagem de diferentes materiais, é possível observar que o "size-effect" é mais pronunciado no caso da usinagem de germânio que na usinagem de ZnS e Cleartran, sendo que o início deste fenômeno ocorre também para maiores avanços na usinagem de germânio. Neste último material é também mais evidente a crescente diferença existente entre os níveis de força de corte e passiva à medida que os avanços são diminuídos (figuras 6.33 e 6.34).

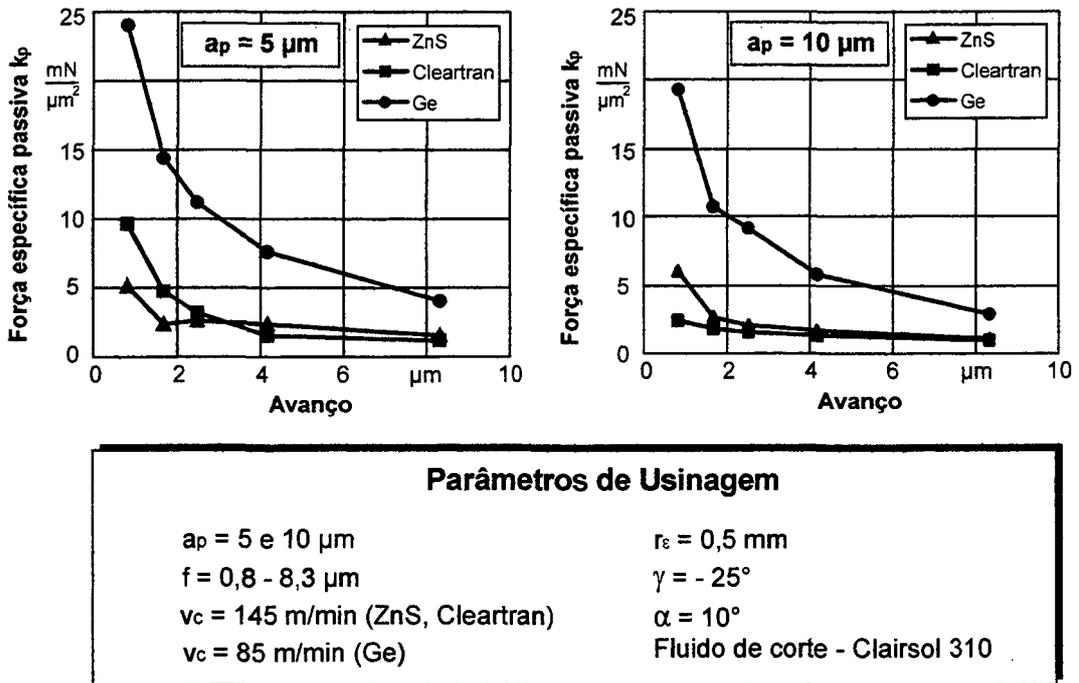


Figura 6.33 - Influência do material da peça sobre a força específica passiva

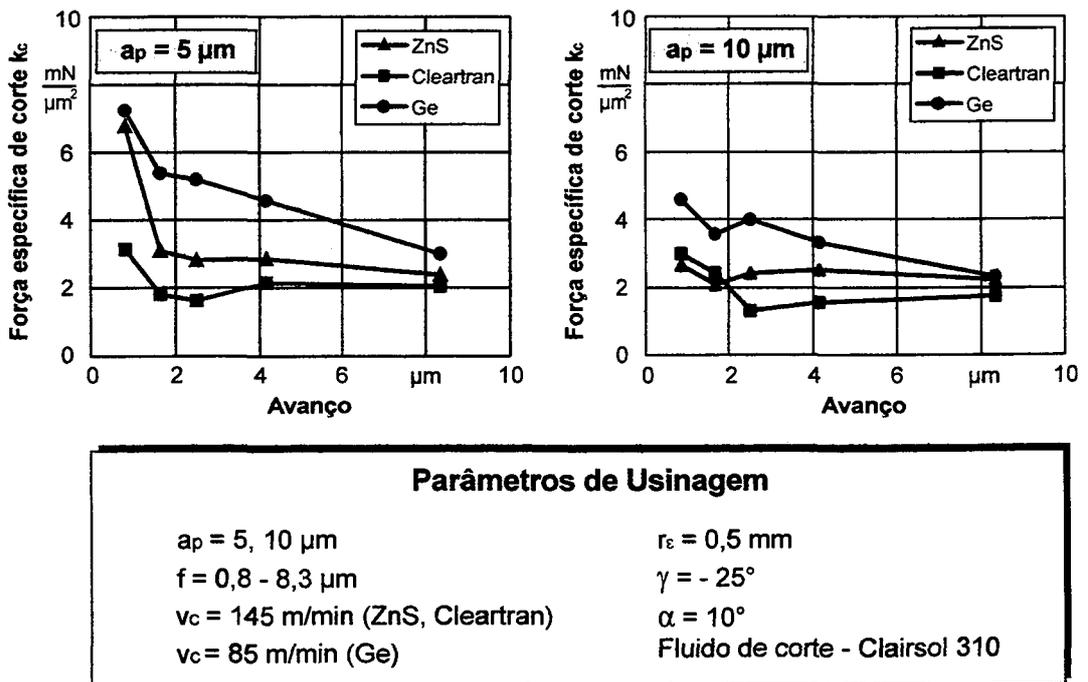


Figura 6.34 - Influência do material da peça sobre a força específica de corte

Embora o sistema de medição de forças empregado durante a usinagem dos cristais infravermelhos ensaiados não permita uma análise dinâmica criteriosa das componentes da força de usinagem, conforme abordado anteriormente no capítulo 4, é possível verificar que as diferenças entre os valores máximos e mínimos de força durante um procedimento de medição de força têm características próprias para os diferentes materiais ensaiados. Esta dispersão nos valores de força mostra-se mais pronunciada no caso da usinagem de germânio, o que leva a uma correlação entre as propriedades do material usinado (dureza, por exemplo) e a dinâmica do sinal de forças, segundo já observado por Furukawa e Moronuki [142]. Também Lin e Weng [147] relacionam as forças de corte e sua dinâmica às propriedades dos diferentes materiais usinados e às diferentes condições de trabalho, o que acarreta por sua vez diferenças no nível de vibração durante o processo de usinagem.

#### 6.2.9. Relação entre as forças de corte e passivas

Na usinagem de ultraprecisão é possível verificar que a relação entre as forças de corte e passivas  $F_c/F_p$  é fortemente influenciada pelos parâmetros de usinagem e pelas variáveis de trabalho adotados. De uma maneira geral, verifica-se que acima de um determinado valor de avanço ou profundidade de corte as forças de corte são maiores do que as forças passivas, ocorrendo o contrário para pequenos avanços ou profundidades de corte. A região de avanço ou profundidade de corte onde este fenômeno ocorre varia, entretanto, de acordo com as demais grandezas de trabalho adotadas, principalmente o raio de quina e o ângulo de saída da ferramenta, entre outras. Além disto, a relação existente entre a força de corte e passiva mostra-se influenciada pelas propriedades físicas e mecânicas do material usinado, como dureza e resistência à tração, por exemplo, pelo estado de desgaste da ferramenta e pelo emprego de fluido de corte, entre outros fatores.

Uma análise do processo de usinagem de ultraprecisão de ligas de cobre realizada por Stevens et al [160] mostra que, para valores de profundidade de corte superiores a  $1 \mu\text{m}$  ( $a_p > 1 \mu\text{m}$ ) a relação entre a força de corte e passiva é aproximadamente constante ( $F_c/F_p \approx 3$ ). Abaixo deste valor de profundidade de corte esta relação diminui rapidamente para ferramentas desgastadas, sendo este decréscimo mais lento em se tratando de ferramentas novas. O limite onde o valor de  $F_p$  ultrapassa  $F_c$  é, para ferramentas desgastadas, para valores de  $a_p$  em torno de  $0,2 \mu\text{m}$ , entretanto para ferramentas novas  $F_p$

nunca supera o valor de  $F_c$ . Esta diferença entre a relação  $F_f/F_p$  para ferramentas novas e desgastadas é explicada pelo comprimento de contato da superfície de incidência da ferramenta. Em ferramentas desgastadas o contato do material usinado com a superfície de incidência é maior que para ferramentas novas, entretanto ambas têm o mesmo comprimento de contato na superfície de saída (face). O contato com uma maior área da superfície de incidência resulta em maiores forças passivas, sendo este efeito visível apenas para pequenas profundidades de corte. Para profundidades de corte maiores, o contato com a superfície de incidência é muito menor que o contato com a superfície de saída, tanto para ferramentas novas quanto para desgastadas [160]. Ensaio de usinagem de ultraprecisão realizados por Oomen et al [53] em ligas de alumínio, cobre e níquel também mostram que, de uma maneira geral, as forças de corte são maiores que as passivas, para ferramentas novas. À medida que o desgaste da ferramenta progride, entretanto, os valores absolutos da componente de força passiva ultrapassam os valores da força de corte e tornam-se, em alguns casos, significativamente maiores que estes.

Segundo uma análise das forças na usinagem de ultraprecisão de ligas de cobre e alumínio realizada por Drescher e Dow [145], abaixo de um determinado valor de profundidade de corte a força passiva predomina, ou seja, é maior que a força de corte, sendo que acima deste valor de profundidade de corte esta tendência se inverte. Tal tendência é verificada também por Brinksmeier [46] e por Moriwaki [93], na usinagem de ligas de cobre e níquel eletrolítico com diamante monocristalino. Também o avanço mostra uma grande influência sobre o comportamento da relação entre as forças de corte e passivas na usinagem de ultraprecisão. Ensaio realizados por Spennath [1] e Moriwaki et al [93] em cobre OFHC, por Lucca e Seo [131] em ligas de Te-Cu e por Furukawa e Moronuki [142] em ligas de alumínio mostram que abaixo de um determinado valor de avanço as forças passivas tomam-se maiores que a componente de força de corte. Este fenômeno pode ser fundamentado na geometria do cavaco formado quando a espessura de usinagem está, ao longo de uma grande parte do gume, na ordem de grandeza do raio de arredondamento do gume, de modo que os ângulos de saída efetivos são fortemente negativos. Ângulos de saída fortemente negativos levam, por sua vez, a aumentos mais pronunciados nas forças passivas que nas forças de corte, o que leva também a um estado de tensões de compressão maior na região usinada [1].

Além da influência do avanço e da profundidade de corte sobre a relação entre a força de corte e passiva, Lucca e Seo [131] verificaram também que o ponto de inflexão onde a força passiva torna-se maior do que a força de corte depende, além de outros fatores, da geometria da ferramenta, sendo principalmente influenciado pelo ângulo de saída. Quanto mais negativo o ângulo de saída da ferramenta, maior a espessura de cavaco onde ocorre um domínio dos valores de força passiva sobre a força de corte.

Através da análise dos resultados de força na usinagem de ultraprecisão dos materiais duros e frágeis ensaiados, ou seja, os cristais infravermelhos ZnS, Cleartran e Ge, verifica-se que de um modo geral os mesmos têm um comportamento semelhante ao dos materiais metálicos, com respeito à relação entre a força de corte e passiva. Observa-se, por exemplo, que o avanço, a profundidade de corte, o ângulo de saída e o raio de quina da ferramenta, bem como as propriedades mecânicas do material ensaiado, exercem uma marcante influência sobre esta relação e sobre o ponto de inflexão onde uma das componentes de força torna-se maior do que a outra. Com relação ao avanço, tanto para o ZnS quanto para o Cleartran verifica-se que abaixo de um certo valor de avanço as forças passivas assumem um valor semelhante ou maior do que as forças de corte (**figura 6.35**). Este comportamento não é verificado na usinagem de Ge, onde em todos os ensaios de força e sob todas as condições de usinagem as componentes passivas apresentam-se sempre maiores do que as de corte. Tal fenômeno pode estar relacionado às propriedades mecânicas do Ge, que apresenta uma dureza muito superior à do ZnS e do Cleartran. Conforme já abordado anteriormente no item 6.2.8, as forças passivas são aparentemente mais afetadas pelas variações de dureza do material do que as forças de corte, em se tratando de materiais de comportamento duro e frágil.

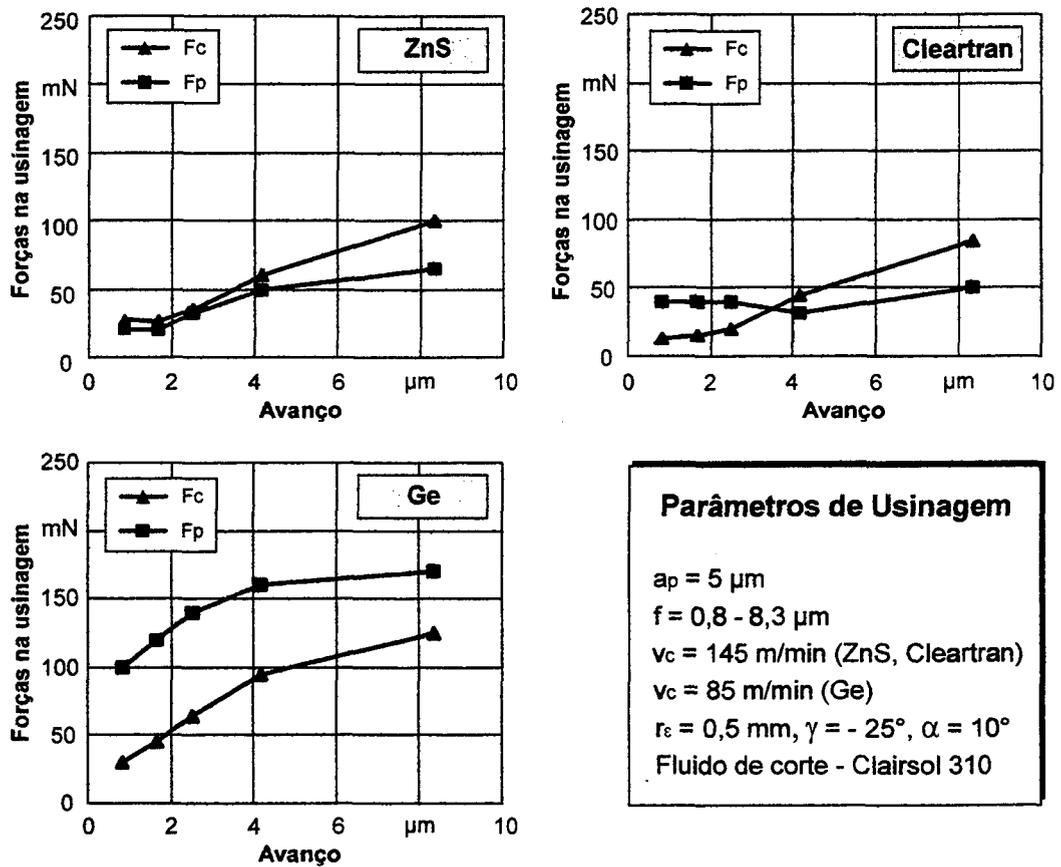
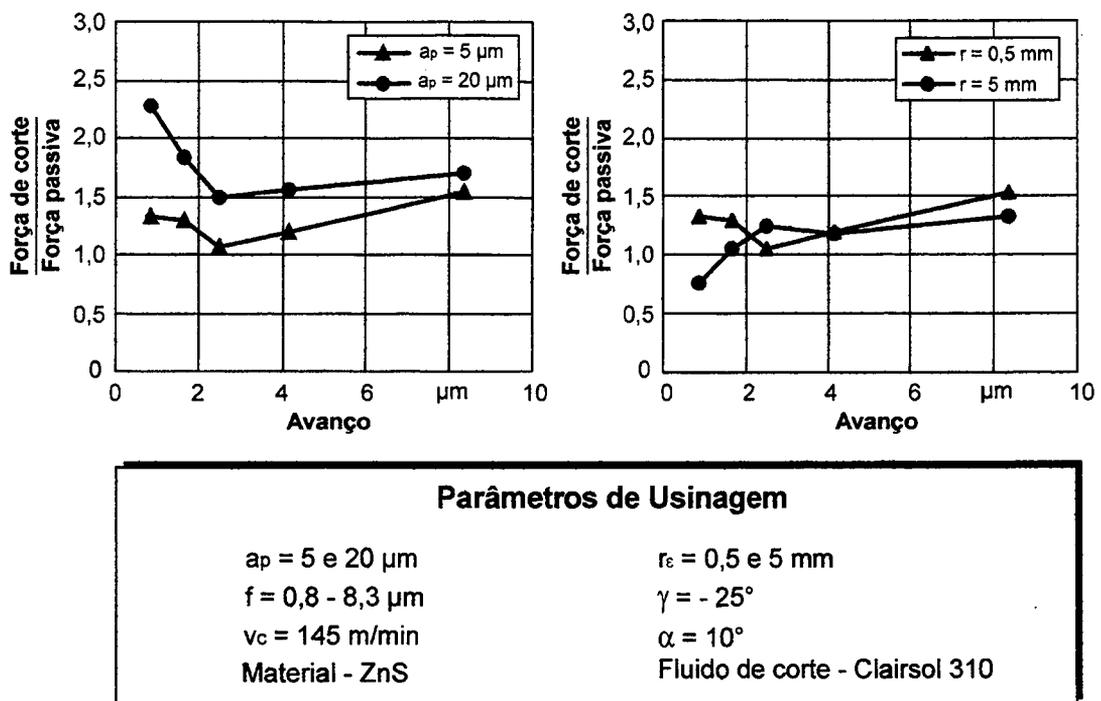


