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

AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO POLIMETILMETACRILATO
(PMMA) NO TORNEAMENTO COM FERRAMENTA DE DIAMANTE

RENÊ MENDES GRANADO

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

ORIENTADOR: Prof. Assoc. Renato Goulart Jasinevicius

São Carlos
2006

DEDICATÓRIA

À minha esposa Maria José, meus filhos, Renê e Camila pelo amor, compreensão e incentivo à realização deste ideal.

Aos meus pais, Jurandyr, *in memoriam* e Aurora, pelos ensinamentos e o caminho correto da vida.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pelo dom da vida e a proteção de todos os dias;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renato Goulart Jasinevicius, pela grande oportunidade, ensinamentos, orientação e amizade;

Aos Profs. Drs. Jaime Gilberto Duduch e Carlos Alberto Fortulan, pela amizade e ensinamentos adquiridos;

A Profa. Dra. Luciana Montanari, pelo apoio e sugestões para a conclusão deste trabalho;

Ao amigo, Prof. Dr. José Abrantes, por incentivar meu retorno aos estudos;

Aos Engos. Ermelindo Berton Filho e Maria Ceres Siqueira Câmara, da empresa Drake Eletrônica e Comércio Ltda, que me possibilitou cursar o mestrado e desenvolver este trabalho;

Ao Engº. Carlos Alberto da Silva Bento (IQSC) pelas imagens conseguidas através do MEV;

Aos técnicos do Departamento de Materiais (EESC-USP), Silvano e Pedro, pela grande ajuda na preparação e fotografias das amostras;

Aos técnicos da Oficina de Óptica, Marcos e Ailton (IFSC-USP), pela realização dos trabalhos de espectrofotometria;

Aos amigos do Laboratório de Ultraprecisão, João Paulo, Paulo Berto, Fabiano, Murilo, e em especial ao Robson pela ajuda e amizade ao longo destes anos;

A Ana Paula e demais funcionários da P.G. pela atenção e paciência;

A todos da Biblioteca Central pela ajuda com o material de pesquisa;

A todos que me ajudaram na confecção das amostras, dispositivo e montagem final do trabalho;

A todos os Professores do Departamento de Engenharia Mecânica pelo conhecimento adquirido durante esses anos.

RESUMO

GRANADO, R.M. (2006). Avaliação da integridade superficial do polimetilmetacrilato (PMMA) no torneamento com ferramenta de diamante. 114 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

O torneamento com ferramenta de diamante é um processo de fabricação usado para a produção de componentes ópticos com alta precisão de forma e qualidade óptica final. O crescente uso de materiais poliméricos na indústria, particularmente em equipamentos de precisão eletrônica e óptica tem exigido o estudo e entendimento de suas características e propriedades específicas. Esse trabalho avalia a integridade superficial do polimetilmetacrilato torneado com ferramenta de diamante, com relação à transmitância. Os parâmetros de usinagem objetivaram a obtenção de superfície gerada no modo dúctil. As rotações usadas foram 550 e 1000 rpm, a faixa do avanço variou de 5 a 20 $\mu\text{m}/\text{rev}$ e a profundidade de usinagem de 4 e 10 μm . Duas ferramentas com geometrias diferentes foram usadas nos testes, com ângulos de saída de -5° e $+5^\circ$, com raios de ponta de 1,143mm e 1,524 mm. A superfície final e morfologia dos cavacos foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura e a transmitância medida por espectrofotometria. A integridade superficial foi claramente influenciada pelo ângulo de saída da ferramenta como observado na literatura instabilidade do fluxo viscoelástico. A menor rugosidade obtida foi de 33,2 nm para a condição de corte de 10 $\mu\text{m}/\text{ver}$ e 10 μm de profundidade de usinagem. Quando os resultados foram comparados as lentes injetadas, observou-se que o valor da transmitância são muito similares.

Palavras Chave: Torneamento com ferramenta de diamante, Polimetilmetacrilato, Transmitância.