Figura 6.35 - Relação entre força de corte e passiva para variações de avanço

A análise dos resultados de força na usinagem com diamante dos cristais infravermelhos ensaiados mostra que o ponto de inflexão onde a força passiva adquire valores absolutos superiores aos da força de corte é também dependente da profundidade de corte e das características geométricas da ferramentas de corte. Para pequenas profundidades de corte observa-se que a componente passiva da força de usinagem assume valores iguais ou maiores do que a componente de corte, ao contrário do que ocorre para regiões de avanço maior. Da mesma forma maiores raios de quina deslocam o ponto de inflexão da relação entre força de corte e passiva para maiores profundidades de corte (figura 6.36). No caso do ângulo de saída não é possível uma conclusão clara com respeito à sua influência sobre a relação entre as forças de corte e passivas, embora freqüentemente verifique-se a tendência de o ponto de inflexão na relação  $F_c/F_p$  ocorrer para regiões de maior avanço quando a ferramenta empregada possui ângulos de saída fortemente negativos.



**Figura 6.36** - Relação entre força de corte e passiva para variações de profundidade de corte e raio de quina da ferramenta

### 6.2.10. Comparação entre resultados de força obtidos com diferentes sistemas de medição

A realização de ensaios de força na usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos com um protótipo de plataforma piezelétrica de alta sensibilidade fabricado pela firma Kistler (vide características no item 9.1) permite uma análise comparativa dos resultados de força obtidos com dois diferentes sistemas de medição (plataforma Kistler x plataforma própria) e dois diferentes processos de usinagem de ultraprecisão ("fly-cutting" x torneamento). Através desta análise, é possível verificar que para ambos sistemas de medição de forças tanto o comportamento das forças em função da variação dos parâmetros de usinagem e de geometria da ferramenta quanto o nível absoluto das forças na usinagem são similares, para condições de trabalho semelhantes. As pequenas diferenças observadas no valor absoluto de força podem ser imputadas à ausência do emprego de fluido de corte para os ensaios realizados com a plataforma Kistler, visto a análise dos resultados de força durante o processo de "fly-cutting" ser extremamente

dificultada pelo uso de fluido de corte, às variações no estado de desgaste da ferramenta e às diferenças na dinâmica do processo de "fly-cutting" em relação ao torneamento (figura 6.37).

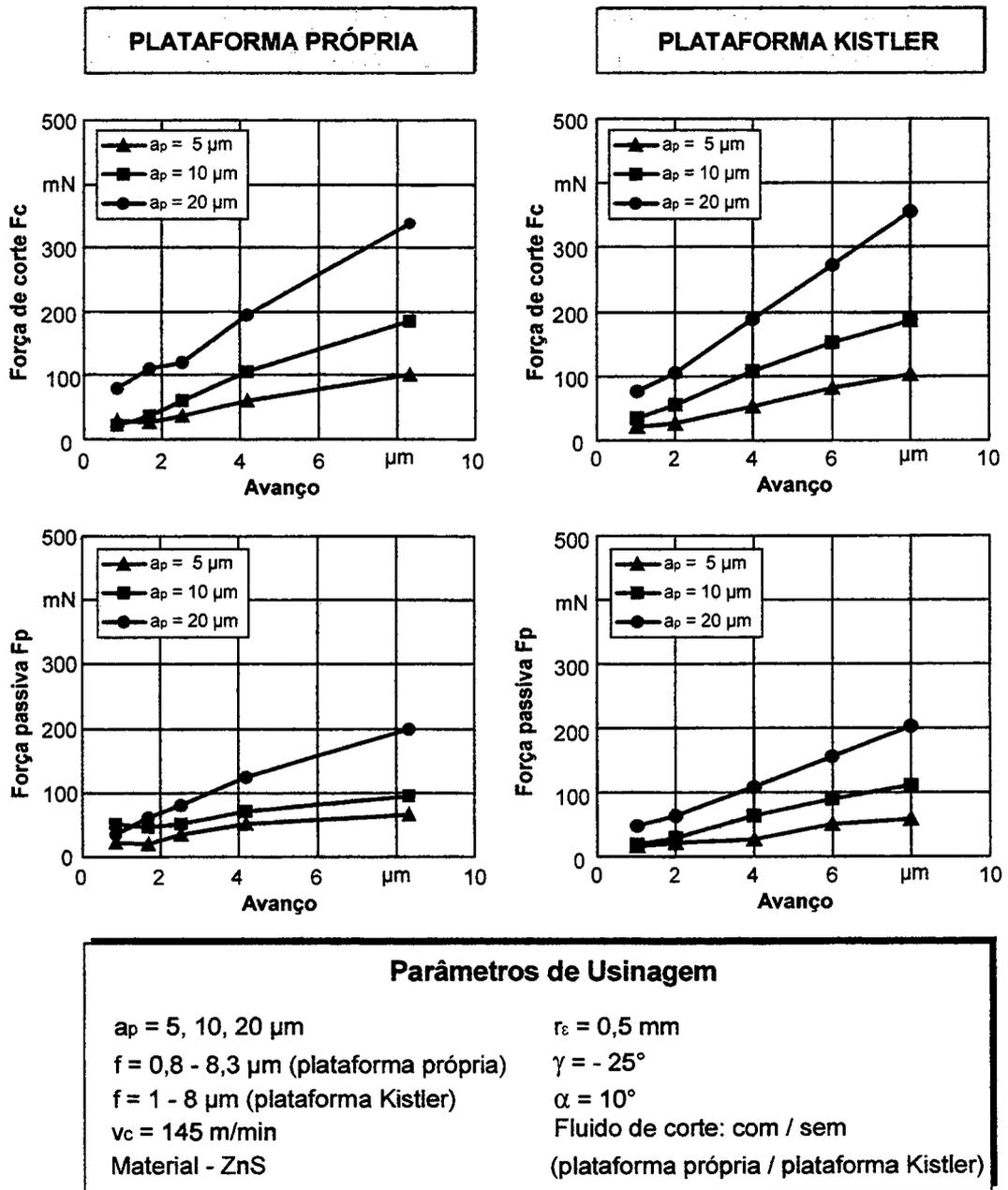


Figura 6.37 - Resultados de força com dois diferentes sistemas de medição

Com base na similaridade dos resultados de força obtidos com dois diferentes sistemas de medição e dois diferentes processos de usinagem, é possível uma correlação entre o nível

de forças, verificado para o processo de torneamento, e a qualidade superficial, gerada através do processo de "fly-cutting". Assim, podem ser obtidos conhecimentos sobre a influência do nível e do comportamento das forças sobre o resultado de trabalho na usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos e sobre o sucesso da usinagem dúctil de materiais de comportamento duro e frágil. Esta análise é mostrada a seguir.

### **6.3. Relação entre Forças na Usinagem e Qualidade Superficial**

As forças na usinagem podem ser, muitas vezes, relacionadas à qualidade superficial obtida, principalmente em operações de acabamento. A relação entre estes fatores já foi analisada por diversos pesquisadores da área de usinagem de ultraprecisão, principalmente na usinagem de metais não ferrosos, como ligas de cobre e alumínio, por exemplo. Entretanto, para a usinagem de materiais duros e frágeis com diamante monocristalino, dentre os quais estão enquadrados os cristais infravermelhos abordados neste trabalho, são encontrados poucos resultados de pesquisa sobre este tema. A dificuldade para medição de forças em níveis como os que ocorrem na usinagem de ultraprecisão destes materiais, aliada a uma importância secundária que tais materiais desempenharam no campo da fabricação de ultraprecisão até há poucos anos, em comparação com os materiais metálicos, podem ser considerados entre os principais motivos para que este assunto não tenha tido um maior destaque. O desenvolvimento de um sistema de medição de forças na usinagem com alta sensibilidade, com a conseqüente possibilidade de medição das componentes de força na usinagem de ultraprecisão também de cristais infravermelhos, em boa parte do espectro das condições de usinagem de acabamento, permite preencher em parte esta lacuna.

De acordo com Spenrath [1] e Kroos [13], maiores componentes dinâmicas na força de corte levam a maiores níveis de vibração na máquina-ferramenta, o que por sua vez pode levar a uma piora na qualidade superficial da peça gerada. Uma análise dinâmica do modelo de corte realizada por Lin e Chen [142] também mostra que as vibrações na usinagem de ultraprecisão estão relacionadas, entre outros fatores, ao comportamento dinâmico das forças de corte e da estrutura da máquina-ferramenta, de modo que forças na usinagem podem assim influir sobre a qualidade superficial obtida. Já segundo um

modelo teórico desenvolvido para a previsão das forças na usinagem por Lo-A-Foe et al [78], as alterações na força durante a usinagem de ultraprecisão têm pouca influência sobre a qualidade superficial, mas uma influência relativamente alta sobre os erros de forma. Tal conclusão é confirmada por Iwata et al [8], segundo os quais a energia consumida durante o processo de corte e, conseqüentemente, a temperatura na região de corte, é diretamente proporcional ao nível de forças de corte. Desta forma, maiores forças de corte podem causar problemas de dilatação térmica na peça usinada, com conseqüente influência sobre a qualidade final de forma.

Em ensaios de usinagem de ultraprecisão realizados por Masuda et al [154] em ligas de alumínio, verificou-se que as forças passivas abaixo de um valor de 0,5 N apresentam uma forte correlação com a qualidade superficial. Para menores valores de força passiva, que ocorrem para ferramentas novas, a rugosidade apresenta maiores valores, enquanto que para ferramentas com um certo nível de desgaste e, conseqüentemente, onde ocorre um aumento na componente passiva da força de usinagem, são obtidas superfícies com melhor qualidade superficial. Este fato é explicado pelo efeito de amassamento dos picos de rugosidade que ferramentas com um maior nível de desgaste podem favorecer. Estes resultados contradizem em parte as afirmações de outros autores, que relacionam os aumentos das forças na usinagem com uma progressiva deterioração da qualidade superficial da superfície gerada. Segundo Sugano et al [146], ensaios de usinagem de ultraprecisão em ligas de alumínio mostram que o aumento das forças passivas está ligado ao desgaste de flanco da ferramenta, e que com o aumento das forças passivas verifica-se também uma maior dispersão nos valores de rugosidade. Neste sentido deve-se observar, entretanto, que tais resultados são verificados para ferramentas já com um avançado estado de desgaste do gume.

Em uma análise do comportamento das forças de usinagem que ocorrem na usinagem de materiais duros e frágeis, como germânio e silício, por exemplo, Brinksmeier [158] observa que em regiões onde a usinagem destes materiais ocorre no regime dúctil o nível de forças passivas é sempre superior ao nível das forças de corte. Tal conclusão é confirmada pelos ensaios de usinagem realizados nos cristais infravermelhos analisados neste trabalho. A análise comparativa entre os resultados de força e de qualidade superficial realizados em sulfeto de zinco, Cleartran e germânio mostra que, nas condições

de ensaio nas quais foram obtidas superfícies com qualidade óptica, ou seja, nas quais supostamente ocorre com sucesso a usinagem em regime dúctil, as forças passivas apresentam normalmente valores superiores às forças de corte. Esta condição deve ser encarada, entretanto, apenas como condição necessária para o sucesso da usinagem dúctil na maioria dos casos observados, porém não suficiente, visto que principalmente para o germânio verifica-se que mesmo quando a superfície gerada apresenta baixa qualidade superficial pode ocorrer o domínio das forças passivas sobre as forças de corte.

Através dos ensaios realizados, é possível também verificar que não apenas a relação entre a força de corte e a força passiva, mas também o nível de força específica passiva exerce um importante papel sobre a qualidade superficial. Para menores avanços e menores profundidades de corte, assim como para maiores raios de quina e maiores ângulos negativos de saída, todos casos onde as forças específicas passivas assumem valores bastante altos, a rugosidade é normalmente menor. Neste casos também a ocorrência de danos superficiais é menos freqüente ou até insignificante, o que pode ser explicado pela teoria da usinagem dúctil de materiais duros e frágeis, que afirma ser a usinagem dúctil apenas possível em regiões onde o estado de tensões de compressão é elevado. Este estado é, por sua vez, favorecido por maiores forças passivas específicas. Forças passivas muito superiores às forças de corte, entretanto, podem ser freqüentemente relacionadas a uma deterioração na qualidade superficial da peça usinada, que por sua vez deve ser relacionada a um avançado estado de desgaste do gume da ferramenta. Conforme abordado anteriormente, principalmente as forças passivas sofrem fortes incrementos à medida que progride o desgaste do gume da ferramenta, na usinagem de ultraprecisão.

## 7. Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos

### 7.1. Conclusões

O emprego industrial de elementos ópticos de alta precisão é, atualmente, cada vez mais determinado por pequenos desenvolvimentos e pela otimização das possibilidades de fabricação existentes, bem como por novos processos de fabricação. Dentre estes novos processos, a usinagem com diamante de certos materiais frágeis já é uma opção viável para a produção de superfícies ópticas de alta qualidade sem que seja necessária uma etapa posterior de polimento. Isto é importante devido ao decréscimo nos tempos e nos custos de produção possíveis em muitos dos casos de fabricação de elementos ópticos de alta precisão. Entretanto, o mecanismo físico da usinagem de ultraprecisão de materiais frágeis em um regime dúctil não é, ainda, totalmente explicado.

A usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis, como os cristais infravermelhos, mostra problemas bastante mais complexos que a usinagem de materiais metálicos. Principalmente os valores de avanço e profundidade de corte adequados à obtenção de superfícies com qualidade óptica são bastante mais limitados do que na usinagem de ultraprecisão da maioria dos materiais metálicos, e a geometria da ferramenta e as características da máquina-ferramenta têm também uma importância significativa. Para se obter sucesso na produção de componentes ópticos de alta qualidade através da tecnologia de usinagem com diamante, ou seja, atingir alta precisão de forma, baixíssima rugosidade e textura superficial adequada, é necessário portanto considerar os diversos fatores de influência que atuam durante o processo. Sem o domínio destes fatores, não é possível a obtenção de resultados de trabalho satisfatórios.

Com este trabalho objetivou-se um maior conhecimento do processo de fabricação de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho e com alta qualidade de forma, superficial e dimensional através do processo de usinagem de ultraprecisão com ferramentas de diamante monocristalino, em especial nos cristais infravermelhos sulfeto de zinco (ZnS), Cleartran (uma forma de ZnS desidratado) e germânio (Ge). Para isto foram realizadas pesquisas no sentido de aprofundar os conhecimentos sobre os

fenômenos que ocorrem durante a usinagem de ultraprecisão destes cristais, quais as condições de trabalho mais adequadas para se obter qualidade óptica nos materiais ensaiados e qual o comportamento das forças durante a usinagem destes materiais com diamante monocristalino. Neste sentido foi analisada em profundidade a influência dos principais parâmetros de usinagem e variáveis de trabalho de maior importância sobre os resultados de trabalho, como o avanço, a profundidade de corte, a velocidade de corte, o fluido de corte, o raio de quina e ângulo de saída da ferramenta, além das propriedades dos diferentes materiais ensaiados, dentre outras.

Através da análise dos resultados de qualidade superficial dos materiais ensaiados, verifica-se que o avanço é o parâmetro de usinagem com maior influência sobre o resultado final de trabalho, já que uma variação do mesmo implica em variações na espessura do cavaco formado, que por sua vez é de importância primordial no sucesso da usinagem dúctil de materiais de comportamento frágil. Enquanto que para o sulfeto de zinco, assim como para o germânio, é possível a obtenção de superfícies de excelente qualidade superficial, ou seja, com baixa rugosidade e ausência de danos superficiais do tipo "pittings" para avanços inclusive superiores a 1  $\mu\text{m}$ , para o Cleartran superfícies ótimas apenas são obtidas para avanços inferiores a este valor. Já a profundidade de corte não mostra uma influência tão marcante sobre o resultado final de trabalho, sendo entretanto possível verificar que as melhores qualidades superficiais são obtidas para profundidades de corte em torno de 10  $\mu\text{m}$ , para o sulfeto de zinco, e em torno de 7  $\mu\text{m}$ , para o Cleartran. Estes valores ótimos de profundidade de corte verificados na usinagem de sulfeto de zinco e Cleartran com ferramentas de diamante monocristalino são bastante superiores aos do germânio, que se encontram normalmente em torno dos 2  $\mu\text{m}$ .

A influência das variações de velocidade de corte na usinagem com diamante de alguns cristais infravermelhos mostra algumas diferenças com relação ao verificado na usinagem de ultraprecisão de materiais metálicos. Embora para o sulfeto de zinco a velocidade de corte apresente uma influência desprezível sobre a qualidade superficial, da mesma forma que ocorre na usinagem de germânio, variações de velocidade de corte na usinagem de Cleartran levam a diferenças marcantes no resultado de trabalho. Acima de um certo valor de velocidade de corte, que nos ensaios com Cleartran encontra-se em torno dos 150 m/min, verifica-se frequentemente uma crescente deterioração na qualidade superficial,

com a ocorrência de danos superficiais e obtenção de superfícies que não podem mais ser consideradas como "ópticas".

Ao contrário do que ocorre na usinagem de germânio com diamante monocristalino, na usinagem de sulfeto de zinco e de Cleartran o ângulo de saída não mostra uma influência muito grande sobre a qualidade superficial. Normalmente a adoção de ângulos de saída fortemente negativos facilita a usinagem no regime dúctil de materiais frágeis, visto que assim são alcançadas maiores pressões de compressão na região de corte. Na usinagem de sulfeto de zinco e Cleartran, entretanto, este efeito aparentemente não é tão nitidamente verificado como em outros cristais infravermelhos. Enquanto no sulfeto de zinco um aumento negativo nos ângulos de saída leva apenas a leves melhorias na qualidade superficial, no Cleartran observam-se inclusive melhores resultados tanto com relação à rugosidade quanto com relação à ocorrência de danos superficiais do tipo "pittings" para ferramentas com  $\gamma = 0^\circ$ . Este fato aparentemente surpreendente pode ser explicado pela microgeometria da ferramenta de corte, principalmente pelo raio de arredondamento do gume da ferramenta. Para espessuras de usinagem muito pequenas, como as que ocorrem na adoção de baixos avanços, dependendo do estado do gume da ferramenta o ângulo de saída efetivo pode ser fortemente negativo, mesmo que o ângulo de saída nominal assim não o seja. Na impossibilidade de medição dos raios de gume no escopo deste trabalho, entretanto, deve-se considerar que os mesmos têm uma variação significativa para cada diferente ferramenta utilizada, não sendo possível, portanto, uma análise mais acurada da sua influência sobre a qualidade superficial.

A análise dos resultados de qualidade superficial quanto aos valores de rugosidade e ocorrência de "pittings" para diferentes raios de quina da ferramenta mostra que esta grandeza geométrica apresenta uma nítida influência sobre o resultado final de trabalho, na usinagem de ultraprecisão dos cristais infravermelhos ensaiados. Maiores raios de quina levam a espessuras de usinagem menores, o que favorece a usinagem dúctil. Deve-se salientar, entretanto, que raios de quina muito grandes podem levar a um incremento das forças passivas, que por sua vez podem ocasionar um aumento no nível de vibração do sistema ferramenta-máquina-ferramenta, com conseqüências negativas sobre a qualidade superficial.

Com o projeto, construção e análise das características de um novo sistema de medição de forças na usinagem de ultraprecisão foi possível a medição de forças em um nível extremamente pequeno, como as que ocorrem na usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos, por exemplo. Uma análise das características do sistema de medição de forças na usinagem de ultraprecisão mostrou que o sistema construído possui uma grande sensibilidade, com uma resolução inferior a 5 mN. Isto é possível graças à adoção de sensores piezelétricos de alta sensibilidade, montados em uma plataforma que permite a medição de forças no torneamento de ultraprecisão. Ensaios comparativos com um protótipo de plataforma piezelétrica produzido pela firma Kistler mostram que os resultados obtidos com os dois diferentes sistemas de medição de forças são similares, de forma que se confirma assim a confiabilidade do sistema de medição desenvolvido. Com isto, foi possível a análise do comportamento das forças no torneamento para as diferentes condições de usinagem usuais na fabricação de elementos ópticos através da usinagem de ultraprecisão.

O estudo do comportamento das forças na usinagem de ultraprecisão de sulfeto de zinco, Cleartran e germânio mostra que o avanço exerce, assim como na usinagem convencional e de ultraprecisão de materiais metálicos, uma influência marcante sobre as componentes de força. Incrementos no avanço levam a um aumento não proporcional tanto da força de corte quanto da força passiva, embora o aumento da componente de corte seja mais evidente. Observa-se também que para regiões de avanço progressivamente menor ocorre um aumento hiperproporcional nas forças específicas, conhecido como "size-effect". Assim como para as variações de avanço, variações na profundidade de corte refletem-se também nitidamente sobre as componentes da força de usinagem, verificando-se da mesma forma o "size-effect" para regiões de profundidades de corte pequenas.

A exemplo do que ocorre na usinagem de metais com ferramentas de diamante monocristalino, na usinagem dos cristais infravermelhos ensaiados não é possível verificar uma influência da velocidade de corte sobre os resultados de força, dentro dos intervalos de velocidade de corte testados. Já a adoção de fluido de corte leva a uma redução visível no nível de forças durante a usinagem de ultraprecisão de sulfeto de zinco, Cleartran e germânio, em relação a ensaios realizados a seco, sendo este efeito melhor observado para pequenos avanços.

Com relação ao raio de quina da ferramenta, é possível verificar que o mesmo exerce uma influência marcante tanto sobre a força de corte quanto sobre a força passiva. Para maiores raios de quina observam-se forças correspondentemente maiores, além de ocorrer um deslocamento do início do "size-effect" para regiões de maior avanço, quando os raios de quina adotados são maiores. Também o ângulo de saída da ferramenta mostra ter influência sobre as componentes de força, sendo esta influência principalmente observada para regiões de maior avanço. Para avanços progressivamente menores, entretanto, diminui gradualmente a importância deste parâmetro geométrico da ferramenta sobre as forças, o que pode ser explicado pelo crescente domínio do ângulo de saída efetivo, fortemente negativo para pequenas espessuras de usinagem, sobre o ângulo de saída nominal.

Assim como ocorre na usinagem de materiais metálicos com ferramentas de diamante, na usinagem de cristais infravermelhos o tempo de utilização de uma ferramenta, ou seja, seu estado de desgaste, reflete-se claramente sobre as forças de usinagem. Principalmente a força passiva sofre nítidos incrementos à medida que o desgaste da ferramenta progride, verificando-se também acréscimos no nível da força de corte, embora bastante inferiores aos ocorridos na força passiva. Uma análise mais detalhada sobre este tópico não é, entretanto, apresentada neste trabalho.

As propriedades físicas e mecânicas de um material exercem normalmente uma grande influência sobre as componentes de força, tanto na usinagem convencional quanto de ultraprecisão de metais. Este fato também pode ser verificado na usinagem de sulfeto de zinco, Cleartran e germânio. A análise das forças ocorridas durante a usinagem de ultraprecisão destes materiais mostra que principalmente as forças passivas são fortemente afetadas por propriedades do material usinado, como a dureza, por exemplo. A força de corte, embora também influenciada pelas propriedades dos diferentes cristais infravermelhos, mostra-se todavia menos sensível a variações nas características mecânicas do materiais ensaiados.

O desenvolvimento de um sistema de medição de forças de alta sensibilidade permitiu também a verificação da relação existente entre as forças e qualidade superficial na usinagem dos cristais infravermelhos ensaiados, visto que principalmente na compreensão

dos fenômenos que ocorrem no regime de usinagem dúctil de materiais de comportamento duro e frágil as componentes da força de usinagem desempenham um importante papel. Com isto abrem-se assim novas perspectivas para o domínio da fabricação de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho e para o esclarecimento do processo de corte de materiais duros e frágeis com ferramentas de diamante monocristalino.

Através das pesquisas realizadas no campo da usinagem de cristais infravermelhos, especificamente na usinagem de sulfeto de zinco, Cleartran e germânio, foi possível aumentar consideravelmente o grau de conhecimentos sobre o comportamento destes materiais durante a usinagem de ultraprecisão, bem como sobre quais as premissas básicas para que a superfície gerada tenha qualidade óptica e possa ser empregada em sistemas que exijam elementos de alta qualidade. Assim obtiveram-se importantes informações para um emprego econômico da tecnologia de usinagem de ultraprecisão com ferramenta de diamante monocristalino também no campo da fabricação de elementos ópticos em materiais de comportamento duro e frágil, principalmente de elementos anesféricos, cujas dificuldades de fabricação através dos processos convencionais de retificação, lapidação e polimento são consideráveis. A obtenção de superfícies com qualidade óptica nos cristais infravermelhos ensaiados, com rugosidades  $R_a$  inferiores a 2 nm e rugosidades P-V menores que 20 nm, com a possibilidade de permitir também a fabricação de elementos com as extremas qualidades dimensionais e de forma obteníveis através da usinagem de ultraprecisão, mostra o enorme potencial de aplicação desta tecnologia de fabricação.

## 7.2. Sugestões para Futuros Trabalhos

O desenvolvimento de um sistema para a medição de forças na usinagem de ultraprecisão com sensibilidade suficiente para perceber níveis de força como os que ocorrem em condições de acabamento na usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos representa um sensível progresso neste campo de pesquisa. O sistema construído ainda deve ser considerado, entretanto, como um protótipo, e como tal apresenta uma série de

problemas de projeto e dificuldades de operação que devem ser sanados. Dentre os melhoramentos que devem ser objetivados neste sistema podem ser citados:

- Aumento da rigidez do sistema (maior frequência natural), de modo que seja possível também a medição das componentes dinâmicas da força de usinagem. Com isto aumentam-se as possibilidades de uma maior compreensão do mecanismo de formação de cavacos na usinagem dúctil de materiais frágeis e, conseqüentemente, um maior domínio do processo de fabricação de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho através da usinagem de ultraprecisão;
- Alteração do projeto no sentido de permitir a calibração da plataforma de medição sem que para isto seja necessária a presença da ferramenta na posição de trabalho. Desta forma podem ser diminuídos os custos, tempos e dificuldades de operação do sistema, ao mesmo tempo que a flexibilidade do sistema de medição é incrementada;
- Alteração do projeto no sentido de permitir a medição simultânea das três componentes da força de usinagem (força de corte, passiva e de avanço), visto o sistema atual permitir apenas a medição simultânea de duas destas componentes.

Um dos fatores de grande importância para uma maior compreensão do processo de usinagem dúctil de materiais duros e frágeis é, sem dúvida, o raio de gume da ferramenta. Sabe-se, por exemplo, que o sucesso da usinagem dúctil depende do estado de tensões de compressão na região de corte. Estas tensões de compressão são, por sua vez, dependentes do raio de gume da ferramenta. Gumes extremamente afiados, como os verificados em algumas ferramentas de diamante, podem levar a um estado de tensões de compressão insuficiente para que ocorra a usinagem em regime dúctil, enquanto que com ferramentas já desgastadas, ou seja, com um raio de gume muito grande, tampouco é possível a obtenção de qualidades superficiais satisfatórias. As dificuldades e custos relativos a esta questão impediram a análise deste fator de influência no escopo deste trabalho. Um estudo profundo da influência do raio de gume sobre a qualidade superficial e sobre as forças na usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos é, entretanto, recomendável.

A relação verificada entre as forças durante a usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos e a qualidade superficial obtida é um tópico que merece um estudo profundo, que devido a limitações diversas não pôde ser totalmente explorado no escopo deste trabalho. Pesquisas futuras neste campo devem ser realizadas no sentido de aumentar os conhecimentos nesta área, visto ser a mesma de importância reconhecida para um domínio cada vez maior desta tecnologia de fabricação de elementos ópticos em materiais de comportamento duro e frágil.

Para que um processo de fabricação possa ser considerado amadurecido e seja passível de implementação é recomendável uma análise da viabilidade econômica do mesmo. Para isto fazem-se necessários ensaios de vida da ferramenta, que no caso de ferramentas de diamante assumem custos elevados. Embora através dos ensaios de usinagem de ultraprecisão de sulfeto de zinco, Cleartran e germânio não tenham sido verificados altas taxas de desgaste da ferramenta, sabe-se que na usinagem de alguns cristais infravermelhos, como o silício e fluoreto de cálcio, por exemplo, verifica-se um desgaste pronunciado das ferramentas de corte, o que recomenda uma análise detalhada deste tema.

## 8. Referências Bibliográficas

- [1] SPENRATH, N. M. *Technologische Aspekte zum Feinstdrehen von Kupferspiegeln*. Aachen, 1991. 152 p. Dissertation (Doutorado em Engenharia), RWTH-Aachen, 1991.
- [2] KÖNIG, W. et al. *Diamond Machining Technology*. Tutorial 6<sup>th</sup> IPES/UME 2. IPT-Aachen. Aachen, may 1991. 96 p.
- [3] JOHNSON, F. E. et al. Diamond Turning Produces Precise Infrared Optics. *Laser Focus*, jul. 1981. p. 33-36.
- [4] KÖNIG, W. et al. *Nicht-torische Laseroptiken*. Fortsetzungsantrag der Forschergruppe (Projekt DFG-IPT). Aachen, 1989.
- [5] HARTEL, R. *Feinstdrehen von Metalloptiken - Einflüsse des Maschinenverhaltens auf die Oberfläche*. Aachen, 1988. 139 p. Dissertation (Doutorado em Engenharia), RWTH-Aachen, 1988.
- [6] BRINKSMEIER, E. Herstellung von Präzisionsbauteilen durch Mikrozerspanung. Sonderdruck aus *IDR Industrie Diamanten Rundschau* 28 (1994) Nr. 4. 8 p.
- [7] MAEKAWA, K. ITOH, A. Friction and Tool Wear in Nano-Scale Machining (to appear in *WEAR*), [199-]. 8 p.
- [8] IWATA, K., MORIWAKI, T., OKUDA, K. A. Study of Cutting Temperature in Ultra High Precision Diamond Cutting of Copper. *Manufacturing Technology Review*, SME, may 1987. p. 510-515.
- [9] SCHROETER, R. B. *A Usinagem de Ultraprecisão de Materiais Duros e Frágeis. 2. Relatório de Atividades*. Aachen, 1996. 25 p.