ABSTRACT

GRANADO, R.M. (2006). Evaluation of the Surface Integrity of Polymethymethacrylate (PMMA) in Diamond Turning Tool. 114 p. Dissertation (M. Sc.) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

Single point diamond turning is a manufacturing process used to fabricate optical and precision components with high form accuracy and optical quality surface finish. The increase in the use of polymer materials in industry, particularly in electronic and optic precision devices, has demanded the study and understanding of its specific characteristics and properties. This work is addressed to the evaluation of the surface integrity of diamond turned polymethylmethacrilate regarding the trade off surface integrity versus transmittance. The cutting conditions were selected in order to work within the ductile mode material removal range. The spindle speed were 550 and 1000 rpm, feed rate ranging from 5 up to 20 $\mu\text{m}/\text{rev}$ and the depth of cut ranging from 4 up to 10 μm . Two different tool geometries were used in the tests, a -5° and $+5^\circ$ rake angles with round nose radius tools of 1,143 mm and 1,524 mm. Surface finish and morphology of the chips was evaluated by scanning electron microscopy and transmittance measured by spectrophotometry technique. The surface integrity was clearly influenced by the cutting tool rake angle as observed in literature. Despite the formation of ductile chips the surface finished presented microcracks likely due the instability of the viscoelastic flow. The lower surface roughness obtained was 33,2 nm Ra for the cutting condition of 10 $\mu\text{m}/\text{rev}$ and 10 μm depth of cut. When the results were compared with injected lenses, it was observed that the value of transmittance was very similar.

Keywords: Single-point diamond turning, Polymethymethacrylate, Transmittance.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Microlentes torneadas com ferramenta de diamante com ponta única - GEBHARDT e STEINKOPF (2003)	38
FIGURA 2.2 - Perfil de uma ferramenta de boa qualidade - COX e V	43
FIGURA 2.3 - Linhas de lapidação de uma ferramenta de boa qualidade - COX e V	43
FIGURA 2.4 - Perfil de uma ferramenta de qualidade inferior - COX e V	44
FIGURA 2.5 - Linhas de lapidação de uma ferramenta de qualidade inferior - COX e V	44
FIGURA 2.6 - Geometria de uma ferramenta de diamante monocristalino JASINEVICIUS (1994)	45
FIGURA 2.7 - Ferramenta de diamante monocristalino - GRABCHENKO (2001)	46
FIGURA 2.8 - Características das condições de corte - KOBAYASHI e SAITO (1962)	47
FIGURA 2.9 - Característica do corte ortogonal de um polímero - KOBAYASHI e SAITO (1962)	48
FIGURA 2.10 - Diagrama tensão-deformação para polímeros - SAITO	53
FIGURA 2.11 - Mecanismo de formação do cavaco com alta deformação plástica XIAO e ZHANG (2002)	55
FIGURA 2.12 - Mecanismo de formação do cavaco com baixa deformação plástica XIAO e ZHANG (2002)	55
FIGURA 2.13 - Processo de fratura em polímeros - MEYERS e CHAWLA (1999)	57
FIGURA 2.14 - Mecanismo de formação do cavaco para um material polimérico - CARR e FEGER (1993)	62
FIGURA 2.15 - Curvas isotermas da usinagem de um polímero - GRABCHENK (2000)	67
FIGURA 3.1 - Estrutura molecular do polimetilmetacrilato - NANO (1991)	71
FIGURA 3.2 - Gerador de superfícies anesféricas RANK PNEUMO ASG 2500 e Controle Numérico ALLEN – BRADLEY CNC 8200	71