- [10] McCLURE, R. Manufacturers Turn Precision Optics with Diamond. *LASER FOCUS WORLD*, feb. 1991. p. 95-105.
- [11] BECKER, K. HEYNACHER, E. Bearbeitung optischer Flächen mit Einzeldiamantwerkzeugen. *Feinwerktechnik & Messtechnik* 95 (1987) 4. p. 233-237.
- [12] HILGERS, W. *Optimierte Prozeßauslegung für die Drehbearbeitung von Zinksulfid und Cleartran mit monokristallinen Diamantwerkzeugen*. Aachen, 1996. 66 p. Studienarbeit, RWTH-Aachen, 1996.
- [13] KROOS, F. *Untersuchung des Einflusses des polykristallinen Gefüges von OF-Kupfer auf die Oberflächenausbildung bei der Feinstzerspanung*. Aachen, 1990. 112 p. Diplomarbeit, RWTH-Aachen. 1990.
- [14] WECK, M., KLOCKE, F., SCHROETER, R. B. et al. Ultrapräzisionsbearbeitung und Fertigung von Mikrokomponenten. *IDR* 3/96. p. 172-177.
- [15] DECKER, D. L., GRANDJEAN, D. J., BENNETT, J. M. *Optical and Surface Physical Characteristics of Diamond-Machined Infrared-Window Materials*. [S.l.:s.n.]. p. 199-208.
- [16] NAKASUJI, T. et al. Diamond Turning of Brittle Materials for Optical Components. *Annals of the CIRP*, Vol. 39/1/1990. p. 89-92.
- [17] MIYASHITA, M., YOSHIOKA, J. Development of Ultra-Precision Machine Tools for Micro-Cutting of Brittle Materials. *Bull. Japan. Soc. of Prec. Engg.*, Vol. 16, No. 1, mar. 1982. p. 43-50.
- [18] HAMADA, H. Tools for a Mirror Finish. *INDUSTRIAL DIAMOND REVIEW* 1/87. p. 26.
- [19] BRIERS, J. D., DEVLIN, A. Aspheric Optics by Diamond Machining. *PHOTONICS SPECTRA* 20 (1986) 12. p. 89-92.

- [20] HILGERS, W. *Untersuchung zum Einfluß der Stellgrößen beim Diamantfräsen von Zinksulfid und Cleartran*. Aachen, 1996. 151 p. Studienarbeit, RWTH-Aachen, 1996.
- [21] KÖNIG, W., SCHROETER, R. B., ZAMEL, S. Desenvolvidos na fabricação de componentes ópticos transmissivos no espectro infravermelho através da usinagem de ultraprecisão. In: COBEM 95, 1995, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte, 1995. 4 p.
- [22] BRIERS, J. D., DEVLIN, A., HESHMATY-MANESH, D. Infrared Optics: the Quality and Performance of Diamond-Machined Germanium Lenses. *OPTIK 74*, Nr. 4 (1986). p. 168-172.
- [23] KÖNIG, W. et al. *Nicht-rotationssymmetrische Laseroptiken*. 2. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben - We 550/107-3, IPT-Aachen. Aachen, 1994. 54 p.
- [24] SCHERER, V. *Kraftmikroskopische Untersuchungen an ultrapräzisionsbearbeiteten Oberflächen*. Saarbrücken, 1995. 122 p. Diplomarbeit am FhG-IzfP. 1995.
- [25] GREVE, P. *Lasertechnologie: CO<sub>2</sub>-Laser & Laseroptik*. Abschlußbericht BMFT - Vorhaben 13 N 5314, 1987. 103 p.
- [26] KÄSGEN, K. *Analyse der Oberflächenausbildung im Bereich der Korngrenze bei der Feinstzerspanung von polykristallinem OF-Kupfer*. Aachen, 1992. 79 p. Studienarbeit, RWTH-Aachen. 1992.
- [27] RANAT, B. M. Use of Aspherics and Colour Correcting Elements in the Thermal Infrared. *SPIE Vol. 1013*, 1988. p. 74-83.
- [28] ALLEN, A. *Considerations in Specifying Metal Optics*. Aero Research Associates. Great Neck, NY, 1983. 8 p.

- [29] TEN years required for commercialization. METALWORKING. *Engineering and Marketing*, jan. 1988. p. 22-23.
- [30] HAISMA, J. et al. Aspherics. *Philips Technical Review*. Volume 41, 1983/84. n. 10. p. 285-303.
- [31] SCHULZ, G. Aspheric surfaces. In: WOLF, E. *Progress in Optics XXV*. Elsevier Science Publishers b. v., 1988. p. 349-415.
- [32] WYANT, J. C. Interferometric Testing of Aspheric Surfaces. *Proc. SPIE 816*, [198-]. 21 p.
- [33] HEYNACHER, E. Fertigung und Prüfung asphärischer Flächen - Stand der Technik in der Bundesrepublik Deutschland. *Feinwerk & Meßtechnik* 92 (1984) 1. p. 1-5.
- [34] BILLERT, U. *Entwicklung eines Prozeßmodelles zur Simulation der Oberflächentopographie, die unter Einfluß eines realitätsnahen Schnittprozesses bei der Planbearbeitung in der Mikrozerspanung entsteht*. Aachen, 1988. 85 p. Studienarbeit, RWTH-Aachen, 1988.
- [35] SPENRATH, N. *Einsatz und Fertigung transmissiver Optiken aus sprödharten Infrarotkristallen*. Doktorvortrag IPT-Aachen, 2/12/1991. Aachen. 18 p.
- [36] ZAMEL, S. *Herstellung von Sonderoptiken aus sprödharten Materialien durch Diamantdrehen*. Vortrag in Staufenberg, 26 -27/8/1995.
- [37] ZIMMERMAN, J., REYNOLDS, B. R. Aspheric Elements for Performance Improvement and Cost Reduction in Infrared Systems. *SPIE - Practical Infrared Optics*, Vol. 131, 1978. p. 50-56.
- [38] JOHNSON, F. E., SAITO, Th. T. Applications of Diamond Turning to Infrared Optical Systems. *OPTICAL ENGINEERING*, Vol. 16, Nr. 4., jul.-aug. 1977. p. 387-392.

- [39] PREUSS, W. Asphärische Linsen aus monokristallinem Germanium fertigen und prüfen. *Feinwerktechnik & Meßtechnik* 98 (1990) 10. p. 423-425.
- [40] THE Photonics Directory. Book 3: *The Photonics Design and Applications Handbook*. 37<sup>th</sup> Edition. Laurin Publishing Company, Inc. Pittsfield, MA, 1991.
- [41] SAVAGE, J. A. *Infrared Optical Materials and their antireflection coatings*. Adam Hilger Ltda., Bristol and Boston, 1985. 255 p.
- [42] LEE, W. B. Prediction of Microcutting Force Variation in Ultraprecision Machining. In: 5<sup>th</sup> International PRECISION ENGINEERING Seminar, 18-22/9/1989, Monterey, California. *Anais...* Monterey, 1989. p. 42-45.
- [43] KÖNIG, W. et al. *Fertigungstechnologie zur Herstellung von höchstgenauen Oberflächen durch Zerspanung mit bestimmter Schneide*. DFG-Bericht We 550/107-3. 1996.
- [44] IKAWA, N., SHIMADA, S., MOROOKA, H. Technology of Diamond Tool for Ultraprecision Metal Cutting. *Bull. Japan. Soc. of Prec. Engg.*, Vol. 21, Nr. 4, dec. 1987. p. 233-238.
- [45] TANIGUSHI, N. Future Trends of Nanotechnology. *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.*, Vol. 26, Nr. 1, mar. 1992. p. 1-7.
- [46] BRINKSMEIER, E. *Reibung und inelastische Werkstoffverformung bei der Mikrozerspanung*. DFG Auftrag, 1995. 46 p.
- [47] WEINGAERTNER, W. L. *Desenvolvimentos na Usinagem de Ultraprecisão*. Monografia para Professor Titular - UFSC. Florianópolis, 1992.
- [48] SCHROETER, R. B. *Tecnologia de Usinagem de Ultraprecisão e Análise de Superfícies Nanométricas*. Relatório de Estágio IPT-Aachen. Aachen, 1994. 44 p.

- [49] PIESCHE, P. *Ultrapräzisionsbearbeitung - Einflüsse der technologischen Randbedingungen, des Werkzeugs, des Werkstückstoffs und der Bearbeitungsparameter auf den Prozeßverlauf und das Arbeitsergebnis*. Aachen, 1986. 71 p. Diplomarbeit, RWTH-Aachen. 1986.
- [50] BURMAN, L. L. et al. Probleme und Besonderheiten des Diamantmikrodrehens optischer Präzisionsteile aus nichtmetallischen Materialien. *STM. Nauk. dum.* (1991) 3, p. 59-64.
- [51] MORIWAKI, T., SUGIMURA, N., LUAN, S. Combined Stress, Material Flow and Heat Analysis of the Orthogonal Micro-Machining of Copper. *Annals of the CIRP*, Vol. 42/1/1993. p. 75-78.
- [52] TANIGUSHI, N. Current Status in, and Future Trends of Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing. *Annals of the CIRP*, Vol. 32/2/1983. p. 573-582.
- [53] OOMEN, J. M., EISSES, J. Wear of Monocrystalline Diamond Tools During Ultraprecision Machining of Nonferrous Metals. *PRECISION ENGINEERING*, Vol. 14, No. 4, oct. 1992. p. 206-218.
- [54] OOMEN, J. M. 50 Jahre Präzisionsbearbeitung bei Philips Research. Diamant Technologie. *IDR* 1/96. p. 36-39.
- [55] SANTOS, I. *Usinagem de Ultraprecisão*. Dissertação de mestrado em elaboração. UFSC, Florianópolis, 1996.
- [56] McCLURE, E. R. *Development and Research Trends in Ultraprecision Machining*. Lawrence Livermore National Laboratory, [198-?]. 26 p.
- [57] ULTRAPRECISION Machining Technology Challenging Angstrom Units. *METAL-WORKING*, Engineering and Marketing, jan. 1989. p. 31-39.

- [58] BENJAMIN, R. J., ULPH, E. Diamond Turning of Infrared Optics. *SPIE* Vol. 306. Contemporary Methods of Optical Fabrication, 1981. p. 136-140.
- [59] ARNOLD, J. B., STEGER, P. J. *Diamond Turning on Advanced Machine Tool Prototypes*. In: SME Clinic on "Industrial Applications of Precision Machining and Gaging", 19-21/11/74. São Francisco, Califórnia. *Anais...* São Francisco, Califórnia, 1974. 21 p.
- [60] PREUSS, W. Ultrapräzisionsdrehen: Formtreu und spiegelblank. *VDI-Z* 132 (1990), Nr. 6. p. 30-37.
- [61] MUELLER, L. A. *Usinagem de Ultraprecisão*. Trabalho de classe da disciplina "Análise de Superfícies Usinadas" - UFSC, 1993. 38 p.
- [62] KÖNIG, W., SINHOFF, V., ZAMEL, S. *Manufacturing Strategies for the Production of Ultraprecision Parts*. Tutorial UME 3. IPT-Aachen. Aachen, may 1994. 98 p.
- [63] MYLER, J. K., PARKER, R. A., HARRISON, A. B. High Quality Diamond Turning. *SPIE* Vol. 1333. Advanced Optical Manufacturing and Testing, 1990. p. 58-79.
- [64] KIM, J. D., KIM, D. S. On the Size of Micro-Cutting Force in Ultraprecision Machining. In: UME 3, may 1994, Aachen. *Anais...* Aachen, 1994. 7 p.
- [65] DECKER, D. L. The Future in Diamond-Machined Optics. *SPIE* Vol. 676. Ultraprecision Machining and Automated Fabrication of Optics, 1986. p. 2-7.
- [66] ASAI, S., KOBAYASHI, A. Observations of Chip Producing Behaviour in Ultraprecision Diamond Machining and Study on Mirror Like Surface Generating Mechanism. *PRECISION ENGINEERING*, July 1990, Vol. 12, Nr. 3. p. 137-143.
- [67] WEBER, H., HEMPEL, E. Werkzeuge für die Ultrapräzisionsbearbeitung. *FEINGERÄTETECHNIK*, Berlin 37 (1988) 8. p. 342-343.

- [68] WECK, M., MODEMANN, K. Die Fertigungsqualität einer Feindrehmaschine steigern. *Industrie-Anzeiger* 78/1988. p. 21-27.
- [69] GERCHMAN, M. C. *Specifications and Manufacturing Considerations of Diamond-Machined Optical Components*. Reprinted of SPIE O-E Laser'86 Conference 607, jan. 1986, Los Angeles. 15 p.
- [70] RHORER, R. L., LUCCA, D. A. *An Experimental Procedure for Studying Diamond Turning Chip Mechanics*. [S.l.:s.n.]. p. 51-54.
- [71] BRINKSMEIER, E., MALZ, R., RIEMER, O. Mikrozerspanung duktiler und spröder Werkstoffe in optischer Qualität. *VDI Berichte* nr. 1276, 1996. p. 229-243.
- [72] HILGERS, W. *Auswirkung der Oberflächenstruktur auf die optische Leistungsfähigkeit diamantgedrehter Optiken*. Aachen, 1996. 80 p. Diplomarbeit, RWTH-Aachen, Aachen. 1996.
- [73] LANGENBECK, P. *Entwicklungsstand der Ultrapräzisionstechnik am Beispiel der Mikrozerspanung*. Anlässlich des Treffens am 15/10/85 im WZL/IPT Aachen. Gründung Forschungsgemeinschaft Ultrapräzisionstechnik, 1985. 20 p.
- [74] BACHMANN, G. *Nanotechnologie*. VDI-Technologiezentrum, Düsseldorf, 1994. 148 p.
- [75] HODGSON, B., LETTINGTON, A. H., STILLWELL, P. F. T. C. Diamond Turning of IR-Components. *SPIE* Vol. 590, Infrared Technology and Applications, 1985. p. 71-76.
- [76] JEANMICHEL, C., PREVOST, M. Diamond Turning with MOORE Machine for Infrared Applications - Machining and Results. *SPIE* Vol. 590. Infrared Technology and Applications, 1985. p. 62-70.

- [77] BURGHARDT, C. *Untersuchung der Feinstzerspanbarkeit von sprödharten Infrarotwerkstoffen am Beispiel von mono- und polykristallinen Germanium*. Aachen, 1991. 78 p. Diplomarbeit, RWTH-Aachen, 1991.
- [78] LO-A-FOE, T. C. G., DAUTZENBERG, J. H., VAN DER WOLF, A. C. H. *Cutting Forces and their Influences upon the Surface Integrity in Single-Point Diamond Turning*. Eindhoven University of Technology. The Netherlands, [198-]. p. 110-125.
- [79] INCREASING Priority Given to Mass Production in Product Development. *METALWORKING*. Engineering and Marketing, may 1990. p. 48-51.
- [80] MODEMANN, K. *Schwingungsbedingte Werkstückoberflächenmodulationen bei der ultrapräzisionsdrehbearbeitung*. Aachen, 1989. 144 p. Dissertation (Doutorado em Engenharia), RWTH-Aachen, 1989.
- [81] KOCH, E. N. *Technologie zum Schleifen asphärischer optischer Linsen*. Aachen, 1991. 140 p. Dissertation (Doutorado em Engenharia), RWTH-Aachen, 1991.
- [82] WESTORT, K. Diamond Machined Optics for Use at Visible Wavelengths. *SPIE* Vol. 508. Production Aspects of Single Point Machined Optics, 1984. p. 2-11.
- [83] McKEOWN, P. A. Ultraprecision Diamond Machining of Advanced Technology Components. *ADVANCED MANUFACTURING PROCESSES*, 1 (1), 1986. p. 107-132.
- [84] PRECISION Diamond Machining. *INDUSTRIAL DIAMOND REVIEW* 3/87.
- [85] SEAL, M. High-Tech Uses for Single-Crystal Natural Diamond. *Industrial Diamond Review* 2/85. p. 56-61.
- [86] SANGER, G. M. Improving Optical Fabrication. *LASER FOCUS/ELECTRO-OPTICS*, jan. 1984. p. 61-72.

- [87] WEICHHOLD, C. *Analyse der Oberflächengestalt von feinstgedrehten Metalloptiken*. Aachen, 1990. 69 p. Studienarbeit, RWTH-Aachen, 1990.
- [88] MARTIN, K. *Untersuchung der Zusammenhänge von technologischen Parametern und der erzeugten Oberflächenqualität bei der Mikrozerspannung im Plandrehprozeß*. Aachen, 1989. 98 p. Studienarbeit, RWTH-Aachen, 1989.
- [89] KRILL, O. *Maschinenkonzept zur Herstellung nicht-torischer Metalloptikoberflächen*. Aachen, 1989. 100 p. Studienarbeit, RWTH-Aachen, 1989.
- [90] JINNAN, L., ZHEJUN, Y., MING, Z. *Wear of Single Point Diamond Tool Turning Steel*. [S.l.:s.n.]. 4 p.
- [91] RÜBENACH, O. *Konstruktion von Systemkomponenten für die Mikroproduktionstechnik*. Aachen, 1996. 102 p. Diplomarbeit, RWTH-Aachen, 1996.
- [92] *A Designer's Guide to Diamond Machined Optics*. PNEUMO PRECISION, Inc., 1983. 17 p.
- [93] MORIWAKI, T., OKUDA, K. *Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting*. *Annals of the CIRP*, Vol. 38/1/1989. p. 115-118.
- [94] LANGENBECK, P., OHLINGS, W. *Optical Acceptance Testing for Ultra Precision Air Bearing Machines*. *SPIE Vol. 802. In-Process Optical Metrology for Precision Machining*, 1987. p. 12-25.
- [95] ZAMEL, S. *Werkstoffe der Nano- und Mikrotechnik*. Vortrag IPT-Aachen, 25/1/93.
- [96] SMITH, K. et al. *Diamond Turning of Mirrors and Infrared Optical Components*. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 21 (1988) ECOOSA'88. p 67-70.

- [97] WILLS-MOREN, W. J., READ, R. F. J. *Experiences in the Precision Machining of Brittle Materials*. Cranfield Precision Engineering Ltd, Cranfield, Bedford, England, 1988. 21 p.
- [98] McKEOWN, P. A. The Role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future. *Annals of the CIRP*, Vol. 36/2/1987. p. 495-501.
- [99] GENTRY, R. E. Diamond Point Machining Facility Design. *SPIE* Vol. 508. Production Aspects of Single Point Machined Optics, 1984. p.112-120.
- [100] NEISES, P. *Messung der Zerspankräfte bei der Ultrapräzisionsbearbeitung*. Aachen, 1994. 94 p. Diplomarbeit, RWTH-Aachen, 1994.
- [101] MORIWAKI, T., SHAMOTO, E. *Ultraprecision Ductile Cutting of Brittle Materials by Applying Ultrasonic Vibration*. [S.l.:s.n.], [199-]. p. 708-718.
- [102] BLAKE, P. N., SCATTERGOOD, R. O. Ductile-Regime Turning of Germanium and Silicon. *ASME* 12/88. p. 249-265.
- [103] CHALOUX, L. E. Part Fixturing for Diamond Machining. *SPIE* Vol. 508. Production Aspects of Single Point Machined Optics, 1984. p. 109-111.
- [104] BROWN, N. J., DONALDSON, R. R., THOMPSON, D. C. Fabrication of Machined Optics for Precision Applications. In: *SPIE*, 12-14/4/83, Kongresshaus Garmisch-Partenkirchen, West Germany. *Anais...* Garmisch-Partenkirchen, 1983. 15 p.
- [105] WECK, M., LUDERICH, J. *Influence of Thermal Expansion of the Cutting Tool on the Workpiece Accuracy During Diamond Turning*. IPT-Aachen, Aachen, [199-]. 10 p.
- [106] MORIWAKI, T., HORIUSHI, A., OKUDA, K. Effect of Cutting Heat on Machining Accuracy in Ultra-Precision Diamond Turning. *Annals of the CIRP*. Vol. 39/1/1990. p. 81-84.

- [107] PREUSS, W. Fertigung und Einsatz diamantbearbeiteter Metalloptiken. *Industrie-Anzeiger* 99/1988. p. 29-32.
- [108] ACKERMANN, E. *Monokristalliner Diamant als Schneidstoff für die Zerspanung mit definierter Schneide in der Ultrapräzisionstechnologie*. Aachen, 1989. 103 p. Studienarbeit, RWTH-Aachen, 1989.
- [109] WARZINIAK, W., PATZ, M. Bewertung monokristallinen Diamantwerkzeug für das Drehen im Nanometerbereich. *Präzisionsdrehen. IDR 1/93*. p. 26-33.
- [110] PYRA, M. *Untersuchung und Entwicklung einer geeigneten Kraftmeßeinrichtung zur Erfassung von statischen und dynamischen Kräften als meßtechnische Größe bei Mikrozerspannung im Plandrehprozeß*. Aachen, 1988. 59 p. Studienarbeit, RWTH-Aachen, 1988.
- [111] SUSSMANN, R. S. DIAFILM - Neues Diamantmaterial für optische und elektronische Anwendungen. *IDR 2/93*. p. 124-134.
- [112] DESSAUVAGIE, A. D. Naturdiamant für spezielle Anwendungen in der Industrie. Sonderdruck aus *IDR 21 (1987) Nr. 1*. p. 26-31.
- [113] BEX, P.A. Diamant-Drehwerkzeuge. *IDR 9 (1975) Nr. 4*. p. 212-222.
- [114] BECKER, W. Glanzdrehen und -fräsen mit Naturdiamant-Werkzeugschneiden. *wt - Z. ind. Fertigung*. 75 (1985) Nr. 5. p. 317-319.
- [115] KÖNIG, W., SPENRATH, N., ZAMEL, S. Verschleißverhalten monokristalliner Diamantwerkzeuge. *IDR 3/94*. p. 146-152.
- [116] KÖNIG, W. *Fertigungsverfahren - Band 1. Drehen, Fräsen, Bohren*. 4. Auflage. VDI - Verlag, Düsseldorf, 1990. 416 p.

- [117] OHMORI, G., TAKADA, S. Primary Factors Affecting Accuracy in Ultra-Precision Machining by Diamond Tool. *Bull. Japan. Soc. of Prec. Engg.*, Vol. 16, n. 1, mar. 1982. p. 3-7.
- [118] PATZ, M. *Fertigungstechnische Bewertung monokristalliner Diamantwerkzeuge für das Präzisionsdrehen im Nanometerbereich*. Jena, 1993. 151 p. Dissertation (Doutorado em Engenharia), Friedrich-Schiller-Universität, Jena, 1993.
- [119] DIE Eigenschaften des Diamanten. De Beers Diamond Research Laboratory, Johannesburg, 1983. 7 p.
- [120] GENERAL Catalog - Synthetic Single Crystal Diamond SUMI-CRYSTAL. Sumitomo Electric Industries, Ltda. 14 p.
- [121] KOCH, K.-F. *Technologie des Hochpräzisions-Hartdrehens*. Aachen, 1996. 167 p. Dissertation (Doutorado em Engenharia), RWTH-Aachen, 1996.
- [122] DAS Orientieren von Diamanten für Einkristallwerkzeuge mit Hilfe von Röntgenstrahlen. *IDR 5* (1971) Nr. 2. p. 89-93.
- [123] IKAWA, N., SHIMADA, S., OHMORI, G. *Recent Trends in Diamond Tool Technology*. [S.l.:s.n.]. p. 126-143.
- [124] IKAWA, N., SHIMADA, S. *Cutting Tool for Ultraprecision Machining*. [S.l.:s.n.]. p. 357-364.
- [125] HURT, H. H., DECKER, D. L. Tribological Considerations of the Diamond Single-Point Tool. *SPIE*, Vol. 508. Production Aspects for Single Point Machined Optics, 1984. p. 126-131.
- [126] DECKER, D. L. et al. Preselection of Diamond Single-Point Tools. *SPIE* Vol. 508, 1984. p. 132-139.

- [127] SHIMADA, S. et al. The Scientific Qualification of Diamond as Applied to a Highly Reliable Cutting Tool. In: 5<sup>th</sup> PRECISION ENGINEERING Seminar. 18-22/9/1989, Monterey, California. *Anais...* Monterey, California, 1989, p. 75-85.
- [128] BRINKSMEIER, E. *Ultrapräzise Drehbearbeitung von Stahl mit monokristallinen Diamantwerkzeugen*. Neuantrag an die DFG, 1994. 34 p.
- [129] DAVIES, S. T. Ion Beam Machining of Diamond. *INDUSTRIAL DIAMOND REVIEW* 5/89. p. 201-203.
- [130] MIYAMOTO, I. Ultra Fine Finishing of Diamond Tools by Ion Beam. *PRECISION ENGINEERING*, Vol. 9, No. 2, apr. 1987. p. 71-78.
- [131] LUCCA, D. A., SEO, Y. W. Effect of Tool Edge Geometry on Energy Dissipation in Ultraprecision Machining. *Annals of the CIRP*, Vol. 42/1/1993. p. 83-86.
- [132] SOILEAU, M. J. et al. 10,6  $\mu\text{m}$  Pulsed Laser Damage Studies of Diamond Turned KCl Window Surfaces. Laser Induced Damage in Optical Materials. *NBS Special Publication*, Vol 462 (1976). p. 149-157.
- [133] ARNOLD, J. B. et al. Machinability Studies of Infrared Windows Materials and Metals. *OPTICAL ENGINEERING*, Vol. 16, Nr. 4, jul.-aug. 1977. p. 324-331.
- [134] BLACKIE, P. N., SCATERGOOD, R. O. Ductile-Regime Machining of Germanium and Silicon. *J. Am. Ceram. Soc.* 73 (4), 1990. p. 949-957.
- [135] BLACKLEY, W. S., SCATERGOOD, R. O. Diamond Turning of Brittle Materials. In: 5<sup>th</sup> International PRECISION ENGINEERING Seminar, 18-22/9/89, Monterey, California. *Anais...* Monterey, 1989, p. 252-257.
- [136] BLACKLEY, W. S., SCATERGOOD, R. O. Ductile-Regime Machining Model for Diamond Turning of Brittle Materials. *PRECISION ENGINEERING*, Vol. 13. No. 2, apr. 1991. p. 95-103.

- [137] SYN, C., TAYLOR, J. S., DONALDSON, R. R. *Ductile-Brittle Transition of Cutting Behavior in Diamond Turning of Single Crystal Si*. Preprint for The Japan Society of Precision Engineering. Meiji University, Kawasaki, Japan, 16-18/3/1988. 8 p.
- [138] BLACKLEY, S., SCATTERGOOD, R. O. *Mechanics of Material Removal in Diamond Turning*. Precision Engineering Center, North Carolina State University. p. 68-71.
- [139] FUCHS, B. A. et al. Optical Activities in Industry. *Applied Optics*, Vol. 25, Nr. 11, 6/1986. p. 1733-1735.
- [140] VENKATESH, V. C. et al. Polishing and Ultraprecision Machining of Semiconductor Substrate Materials. *Annals of the CIRP*, Vol. 44/2/1995. p. 1-7.
- [141] INAMURA, T., TAKEZAWA, N. Atomic Scale Cutting in a Computer Using Crystal Models of Copper and Diamond. *Annals of the CIRP*, Vol. 41/1/1992. p. 121-124.
- [142] FURUKAWA, Y., MORONUKI, N. Effect of Material Properties on Ultraprecise Cutting Processes. *Annals of the CIRP*, Vol. 37/1/1988. p. 113-116.
- [143] KÖNIG, W., SPENRATH, N. Zerspantechnologie im Mikrometerbereich. *Werkstofftechnik. Industrie-Anzeiger* 99/1988. p. 33-36.
- [144] GUTMANN, P. *Zerspankraftberechnung beim Wälzfräsen*. Aachen, 1988. 127 p. Dissertation (Doutorado em Engenharia), RWTH-Aachen, 1988.
- [145] DRESCHER, J. D., DOW, T. A. Tool Force Model Development for Diamond Turning. In: 5<sup>th</sup> International PRECISION ENGINEERING Seminar, 18-22/9/1989, Monterey, California. *Anais...* Monterey, California, 1989.
- [146] SUGANO, T., TAKEUSHI, K. Diamond Turning of an Aluminum Alloy for Mirror. *Annals of the CIRP*, Vol. 36/1/1987. p. 17-20.

- [147] LIN, J. S., WENG, C. I. A Nonlinear Dynamic Model of Cutting. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 30, Nr. 1, 1990. p. 53-64.
- [148] QUEINS, C. *Entwicklung eines Zerspankraftmodells für die Präzisions-Hartdrehbearbeitung*. Aachen, 1996. 43 p. Studienarbeit, RWTH-Aachen, 1996.
- [149] OSENBERG, W., WEINZ, E. A. Schnittkräfte beim Glanzschneiden. Sonderabdruck aus *Werkstattstechnik - wt-Zeitschrift für industrielle Fertigung.*, 1970, Heft 9. VDI-Verlag, Düsseldorf. p. 532-536.
- [150] SATO, M., KATO, Y., TUCHIYA, K. Effects of Material Anisotropy Upon the Cutting Mechanism. *Trans. JIM*, Vol. 19, 1978. p. 530-536.
- [151] UEDA, K., IWATA, K. Chip Formation Mechanism in Single Crystal Cutting of  $\beta$ -Brass. *Annals of the CIRP*, Vol. 29/1/1980. p. 41-46.
- [152] SATO, M. et al. Effects of Crystal Orientation on the Cutting Mechanism of the Aluminum Single Crystal. *Bulletin of the JSME*, Vol. 26, Nr. 215, may 1983. p. 890-896.
- [153] CARROL, J. T., DOW, T., STRENKOWSKI, J. S. Tool Force Measurement and Prediction in Diamond Turning. *SPIE* Vol. 676. *Ultraprecision Machining and Automated Fabrication of Optics*, 1986. p. 104-110.
- [154] MASUDA, M. et al. A Study on Diamond Turning of Al-Mg Alloy - Generation Mechanism of Surface Machined with Worn Tool. *Annals of the CIRP*, Vol. 38/1/1989. p. 111-114.
- [155] SHAMOTO, E., MORIWAKI, T. Study on Elliptical Vibration Cutting. *Annals of the CIRP*, Vol. 43/1/1994. p. 35-38.
- [156] MORIWAKI, T., SHAMOTO, E. Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting. *Annals of the CIRP*, Vol. 44/1/1995. p. 31-34.

- [157] TAMINIAU, D. A., DAUTZENBERG, J. H. Bluntness of the Tool and Process Forces in High Precision Cutting. *Annals of the CIRP*, Vol. 40/1/1991. p. 65-68.
- [158] BRINKSMEIER, E., PREUSS, W., RIEMER, O. From Friction to Chip Removal - An Experimental Investigation of the Microcutting Process. In: International Progress in Precision Engineering. Proceedings of the 8th International Precision Engineering Seminar, may 1995, Compiègne, France. *Anais...* Compiègne, France, 1995, p. 335-338.
- [159] SCHERER, V. et al. Characterization of Micromachined Surfaces by Atomic Force Microscopy. In: Proceedings of the 9<sup>th</sup> ASPE, oct. 1994, Ohio. *Anais...* Ohio, 1994, p. 167-173.
- [160] STEVENS, R., ANDERSON, C., RHORER, R. Numerical Analysis of the Ultraprecision Machining of Copper. In: International Progress in Precision Engineering. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Precision Engineering Seminar, may 1995, Compiègne, France. *Anais...* Compiègne, France, 1995, p. 285-289.
- [161] POLYBLOC typ 1 - Dreh- und Bohrschneiden. Ernst Winter & Sohn GmbH. 19 p.
- [162] DUBBEL - Taschenbuch für den Maschinenbau. 16. Auflage, Springer Verlag, 1987.
- [163] BELAK, J. F., STOWERS, I. F. A Molecular Dynamics Model of the Orthogonal Cutting Process. In: ASPE Annual Conference, 23-28/9/1990. *Anais...* p. 76-79.
- [164] IKAWA, N., SHIMADA, S., TANAKA, H. Minimum Thickness of Cut in Micromachining. *Nanotechnology* 3 (1992). p. 6-9.
- [165] IKAWA, N. et al. An Atomistic Analysis of Nanometric Chips Removal as Affected by Tool-Work Interaction in Diamond Turning. *Annals of the CIRP*, Vol. 40/1/1991. p. 551-554.