FIGURA	3.3 - Dispositivo de alumínio para montagem dos discos de PMMA	72
FIGURA	3.4 - Montagem do dispositivo de alumínio na placa de vácuo	73
FIGURA	3.5 - Perfilômetro FORM TALYSURF 120L	76
FIGURA	3.6 - Perfilômetro FORM TALYSURF CCI 3000	76
FIGURA	4.1 - a) imagen feita no Talysurf CCI 3000, através de perfilometria óptica, da superfície polida com diamante. b) riscos deixados pelo processo atingem profundidades de até 50 nanômetros	81
FIGURA	4.2 - a) Variação da rugosidade Ra em função da taxa de avanço, medida no Talysurf 120L, rotação = 1000 rpm, ap = 10 μm . Ferramenta CO 45NG, com $\gamma = -5^\circ$. b) Variação da rugosidade Rt em função da taxa de avanço, medida no Talysurf 120L, rotação = 1000 rpm, ap = 10 μm . Ferramenta CO 45NG com $\gamma = -5^\circ$	82
FIGURA	4.3 - a) Perfil linear da rugosidade da superfície mostrando picos agudos ao longo do comprimento de avaliação. b) Espectro da superfície usinada pela ferramenta CO 45NG com $\gamma = -5^\circ$, f = 15 $\mu\text{m}/\text{rev}$, ap = 10 μm , rotação = 1000 rpm. Ambos obtidos por meio do Talysurf CCI 3000	83
FIGURA	4.4 - Imagens feitas através de microscopia óptica das amostras torneadas; a) f = 10 $\mu\text{m}/\text{rev}$, b) f = 15 $\mu\text{m}/\text{rev}$, c) f = 20 $\mu\text{m}/\text{rev}$, rotação = 1000 rpm, usinadas com ferramenta CO 45NG com $\gamma = -5^\circ$. Ampliação 200x	84
FIGURA	4.5 - Fotomicrografia de cavacos de PMMA feita através de Microscopia Eletrônica de Varredura. f = 10 $\mu\text{m}/\text{rev}$, ap = 10 μm , rotação = 1000 rpm. Ferramenta CO 45NG com $\gamma = -5^\circ$. Ampliação 100x	85
FIGURA	4.6 - Fotomicrografia feita através de MEV da superfície de PMMA torneada com ferramenta CO 45NG com $\gamma = -5^\circ$, f = 10 $\mu\text{m}/\text{rev}$ e ap = 10 μm , rotação = 1000 rpm. a) Ampliação 1000x. b) Ampliação 3000x	86
FIGURA	4.7 - a) Variação da rugosidade Ra, em função da taxa de avanço, entre a média das amostras, medida no Talysurf 120L, rotação = 550 rpm, ap = 10 μm . Ferramenta 60 COJG com $\gamma = 5^\circ$	87
FIGURA	4.7 - b) Variação da rugosidade Rt, em função da taxa de avanço, entre a média das amostras, medida no Talysurf 120L, rotação = 550 rpm, ap = 10 μm . Ferramenta 60 COJG com $\gamma = 5^\circ$	88

FIGURA 4.8	- Variação da rugosidade Ra, em função da taxa de avanço, medida no Taylsurf 120L, rotação = 550 rpm, ap = 10 µm. Ferramenta 60 COJG com $\gamma = 5^\circ$ e Ferramenta CO 45NG com $\gamma = -5^\circ$	89
FIGURA 4.9	- Micrografia feita através de MEV da amostra 2D, usinada com f = 10 µm/rev; ap = 10 µm ; rotação = 550 rpm. Ferramenta 60 COJG com $\gamma = 5^\circ$ Ampliação de 5.000x	90
FIGURA 4.10	- Análise do cavaco feita através de MEV usinado com f = 10 µm e ap = 10 µm; rotação = 1000 rpm, $\gamma = 5^\circ$; a) Cavaco em forma de fita. Ampliação de 100x; b) Estrutura lamelar na parte superior do cavaco. Ampliação de 5.000x; c) Parte inferior do cavaco que faz contato com a superfície de saída da ferramenta. Ampliação de 1.000x; d) Lateral do cavaco. Ampliação de 3.000x	93
FIGURA 4.11	- Relação entre velocidade de avanço e profundidade de usinagem. Fonte: Jasinevicius et al (2004)	94
FIGURA 4.12	- Influência da profundidade de corte na rugosidade superficial Ra de amostras usinadas com ap = 10 µm e 4 µm, rotação = 550 rpm com os respectivos desvios padrões. medida no Taylsurf 120L. Ferramenta 60 COJG com $\gamma = 5^\circ$	95
FIGURA 4.13	- Micrografia feita através de MEV comparativa entre as amostras usinadas com: a) ap = 10 µm e b) com ap = 4 µm, f = 5 µm/rev, rotação = 550 rpm. Ferramenta CO 60J com $\gamma = 5^\circ$. Ampliação 1000x	96
FIGURA 4.14	- Curvas de transmitância obtidas da média das amostras com relação as condições de corte. a) f = 5; b) = 10; c) = 15; d) = 20 µm/rev com ap = 10µm; e) f = 5 µm/ver com ap = 4 µm. Ferramenta CO 60J com $\gamma = 5^\circ$	97
FIGURA 4.15	- Irregularidades na parte interna da amostra de PMMA polida. Ampliação de 200x	99