- [166] GESSNER, W. Piezoelektrische Messung von Kräften und Kraftstößen. *P1N-Ph.* 1/36. Jahrgang 1987. p. 14-26.
- [167] SCHROETER, R. B. *Forças na Usinagem de Ultraprecisão de Materiais Transmissivos no Espectro Infravermelho.* 3° Relatório de Atividades CNPq. Aachen, 1996. 40 p.
- [168] WINZER, M. *Entwurf, Berechnung und Auslegung eines hochgenauen Funktionselementes zur Feinstzustellung von Werkzeugen auf Präzisionsmaschinen.* Aachen, 1985, 73 p. Studienarbeit, RWTH-Aachen, 1985.
- [169] WOLFER, P. *Piezoelektrische Meßtechnik - Stand der Technik, Entwicklungspotential und neue Anwendungsmöglichkeiten.* Beilage zum Vortrag, 15/1/96, RWTH-Aachen. Aachen, 1996.
- [170] KOMANDURI, R., BROWN, R. H. On the Mechanics of Chip Segmentation in Machining. *Journal of Engineering for Industry*, feb. 1981, Vol. 103. p. 33-51.
- [171] BERGER, M. Kriterium ist die Optik. *LASER MAGAZIN* 1/86. p. 11-14.
- [172] SHERMAN, G. H., FRAZIER, G. F. Transmissive Optics for High Power CO<sub>2</sub> Lasers: Practical Considerations. *OPTICAL ENGINEERING*, may-jun. 1978, Vol. 17, Nr. 3. p. 225-231.
- [173] BERGER, M. R., REEDY, H. E. Optics for High Power CO<sub>2</sub>-Lasers. *SPIE* Vol. 455 - Industrial Applications of High Power Lasers, 1984. p. 52-57.
- [174] LUSSIER, F. M. Guide to IR-Transmissive materials. *Laser Focus*, dec. 1976. p. 47-50.
- [175] TECHNICAL Bulletin #112. CLEARTRAN. MORTON International Woburn, MA. 4 p.
- [176] TECHNICAL Bulletin #111. CVD ZINC SULFIDE. Woburn, MA. 4 p.

- [177] GROSSKOPF, K. *Laseroptiken*. Kurzvortrag, RWTH-Aachen, aug. 1985. 8 p.
- [178] DE LAET, L. H. Advantages of Monocrystalline Germanium for Infrared Optics. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, Vol. 109, 1977. p. 6-9.
- [179] INFRARED Materials - ZnSe, ZnS regular, ZnS MultiSpectral. II-VI Incorporated, 1991. 8 p.
- [180] MATERIALS Safety Data Sheet - Clairsol 310. Carless Refining and Marketing b. v. 1991. 1 p.
- [181] GERCHMAN, M. C., McLAIN, B. E. *An Investigation of the Effects of Diamond Machining of Germanium for Optical Applications*. [S.l.:s.n.]. 5 p.
- [182] BEEKMANS, W. J. *Prediction of Tolerances in Precision Cutting for Mass Production*. Consumer Electronics Vid. Lab. Philips Eindhoven (NL). p. 143-150.
- [183] KÖNIG, W., ESSEL, K., WITTE, L. *Spezifische Schnittkraftwerte für die Zerspanung metallischer Werkstoffe*. Verlag Stahleisen MBH, Düsseldorf, 1982. 19 p.
- [184] WARZINIAK, W., PATZ, M. Wirkverhalten bewerteter monokristalliner Diamantwerkzeuge. *IDR 2/93*. p. 135-140.
- [185] JOCHMANN, S. *Experimentelle Ermittlung der Prozeßkräfte und der Energieverteilung beim Hartdrehen mit minimalen Spanungsdicken*. Aachen, 1996. 42 p. Studienarbeit, RWTH-Aachen, 1995.
- [186] OPERATING and Maintenance Manual - MSG 325. Rank Pneumo Inc. Keene, NH, 1986.
- [187] OPERATOR'S Manual for 2-Axis Lathe Applications. Series 8200 CNC. Allen-Bradley Company Publication 8200 - 5.1.1, Cleveland, Ohio, 1982.

- [188] MODEMANN, K. *Meßtechnische Untersuchung der Ultrapräzisionsdrehmaschine MSG 325*. Bericht zum Forschungsvorhaben für die Firma Rodenstock. IPT-Aachen, Aachen, [198-]. 20 p.
- [189] ENGINEERING Specifications - Rank Pneumo Model MSG-325. Rank Pneumo Inc., Keene, NH, 1995. 8 p.
- [190] INSTRUCTION Manual for TOPO-3D Three-Dimensional Non-Contact Surface Profiler - Version 3.0. WYKO Corporation. Tucson, Arizona, may 1986. 83 p.
- [191] BETRIEBS- und Serviceanleitung. Quarz-Kraftaufnehmer mit hoher Empfindlichkeit - Type 9205/9207. KISTLER Instrumente AG, 1986. 17 p.
- [192] BETRIEBS- und Serviceanleitung. Ladungsverstärker - Type 5011. KISTLER Instrumente AG, 1989. 67 p.
- [193] COMPACDYN: 3-Komponenten-Dynamometer  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  - Type 9254. KISTLER Instrumente AG, 1995. 4 p.
- [194] KIRCHHEIM, A., SIDLER, A., STIRNIMANN, J. Zerspankraftmessung bei der Feinstbearbeitung. Sonderdruck aus "*Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 6/96", 1996. 4 p.
- [195] KREYSZIG, E. *Statistische Methoden und ihre Anwendungen*. 7. Auflage. Vanderhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1975. 451 p.
- [196] BRONSTEIN, N., SEMENDJAJEW, K. A. *Taschenbuch der Mathematik*. 22. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 1985. 840 p.
- [197] SPIEGEL, M. R. *Estatística*. 11<sup>a</sup> Reimpressão, McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1979. 580 p.

- 
- [198] MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 2. Edition, John Wiley & Sons, Singapore, 1984. 538 p.
- [199] SCHNEIDER, C. A., LÜCKE, H. A. *Técnicas da Pesquisa Experimental*. Apostila do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFSC, Florianópolis, 1990.

## 9. Anexos

### 9.1. Características dos Equipamentos Utilizados

#### 9.1.1. Máquina de ultraprecisão Rank Pneumo Precision MSG 325

A máquina-ferramenta de ultraprecisão MSG 325, do fabricante norte-americano Rank Pneumo Precision, é própria para trabalhos de torneamento e fresamento com ferramentas de diamante monocristalino. A mesma possui características bastante especiais, não encontradas normalmente em outras máquinas, como uma grande capacidade de isolamento de vibrações do meio-ambiente, estabilidade térmica, precisão de posicionamento e repetibilidade, entre outras.

As guias (eixos X e Z), posicionadas na configuração "T", são aerostáticas, de modo que não ocorra o contato entre as partes móveis e estáticas. Assim o indesejado efeito de "stick-slip" é, por sua vez, evitado. Um sistema de medição de trajetória baseado no princípio da interferometria LASER, em combinação com um comando numérico Allen-Bradley 8200 de alta resolução, permite o controle de movimentações em dois eixos até um limite mínimo teórico de 10 nm.

Para a movimentação das guias aerostáticas são empregados motores elétricos de corrente contínua ligados a um fuso de esferas recirculantes de alta precisão, que permitem velocidades de deslocamento de 0,25 a 254 mm/min em ambos os eixos. Os erros de linearidade do sistema de guias são, através de medidas construtivas e de montagem, mantidos em valores abaixo de 100 nm por 100 mm de percurso. As guias têm um percurso máximo de 300 mm no eixo X e de 200 mm no eixo Z, aproximadamente.

A árvore da máquina-ferramenta, construída com mancais aerostáticos de dupla calota esférica, garante uma elevada rigidez (rigidez radial de aproximadamente 85 N/ $\mu\text{m}$  e rigidez axial de aproximadamente 140 N/ $\mu\text{m}$ ) e precisão de movimentação, com erros de batimento inferiores a 0,1  $\mu\text{m}$ . As características de funcionamento da árvore dependem, entretanto, de um balanceamento acurado da placa de fixação ou da placa para "fly-

cutting", o que pode ser realizado com o auxílio de parafusos dispostos radialmente nas placas. A velocidade de rotação do fuso pode ser continuamente variada no intervalo de 100 a 2400 rpm, através de um motor de corrente contínua acoplado à árvore por correia plana.

O comportamento térmico da máquina é controlado tanto através de medidas ativas quanto passivas. A máquina-ferramenta é mantida em um ambiente climatizado de 20°C, com variação de temperatura máxima de 0,5°C e umidade do ar de 20%. Desta maneira garante-se um meio-ambiente em condições praticamente constantes, de forma que as deformações térmicas de elementos da máquina sejam mantidas em um nível mínimo e a influência das mesmas sobre a qualidade final da peça usinada seja desprezível. Assim evita-se também que o sistema de medição sofra as influências negativas de variações de densidade e umidade do ar.

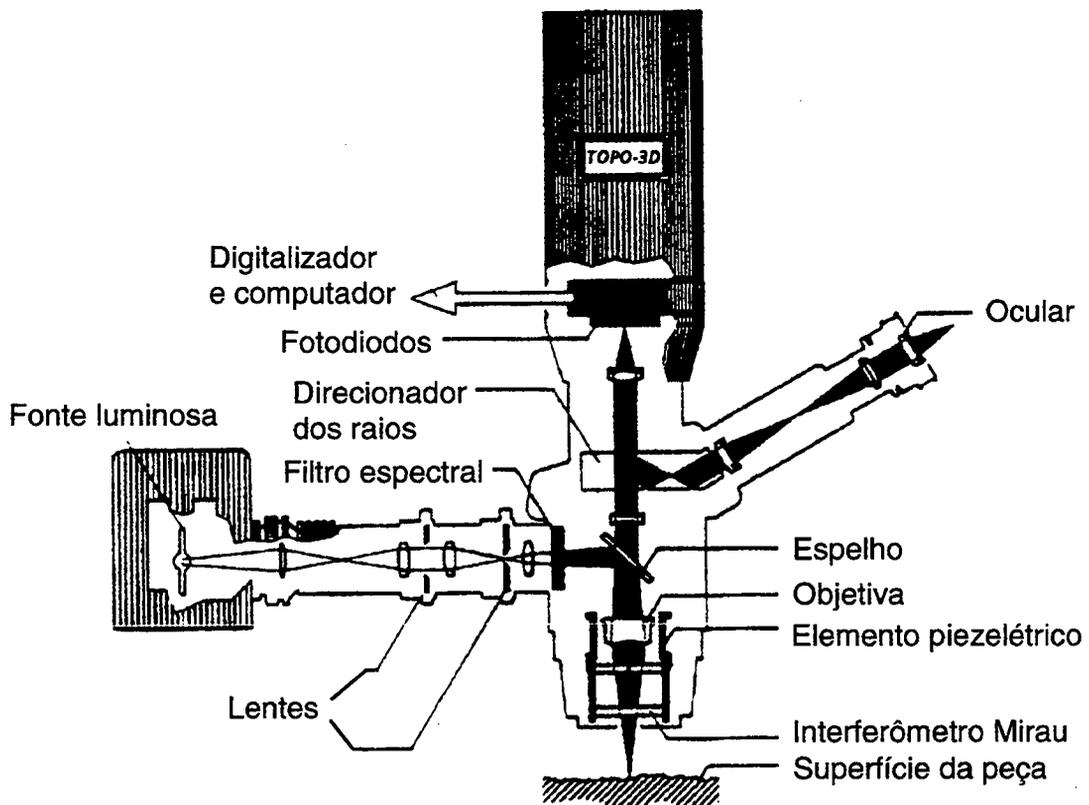
Para manter as deformações causadas pelo peso próprio e pelas forças do processo de usinagem em níveis baixos, o corpo da máquina-ferramenta é construído de um bloco de granito natural maciço, com peso aproximado de 6 t. Além disto, toda a máquina é colocada sobre elementos pneumáticos de amortecimento, para prevenir os efeitos negativos de vibrações do meio-ambiente sobre o resultado final de trabalho [5, 20, 48, 186, 187, 188, 189].

### **9.1.2. Microscópio interferométrico Wyko TOPO-3D**

O microscópio interferométrico TOPO-3D, fabricado pela firma Wyko Corporation, trata-se de um instrumento de medição que utiliza o princípio das franjas de interferência para calcular diferenças de altura entre picos de rugosidade em superfícies extremamente bem acabadas. O sistema trabalha com uma fonte de luz branca e um filtro colorido ( $\lambda = 649,7$  nm), e dispõe de duas objetivas do tipo Mirau controladas por computador (HP 9153) com aumentos de 10 e 40 vezes, respectivamente. Os campos de medição horizontais são de  $1 \times 1$  mm<sup>2</sup>, para aumentos de 10x, e de  $250 \times 250$   $\mu\text{m}^2$ , para aumentos de 40x, sendo a imagem refletida projetada em uma placa de fotodiodos com  $256 \times 256$  "pixel". Assim tem-se, de acordo com o aumento escolhido, uma resolução lateral de 4  $\mu\text{m}$  (10x) ou de 1  $\mu\text{m}$

(40x). O campo de medição vertical é de 0,3 nm a 15  $\mu\text{m}$ , a resolução vertical de 0,1 nm (RMS) e a repetibilidade de 0,5 nm (RMS).

Na **figura 9.1** pode ser acompanhado o trajeto de um feixe luminoso neste equipamento. A luz proveniente de uma fonte de luz branca atravessa várias lentes, passa pelo filtro espectral e atinge um espelho semi-transmissivo posicionado em um ângulo de  $45^\circ$ . Deste espelho o feixe luminoso é desviado  $90^\circ$  para baixo e passa através da objetiva e do interferômetro Mirau, onde se reflete na superfície da peça analisada. Este feixe refletido é então comparado com outro de um espelho de referência, sendo formado um interferograma. Este padrão de interferência, cujas diferenças de intensidade têm relação com as diferenças de altura dos diversos pontos da superfície, é captado tanto pela ocular quanto pela placa de fotodiodos, de modo que pode ser digitalmente armazenado e analisado.



**Figura 9.1** - Esquema de funcionamento do microscópio interferométrico TOPO-3D [2]

Neste tipo de equipamento de medição não são aproveitados os padrões de interferência estáticos, e sim é utilizado o processo de medição de fases. Para isto, o espelho de referência é deslocado em um percurso de  $\lambda/8$  através de um elemento piezolétrico, o que leva a uma defasagem nas fases entre as frentes de onda de medição e de referência. O deslocamento do espelho e a alteração do padrão interferométrico da imagem permitem então a análise quantitativa do perfil da superfície observada, através de um "software" próprio. Este programa permite, por sua vez, a apresentação dos resultados de medição na forma de gráficos 2D e 3D. Dos valores de altura podem ser calculadas as rugosidades  $R_a$ , RMS e P-V.

Ao lado de diversas possibilidades de análise estatística, o equipamento permite também a análise parcial da imagem, ou seja, através do emprego de máscaras podem ser escolhidas e analisadas regiões específicas da imagem [2, 20, 48, 190].

### **9.1.3. Microscópio óptico Olympus BH2-UMA**

Este tipo de equipamento, fabricado pela firma japonesa Olympus Optical Co., permite a análise qualitativa de superfícies através imagens de interferência Nomarsky, que podem ser apresentadas em vídeo ou serem impressas. Devido às características construtivas deste tipo de equipamento, com o uso de luz polarizada é possível verificar com muita clareza a topografia de superfícies, de modo que se pode assim avaliar subjetivamente o estado da mesma. Com esta técnica de verificação da qualidade superficial tem-se uma complementação das informações de rugosidade obtidas com métodos de medição por interferometria, principalmente na avaliação de danos superficiais do tipo "pittings", já que apenas os valores de rugosidade muitas vezes não são suficientes para definir a qualidade de uma superfície óptica.

A resolução e o campo de visão do microscópio utilizado variam conforme o aumento adotado. Para os aumentos possíveis de 50, 100, 200, 500 e 1000x tem-se um campo de visão circular com diâmetro variando de 2 mm a 100  $\mu\text{m}$ , com uma resolução lateral máxima teórica de 1  $\mu\text{m}$ .

#### 9.1.4. Sistema de medição de forças

O sistema projetado e construído para a medição de forças na usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos, cujos detalhes construtivos são detalhadamente descritos no capítulo 4, é constituído de uma plataforma de medição com sensores piezelétricos de alta sensibilidade, amplificadores de sinal, um sistema de aquisição e tratamento de dados e um computador para análise dos dados obtidos. A seguir são fornecidas as principais características dos elementos constitutivos do sistema de medição de forças.

##### □ Sensores piezelétricos [191]

Fabricante: Kistler Instrumente AG

Tipo: 9205

Campo de aplicação: - 50 ... 50 N

Campo calibrado: - 5 ... 5 N

Sensibilidade: - 115 pC/N

Resolução: 0,5 mN

Linearidade:  $< \pm 1 \% \text{ FSO}$

Histerese:  $< 0,5 \% \text{ FSO}$

Rigidez: aprox. 4 N/ $\mu\text{m}$

Freqüência natural:  $> 10 \text{ kHz}$ .

##### □ Amplificadores de sinal [192]

Fabricante: Kistler Instrumente AG

Tipo: 5011

Saída analógica:  $\pm 10 \text{ V}$

Linearidade:  $< \pm 0,05\%$ .

##### □ Sistema de aquisição de dados

Tipo: Placa A/D PCI-20041C Carrier e PCI-20002M Module

Fabricante: Burr-Brown

Freqüência máxima de aquisição: 2 kHz (soma de todos os canais).

Microcomputador IBM-PC

Processador: Intel 486.

 "Software" de análise de dados

Tipo: DIA/DAGO-PC versão 5.1

Fabricante: GfS.

Para efeitos comparativos foram realizados ensaios de "fly-cutting" com uma plataforma piezométrica de alta sensibilidade, com as características descritas a seguir. Os demais elementos do sistema de medição são mantidos conforme descrito anteriormente.

 Plataforma piezométrica [193, 194]

Fabricante: Kistler Instrumente AG

Tipo: 9254

Campo de aplicação para  $F_x$  e  $F_y$ : - 500 ... 500 N

Campo de aplicação para  $F_z$ : - 1000 ... 1000 N

Campo calibrado para  $F_x$  e  $F_y$ : 0 ... 5 N

Campo calibrado para  $F_z$ : 0 ... 10 N

Sensibilidade para  $F_x$  e  $F_z$ :  $\approx - 8$  pC/N

Sensibilidade para  $F_x$  e  $F_z$ :  $\approx - 4$  pC/N

Resolução: < 10 mN

Linearidade: <  $\pm 0,5\%$  FSO

Histerese: < 0,5% FSO

Rigidez: > 1 kN/ $\mu$ m

Freqüência natural:  $\approx 2$  kHz.

## 9.2. Análise Estatística

### 9.2.1. Análise estatística da qualidade superficial

A análise estatística do processo de medição da rugosidade de superfícies ópticas é um procedimento importante e necessário, já que somente uma medição da rugosidade não é suficiente para exprimir a qualidade superficial de toda uma superfície usinada. Isto ocorre porque a qualidade superficial não é a mesma em todos os pontos da superfície usinada, devido a fatores de processo, não homogeneidade do material da peça e incertezas do instrumento de medição. Entretanto, devido ao custo e ao tempo necessários para a realização de uma grande quantidade de medições de rugosidade, deve ser estabelecido um compromisso entre a quantidade de medições para uma determinada superfície e a incerteza de resultado resultante deste procedimento de medição. Neste sentido, a análise estatística descrita a seguir visa obter a quantidade mínima de medições necessária para a determinação da rugosidade de um corpo de prova com uma incerteza de resultado aceitável.

A qualidade superficial dos cristais infravermelhos estudados neste trabalho foi determinada através de interferometria óptica, com o equipamento descrito no item 9.1., sendo medidos os valores de rugosidade  $R_a$  e P-V. Estes parâmetros de rugosidade são diferentemente influenciados pela análise estatística e pelas médias de valores que decorrem da mesma, visto que a natureza dos parâmetros  $R_a$  e P-V é diferente. Os valores P-V, por exemplo, representam o valor da máxima diferença entre os picos e vales de rugosidade, de maneira que a média dos mesmos diminui consideravelmente a sua representatividade, visto que picos únicos não são mais reconhecidos. Já os valores de  $R_a$  são relativamente pouco influenciados pela média, considerando que por definição a rugosidade  $R_a$  já é uma média de valores [1].

O julgamento da significância de diferentes parâmetros de trabalho sobre os valores de rugosidade  $R_a$  e P-V exige o cálculo dos desvios-padrões de uma amostra. Com auxílio da estatística é possível verificar a probabilidade que os valores de rugosidade de uma amostra de tamanho  $n$  tem de apresentar uma determinada distribuição, com uma determinada probabilidade de ocorrência. Para isto existem as distribuições padronizadas,

obtidas do modelamento matemático de experimentos, assim como os testes, que fundamentam as análises estatísticas. Uma das distribuições mais conhecidas é a distribuição normal ou de Gauss, que pode ser verificada através do teste Qui-quadrado [20].

A estatística permite o emprego da metodologia de adotar uma hipótese sobre uma determinada distribuição, por exemplo, e verificar através de procedimentos de teste se esta hipótese deve ou não ser aceita. Para isto, entretanto, deve ser definida primeiramente uma incerteza de resultado aceitável [195, 196, 197, 198]. Para análises de baixo risco é normalmente adotado um nível de significância  $\alpha$  de 5% [1]. A hipótese adotada decorre da teoria que se deseja verificar, sendo ao mesmo tempo elaborada uma hipótese alternativa contrária à hipótese adotada. Do nível de significância e do tamanho da amostra medida obtém-se um valor crítico Qui-quadrado. Se este valor crítico não for atingido, a hipótese não pode ser descartada.

O resultado do teste Qui-quadrado depende fortemente do tamanho de amostra  $n$ . Pode ocorrer, por exemplo, que para um grande valor de  $n$  a hipótese seja aceita, enquanto que para  $n$  pequenos a mesma deve ser descartada. Por outro lado, para o tamanho de amostra deve ser escolhido um valor razoável, que não represente demasiado tempo ou custo. De um modo geral considera-se que uma amostra de tamanho  $n \geq 100$  é suficiente [20, 195, 197].

Através do teste Qui-quadrado é calculada a probabilidade de ocorrência da grandeza de medição para um determinado intervalo de classes a partir da distribuição hipotética (usualmente a distribuição normal) e comparada com as frequências relativas da amostra. Deste procedimento obtém-se o valor comparativo para o valor crítico Qui-quadrado. No teste Qui-quadrado deve ser observada, entretanto, a manutenção das condições de contorno, de modo que os resultados do teste resultem confiáveis [195].

A análise estatística para a verificação da distribuição dos valores medidos de rugosidade  $R_a$  e P-V e para a determinação do valor mínimo de amostra  $n$ , de forma a obter um resultado confiável, foi realizada para um corpo de prova de referência, usinado com parâmetros de trabalho e sob condições de trabalho usuais para a obtenção de uma peça

com qualidade óptica. Como tamanho de amostra foi adotado  $n = 100$ , considerado um valor suficientemente grande para a obtenção de resultados confiáveis [20]. O corpo de prova foi dividido em dez setores, sendo em cada setor realizadas dez medições de rugosidade  $R_a$  e P-V. A seguir é descrito o procedimento adotado para a realização do teste Qui-quadrado em relação à rugosidade do corpo de prova analisado. Os valores da média  $\bar{x}$ , desvio-padrão  $s$  e variância  $s^2$  para  $R_a$  e P-V, calculados de acordo com as equações 9.1 e 9.2 [195, 196, 197, 198], bem como os valores de rugosidade  $R_a$  e P-V obtidos através deste processo de medição podem ser vistos nas figuras 9.2 e 9.3 a seguir.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{9.1}$$

$$s^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \tag{9.2}$$

Resultados de Medição da Rugosidade $R_a$ [nm]									
2,55	2,34	2,94	2,49	2,91	2,68	3,00	2,28	3,20	3,06
2,36	2,19	2,52	2,83	2,61	2,71	2,62	2,82	2,74	2,88
4,03	3,28	3,76	3,02	2,55	2,18	2,71	2,73	2,47	3,27
3,12	2,50	2,92	2,58	2,37	1,82	2,91	3,17	2,86	3,28
2,52	2,80	2,82	2,41	2,43	2,32	2,62	3,36	2,69	3,04
2,49	2,24	2,96	2,29	2,04	2,22	2,69	2,77	2,78	2,82
2,37	2,63	2,46	2,86	2,89	3,24	3,57	2,30	3,28	2,72
2,78	3,23	2,48	3,31	2,45	2,92	2,93	3,18	3,11	2,69
2,52	2,26	2,47	2,81	1,79	3,33	2,93	3,09	2,97	2,56
2,87	1,67	2,03	2,45	2,78	2,78	2,22	2,53	2,43	2,75
$X_{\min} = 1,67 \text{ nm} ; X_{\max} = 4,03 \text{ nm} ; \bar{X} = 2,72 \text{ nm} ; S^2 = 0,16 \text{ nm}^2 ; S = 0,40 \text{ nm}$									

Figura 9.2 - Valores de rugosidade  $R_a$  da amostra medida

Resultados de Medição da Rugosidade P-V [nm]									
30,5	21,4	25,9	28,2	18,2	32,8	32,8	38,1	28,2	19,8
22,2	26,8	30,1	24,4	16,6	28,7	22,5	22,8	25,7	17,6
32,0	22,8	16,7	19,7	25,4	30,3	17,0	36,5	18,9	33,2
22,5	22,2	23,8	25,1	35,2	20,1	21,1	27,6	25,5	37,0
31,7	24,4	27,0	28,5	25,9	20,9	21,6	25,4	38,5	32,2
25,5	20,1	26,5	20,8	28,4	21,4	32,0	21,6	24,6	26,8
25,9	14,8	28,4	35,7	23,2	29,2	23,5	23,6	33,5	24,4
27,1	20,6	37,1	34,6	23,3	26,2	30,3	22,2	24,8	27,1
25,4	19,8	23,5	26,3	22,2	35,8	28,4	22,0	25,4	19,0
22,5	25,2	29,8	19,7	23,7	21,3	26,6	42,2	26,9	20,3
$X_{\min} = 14,8 \text{ nm}$ ; $X_{\max} = 42,2 \text{ nm}$ ; $\bar{X} = 25,9 \text{ nm}$ ; $S^2 = 30,6 \text{ nm}^2$ ; $S = 5,5 \text{ nm}$									

**Figura 9.3** - Valores de rugosidade P-V da amostra medida

Como hipótese inicial  $H_0$  para a realização do teste Qui-quadrado com relação à rugosidade do corpo de prova analisado admite-se que a distribuição tanto de  $R_a$  quanto de P-V é normal, enquanto que a hipótese alternativa  $H_A$  afirma exatamente o contrário, ou seja, que a distribuição não é normal. Para a verificação da hipótese  $H_0$  deve ser adotada uma probabilidade de erro (nível de significância), que no caso foi escolhida como  $\alpha = 0,05$ . Isto representa uma probabilidade de 95% de que a distribuição seja normal.

O teste Qui-quadrado foi primeiramente realizado para os valores medidos de  $R_a$ . Como o valor da incerteza de medição do microscópio interferométrico fornecido pelo fabricante é de  $R_a \approx 0,5 \text{ nm}$ , tem-se um valor limite para o menor valor do intervalo de confiança e, com isto, para a determinação da quantidade mínima de medições para a rugosidade. Este calculado, pode-se calcular da mesma forma o intervalo de confiança para os valores de P-V.

Para a aplicação do teste Qui-quadrado, é necessário dividir os valores medidos em uma quantidade de classes  $k$  suficientemente grande (normalmente  $20 \geq k \geq 5$ ), com mesma

largura de classes, se possível [195, 197]. Caso em uma das classes ocorram menos que cinco resultados de medição, a mesma deve ser agrupada a uma classe vizinha, até que este critério seja satisfeito. Naturalmente com o agrupamento de classes também são alterados os valores-limites destas classes. No caso dos valores de  $R_a$  medidos, foram escolhidas primeiramente doze classes com uma largura  $\Delta R_a = 0,2$  nm (figura 9.4), que após a observação da quantidade mínima de valores por classe resultou em sete classes de valores (figura 9.5). Os valores de P-V foram inicialmente divididos em quatorze classes de largura  $\Delta P-V = 2$  nm (figura 9.6), que após a correção resultaram em dez classes com no mínimo cinco valores por classe (figura 9.7). Na figura 9.8 é mostrada graficamente a distribuição de freqüência dos valores  $R_a$  e P-V antes e após a correção da quantidade de classes de valores.

Classe i	Intervalo $\Delta R_a$ [nm]	Freq. Observada Abs. $f_{i,o,a}$	Freq. Observada Rel. $f_{i,o,r}$
1	.... - 2,0	3	0,03
2	2,0 - 2,2	4	0,04
3	2,2 - 2,4	12	0,12
4	2,4 - 2,6	20	0,20
5	2,6 - 2,8	20	0,20
6	2,8 - 3,0	20	0,20
7	3,0 - 3,2	9	0,09
8	3,2 - 3,4	9	0,09
9	3,4 - 3,6	1	0,01
10	3,6 - 3,8	1	0,01
11	3,8 - 4,0	0	0,00
12	4,0 - ....	1	0,01
Soma		100	1,00

**Figura 9.4** - Distribuição dos valores de  $R_a$  em classes de freqüência

Classe i	Intervalo $\Delta R_a$ [nm]	Freq. Observada Abs. $f_{i,o,a}$	Freq. Observada Rel. $f_{i,o,r}$
1	.... - 2,2	7	0,07
2	2,2 - 2,4	12	0,12
3	2,4 - 2,6	20	0,20
4	2,6 - 2,8	20	0,20
5	2,8 - 3,0	20	0,20
6	3,0 - 3,2	9	0,09
7	3,2 - ....	12	0,12
Soma		100	1,00

**Figura 9.5** - Distribuição corrigida dos valores de  $R_a$  em classes de frequência

Classe i	Intervalo $\Delta P-V$ [nm]	Freq. Observada Abs. $f_{i,o,a}$	Freq. Observada Rel. $f_{i,o,r}$
1	.... - 16	1	0,01
2	16 - 18	4	0,04
3	18 - 20	7	0,07
4	20 - 22	13	0,13
5	22 - 24	16	0,16
6	24 - 26	17	0,17
7	26 - 28	11	0,11
8	28 - 30	9	0,09
9	30 - 32	7	0,07
10	32 - 34	5	0,05
11	34 - 36	4	0,04
12	36 - 38	3	0,03
13	38 - 40	2	0,02
14	40 - ....	1	0,01
Soma		100	1,00

**Figura 9.6** - Distribuição dos valores de P-V em classes de frequência

Classe i	Intervalo $\Delta P-V$ [nm]	Freq. Observada Abs. $f_{i,o,a}$	Freq. Observada Rei. $f_{i,o,r}$
1	.... - 18	5	0,05
2	18 - 20	7	0,07
3	20 - 22	13	0,13
4	22 - 24	16	0,16
5	24 - 26	17	0,17
6	26 - 28	11	0,11
7	28 - 30	7	0,07
8	30 - 32	9	0,09
9	32 - 34	5	0,05
10	34 - ....	10	0,10
Soma		100	1,00