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Propriedades de vários materiais ópticos	32
TABELA 2 - Campos de desenvolvimento da tecnologia da usinagem de ultraprecisão	34
TABELA 3 - Desenvolvimento da precisão em usinagem durante o século XX	35
TABELA 4 - Materiais frágeis usinados com ferramenta com ponta única de diamante	37
TABELA 5 - Fatores que afetam o corte em polímeros	51
TABELA 6 - Tipos de cavacos	52
TABELA 7 - Valores de temperatura em função da variação da velocidade de corte	68
TABELA 8 - Propriedades do PMMA	70
TABELA 9 - Parâmetros usados no tratamento de ultraprecisão do PMMA	74
TABELA 10 - Valores de rugosidade e transmitância das amostras 1A e 2B	98

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	Acrilonitrila-butadieno-estireno
ADC	Carbonato diglicol de alila (CR 39)
Abs.	Absorbância
BK7	Vidro óptico
cos	coseno
HD	Hard Disc (Disco rígido)
HDPE	High Density Polyethylene (Polietileno de alta densidade)
HRDT	High Refraction Diamond Turning (Torneamento com diamante com alta refração)
H.S.S.	High Speed Steel (Aço rápido)
IR	Infrared (Infravermelho)
LDPE	Low Density Polyethylene (Polietileno de baixa densidade)
NAS	Metilmetacrilato estireno
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PEI	Poli(éter-sulfona)
PES	[Poli(éter-amida)]
PMMA	Polimetilmetacrilato
PS	Poliestireno
SAN	Estireno acrinolite
sen	seno
Tg	Temperatura de transição vítrea
Tm	Temperatura de fusão cristalina
TPX	Metilpentene
UV	Ultravioleta

LISTA DE SIGLAS

ASG	Gerador de Superfícies Anesféricas
ASTM	<i>American Standards for Testing Materials</i>
CNC	Controle Numérico por Computador
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ICI	Imperial Chemical Industries

LISTA DE SÍMBOLOS

nm	Nanômetro (10^{-9}m)
m	Metro
mm	Milímetro (10^{-3}m)
μm	Micrometro (10^{-6}m)
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celcius
Å	Angstrom (10^{-10} m)
Cu	Cobre
Be	Berílio
GaAs	Arseniato de Gálio
LAP	Fosfato de L-arginina monohidratado
KDP	Potássio di-hidrogênio fosfato
Rq	Rugosidade média quadrática (μm)
Cm	centímetro (10^{-2}m)
s	segundo
Dn	Variação do índice de refração
Dt	Variação de temperatura
Nd	Índice de refração correspondente a aberração na cor amarela
Nf	Índice de refração correspondente a aberração na cor azul
Nc	Índice de refração correspondente a aberração na cor vermelha
H ₂ O	Água
O	Oxigênio
Ra	Rugosidade média (nm)
Rz	Rugosidade média dos cinco maiores picos e vales no comprimento medido (μm)
γ	Ângulo de saída da ferramenta (graus)
α	Ângulo de folga da ferramenta (graus)
rp	Raio de ponta da ferramenta (graus)
R'	Força de resistência ao corte
Ffn	Força normal de atrito na superfície de saída da ferramenta
Ff	Força de atrito na superfície de saída da ferramenta
R	Força de corte
τ_s	Tensão de cisalhamento no plano de cisalhamento
τ_c	Tensão de cisalhamento na superfície de saída da ferramenta
μ	Coefficiente de atrito
θ	Ângulo de cisalhamento (graus)