Figura 9.7 - Distribuição corrigida dos valores de P-V em classes de frequência

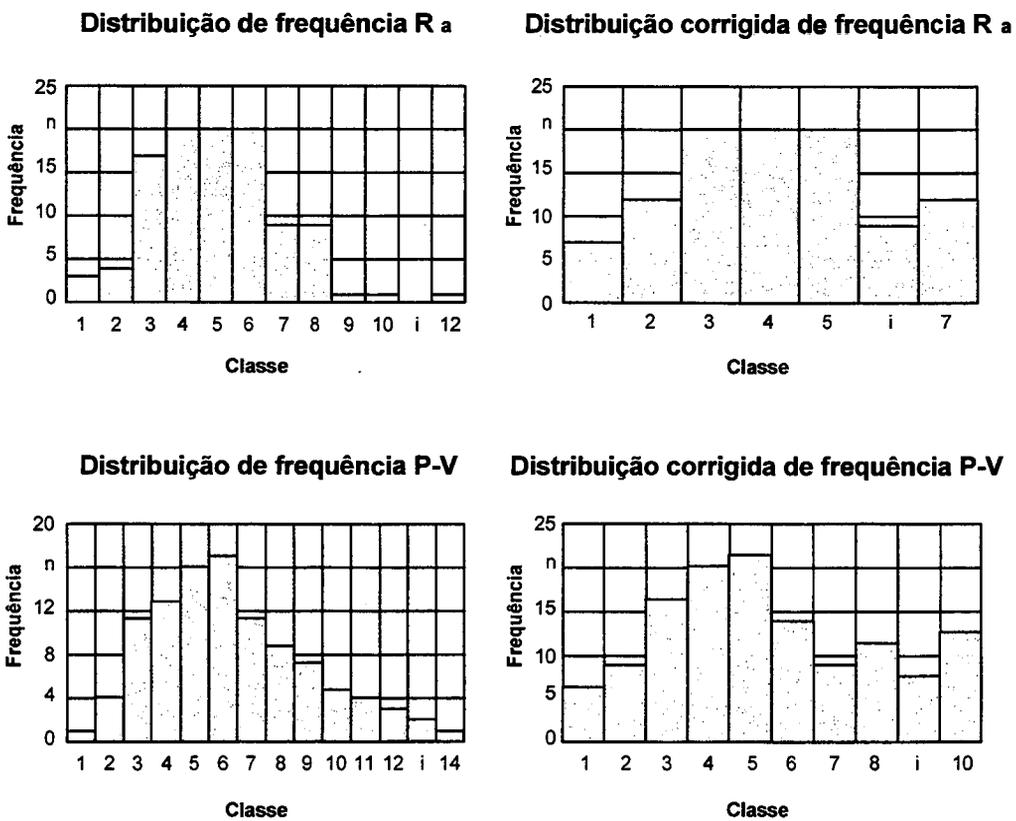


Figura 9.8 - Representação gráfica da distribuição de frequência de  $R_a$  e P-V

Após o cálculo das freqüências de classe observadas  $f_{i,o}$  é possível obter as freqüências esperadas  $f_{i,e}$ , de acordo com a hipótese da distribuição normal. Para poder empregar uma distribuição normal padronizada, deve-se transformar os valores de limite superior das classes  $x_{i,o}$  em valores normalizados  $z_{i,o}$ , conforme a equação 9.3 a seguir. Como, entretanto, os valores da média  $\mu$  e do desvio-padrão  $\sigma$  da função da distribuição normal não são conhecidos, são em lugar destes utilizados os valores de  $\bar{x}$  e  $s$  da amostra medida. Esta aproximação em dois parâmetros da função de distribuição normal é posteriormente levada em conta para a determinação do valor crítico Qui-quadrado.

$$z_{i,o} = \frac{x_{i,o} - \mu}{\sigma}, \quad (9.3)$$

onde  $\mu \approx \bar{x}$  e  $\sigma \approx s$ .

Com os valores normalizados  $z_{i,o}$  pode-se verificar a função de distribuição  $F_N(z_{i,o})$  com auxílio de uma tabela padronizada [195, 196, 197]. Com isto é possível calcular as freqüências esperadas relativas  $f_{i,e,r}$  e absolutas  $f_{i,e,a}$  conforme as equações 9.4 e 9.5.

$$f_{i,e,r} = F_N(z_{i,o}) - F_N(z_{(i-1),o}) \quad (9.4)$$

e

$$f_{i,e,a} = n \cdot f_{i,e,r}. \quad (9.5)$$

Iniciando com o cálculo da classe mais alta, obtém-se como valor  $f_{i,e,r}$  para a primeira classe como a diferença para a soma de todas as demais classes, com uma probabilidade total de 100% (=1). O tamanho de teste Qui-quadrado para cada classe individual  $\chi_i^2$  pode ser calculado com auxílio da seguinte equação:

$$\chi_i^2 = \frac{(f_{i,e,a} - f_{i,o,a})^2}{f_{i,e,a}} \quad (9.6)$$

O tamanho de teste decisivo decorre da soma de todos os valores de classe individuais  $\chi_i^2$  e deve ser comparado com o valor crítico Qui-quadrado  $\chi_{crit}^2$ . De acordo com a equação

9.6 o valor  $\chi_i^2$  de cada classe representa um desvio quadrático relativo do valor de freqüência esperado para cada a classe de freqüências. Quanto mais este valor aproximar-se de zero, melhor é a concordância com a distribuição normal. Decisiva para a comprovação da hipótese inicial é, entretanto, a soma  $\chi_0^2$  de todos os valores de classe. Este valor é calculado segundo a equação a seguir:

$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^k \chi_i^2 \quad (9.7)$$

Nas **figuras 9.9 e 9.10** a seguir é mostrado um resumo dos valores obtidos através do procedimento descrito anteriormente para as rugosidades  $R_a$  e P-V.

i	$X_{i,o}$	$Z_{i,o}$	FN( $Z_{i,o}$ )	$f_{i,e,r}$	$f_{i,e,a}$	$f_{i,o,a}$	$\chi_i^2$
1	2,2	-1,30	0,0968	0,0968	9,68	7	0,74
2	2,4	-0,80	0,2119	0,1151	11,51	12	0,02
3	2,6	-0,30	0,3821	0,1702	17,02	20	0,52
4	2,8	0,19	0,5753	0,1932	19,32	20	0,02
5	3,0	0,69	0,7549	0,1796	17,96	20	0,23
6	3,2	1,19	0,8830	0,1281	12,81	9	1,13
7	....	....	1,0000	0,1170	11,70	12	0,01
Soma				1,0	100	100	2,68

**Figura 9.9** - Tabela de cálculo de  $\chi_0^2$  para a rugosidade  $R_a$

i	$X_{i,o}$	$Z_{i,o}$	$FN(Z_{i,o})$	$f_{i,e,r}$	$f_{i,e,a}$	$f_{i,o,a}$	$\chi_i^2$
1	18	-1,43	0,0764	0,0764	7,64	5	0,91
2	20	-1,07	0,1423	0,0659	6,59	7	0,03
3	22	-0,71	0,2389	0,0966	9,66	13	1,15
4	24	-0,35	0,3632	0,1243	12,43	16	1,03
5	26	0,02	0,5080	0,1448	14,48	17	0,44
6	28	0,38	0,6480	0,1400	14,00	11	0,64
7	30	0,74	0,7704	0,1224	12,24	7	2,24
8	32	1,10	0,8643	0,0939	9,39	9	0,02
9	34	1,46	0,9279	0,0636	6,36	5	0,29
10	....	....	1,0000	0,0721	7,21	10	1,08
Soma				1,0	100	100	7,83

**Figura 9.10** - Tabela de cálculo de  $\chi_0^2$  para a rugosidade P-V

Como valor comparativo é tomado um valor crítico  $\chi_{crit}^2$  correspondente de uma tabela padronizada para o teste Qui-quadrado [195, 196, 197] para um determinado grau de liberdade  $\nu$  e um nível de significância adotado  $\alpha$  (no caso  $\alpha = 0,05$ ). O grau de liberdade  $\nu$  da distribuição  $\chi^2$  é determinado, por sua vez, em função do número de classes  $k$  e do número de parâmetros aproximados  $m$ , segundo a equação:

$$\nu = k - m - 1 \quad (9.8)$$

O número de classes resulta  $k = 7$  para  $R_a$ , no caso analisado, e  $k = 10$ , para P-V, sendo  $m = 2$ , já que  $\mu$  e  $\sigma$  são aproximados para  $\bar{x}$  e  $s$ , respectivamente. Desta forma, para  $R_a$  resulta que o grau de liberdade  $\nu = 4$  e para P-V obtém-se  $\nu = 7$ . Da comparação entre os valores  $\chi_0^2$  calculados e os valores  $\chi_{crit}^2$  tabelados [195], tanto para  $R_a$  quanto para P-V resulta que  $\chi_0^2 < \chi_{crit}^2$ . Assim a hipótese inicial  $H_0$  não pode ser descartada e a distribuição é considerada normal.

Para que o custo e o tempo para a medição da rugosidade mantenha-se em um patamar razoável, deve ser ainda determinada a quantidade mínima de ensaios necessária para a definição dos valores médios de rugosidade. Com um intervalo de confiança  $2a$  para o valor da média e um nível de confiança  $\gamma$  para os valores medidos (probabilidade de ocorrência desejada), determina-se a quantidade de medições  $n$  através da equação seguinte:

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{a^2} \quad (9.9)$$

Para o cálculo de  $n$  o valor de  $\sigma$  pode ser mais uma vez adotado como  $s$ . A grandeza  $t$ , ou coeficiente de Student, é uma função do nível de confiança  $\gamma$  (no caso adotado como 95%) e pode ser obtida de uma tabela padronizada [195].

Considerando que a repetibilidade do microscópio interferométrico é  $R_a \approx 0,5$  nm, adota-se que o intervalo de confiança  $2a$  para o valor da média deve estar nesta ordem de grandeza. Com os dados obtidos, verifica-se que um valor para o intervalo de confiança  $2a$  em torno de 0,5 nm é obtido para uma quantidade de ensaios  $n = 10$  (**figura 9.11**). Como para os valores de rugosidade P-V a quantidade  $n = 10$  também se encontra na ordem de grandeza da repetibilidade do instrumento de medição, pode-se considerar que para a determinação das rugosidades  $R_a$  e P-V na usinagem de ultraprecisão dos materiais duros e frágeis ensaiados, é necessária e suficiente a medição de **10** valores de rugosidade por condição ensaiada.

Tamanho da amostra n	Graus de liberdade	Coefficiente de Student $t_{0,025}$	Intervalo de confiança 2a
2	1	12,7	7,18
4	3	3,18	1,27
6	5	2,57	0,84
8	7	2,37	0,67
10	9	2,26	0,57
20	19	2,09	0,37
30	29	2,04	0,30
40	39	2,02	0,26
50	49	2,01	0,23

**Figura 9.11** - Intervalo de confiança em função do tamanho da amostra

### 9.2.2. Análise estatística das forças

Uma análise estatística abrangente dos resultados da medição de forças na usinagem de ultraprecisão dos cristais infravermelhos ensaiados implica na realização de uma quantidade de ensaios não factível no escopo deste trabalho. Em virtude disto, optou-se pela verificação da dispersão dos resultados de força para condições de usinagem padronizadas para os três materiais analisados neste trabalho (sulfeto de zinco, Cleartran e germânio), através do levantamento de amostras de resultados e sua posterior análise.

As discrepâncias verificadas nos valores das componentes da força de usinagem para uma mesma condição de ensaio podem ser imputadas a fatores de processo, variações nas propriedades dos materiais ensaiados e fatores de incerteza relacionados ao sistema de medição de forças, entre outros. Dentre os fatores de maior importância para a dispersão nos resultados obtidos podem ser citados a não homogeneidade do material de ensaio, as variações na microgeometria do gume da ferramenta ao longo do tempo de usinagem, as variações no fluxo de fluido de corte e as influências da dinâmica do processo de corte, além dos erros introduzidos pelo próprio sistema de medição. Entretanto, devido à complexidade que existe para que seja feita uma análise individual de cada um destes fatores, os mesmos são analisados como um todo, de forma que os

efeitos que cada um dos mesmos têm sobre as dispersões dos resultados de força não podem ser individualmente reconhecidos. A incerteza do resultado que resulta do processo de medição de forças dos cristais infravermelhos ensaiados com o sistema desenvolvido pode todavia ser reconhecida através do procedimento mostrado a seguir.

Ensaio prévios de usinagem de ultraprecisão dos cristais infravermelhos em questão, bem como resultados de pesquisa apresentados por diversos pesquisadores da área, mostram que principalmente as forças passivas tendem a um crescimento acentuado ao longo do tempo de utilização da ferramenta, ou seja, a progressão do desgaste mostra uma influência marcante sobre as componentes de força na usinagem [44, 78, 113, 146, 154, 160, 184]. Devido a isto, tanto para os ensaios destinados à análise estatística quanto para os ensaios destinados à verificação das diversas variáveis de processo sobre o resultado de trabalho foram empregadas ferramentas novas ou com pouco uso, com exceção dos ensaios onde se buscou verificar a influência do desgaste sobre as forças.

Para os três cristais infravermelhos analisados neste trabalho foram realizados dez ensaios sob as mesmas condições de usinagem e medidos os resultados de força de corte e força passiva. Com base nestes resultados foram calculados a média das amostras  $\bar{x}$  e o desvio-padrão  $s$  das mesmas, de acordo com as equações 9.1 e 9.2 apresentadas anteriormente. Em virtude do tamanho da amostra  $n$  ser pequeno, não é possível verificar através de testes (como o Qui-quadrado, por exemplo) se a distribuição dos valores de força medidos é normal. Como, entretanto, para ensaios desta natureza normalmente os resultados apresentam uma distribuição normal [195, 197, 199], o mesmo será assumido como verdadeiro. Assim, através do emprego da equação 9.10 a seguir, é possível uma aproximação da dispersão de medição (DM) dos resultados de força, com auxílio de valores tabelados para o coeficiente de Student  $t$  [195, 199]. No caso de uma amostra com tamanho  $n = 10$  e considerando  $\gamma = 95\%$ , obtém-se para o coeficiente de Student um valor  $t = 2,26$ .

$$DM = \pm t \cdot s \quad (9.10)$$

Na **figura 9.12** é mostrado um exemplo dos resultados obtidos através deste procedimento, sendo os mesmos adotados para a caracterização aproximada da

dispersão nos resultados de força na usinagem de ultraprecisão dos cristais infravermelhos sulfeto de zinco, Cleartran e germânio.

Material	$\bar{X}$		S		DM	
	F <sub>c</sub> (mN)	F <sub>p</sub> (mN)	F <sub>c</sub> (mN)	F <sub>p</sub> (mN)	F <sub>c</sub> (mN)	F <sub>p</sub> (mN)
ZnS	100,5	66	5,5	4,6	±12,4	±10,4
Cleartran	67,8	54	4,9	6,2	±11,1	±13,9
Ge	133	223	2,6	12,3	±5,8	±27,8
Condições de Usinagem	f = 4 μm a <sub>p</sub> = 10 μm v <sub>c</sub> = 145 m/min (ZnS e Cleartran) v <sub>c</sub> = 85 m/min (Ge) Fluido de corte - Clairsol 310				r <sub>ε</sub> = 0,5 mm γ = - 25° α = 10°	

**Figura 9.12** - Análise estatística das forças na usinagem

Através da análise estatística dos resultados de força, verifica-se que ocorrem maiores dispersões nos resultados para as forças passivas, mantendo-se as mesmas, entretanto, dentro dos limites de ± 25 % para todos os ensaios. As forças de corte, por sua vez, mostram uma dispersão de resultados que se mantém abaixo de valores de ± 15 %. É interessante observar que as maiores dispersões nos resultados tanto de força passiva quanto de corte ocorrem na usinagem de Cleartran, material no qual é verificada uma elevada dinâmica nos sinais de força durante a usinagem de ultraprecisão, e no qual ocorrem as maiores dificuldades para a obtenção de superfícies com baixas rugosidades e livres de danos superficiais.