τ	Tensão
δ	Deformação
a_p	Profundidade de usinagem (mm)
d_c	Espessura do cavaco
γ_c	Deformação do cisalhamento
F_t	Componente da força de corte na direção perpendicular a superfície gerada
F_c	Componente da força de corte na direção do movimento da ferramenta
β	Ângulo de atrito (graus)
π	Constante com valor igual a 3,1416
σ_f	Tensão crítica para o início da fratura
E	Módulo de elasticidade
γ_s	Energia superficial
c	Comprimento da trinca
K	kelvin
mm/rev.	milímetros por revolução
rpm	Rotações por minuto
m/min.	metros por minuto
cal	calorias (10^{-3} kcal)
g	gramas (10^{-3} kg)
CH_3	Metil
C	Carbono
H	Hidrogênio
s	segundo
λ_t	Razão de transferência de calor no aço
λ_s	Condutividade térmica do aço
λ_p	Condutividade térmica do polímero
v_c	Velocidade de corte (m/min)
g/cm^3	gramas por centímetro cúbico
Kw	quilowatt
mbar	milibar (10^{-3} bar)
y	Pontos discretos ao longo do perfil de uma superfície
n	Número de pontos considerados
P	Valor do pico
V	Valor do vale
R_t	Máxima altura pico a vale individual (nm)

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução	15
1.1 Introdução	19
1.2 Objetivos	
1.3 Estrutura de Dissertação	
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	21
2.1 Polímeros	21
2.1.1 Classificação dos Polímeros	22
2.1.2 Comportamento Térmico dos Polímeros	23
2.1.3 Morfologia	25
2.1.4 Polimetilmetacrilato (PMMA)	26
2.2 Outros Polímeros com Propriedades Ópticas	27
2.2.1 Propriedades Ópticas	30
2.3 Torneamento com Ferramenta de Diamante Monocristalino	33
2.3.1 Ferramenta de Diamante Monocristalino	40
2.4 Mecanismo de Remoção em Materiais Poliméricos	46
2.4.1 Introdução	
2.4.2 Formação do Cavaco	51
2.4.3 Transição Frágil - Dúctil	56
2.5 Influência dos Parâmetros de Corte	59
2.6 Influência da Geometria da Ferramenta	61
2.7 Influência da Temperatura no Corte	64
Capítulo 3 – Materiais e Métodos	70
3.1 Características do Material	70
3.2 Procedimentos Experimentais	71
3.3 Análise das Superfícies	75
Capítulo 4 – Resultados e Discussão	79
4.1 Considerações Gerais	79
4.2 Influência da Taxa de Avanço (f) no Acabamento Superficial	81
4.2.1 Mecanismos de Remoção de Material e Geração da Superfície	85
4.3 Influência da Profundidade de usinagem (ap) no Acabamento Superficial	95
4.4 Análise das Superfícies Geradas em Relação a Qualidade Óptica	97
Capítulo 5 – Conclusões	102
Capítulo 6 – Trabalhos Futuros	104
Referências	105

Capítulo 1

1.1 Introdução

Para acompanhar as exigências de produtos de alta qualidade e precisão, por parte dos diversos segmentos tecnológicos, a indústria moderna tem desenvolvido métodos e/ou processos onde superfícies de altíssima qualidade são produzidas por técnicas denominadas de fabricação de ultraprecisão (DUDUCH et al, 2004).

Um processo particular que tem revolucionado a técnica de ultraprecisão é o torneamento com ferramenta de diamante, onde rugosidades superficiais na faixa de 1nm podem ser obtidas (CHOI e KIM, 1999).

O processo de torneamento com diamante teve origem na indústria relojoeira quando componentes para mostradores de relógios eram torneados com alta precisão em 1930 (KRAUSKOPF, 1984).

O torneamento com diamante para uso industrial começou após a 2ª Grande Guerra, com propósito de encontrar-se alternativas para a retificação na fabricação de componentes ópticos anesféricos. O trabalho inicial em torneamento com ferramenta de diamante foi realizado em componentes mecânicos de alta precisão em 1960 devido ao acelerado avanço da ciência e tecnologia nos campos da energia, informática, eletrônica e aplicações defensivas (IKAWA et al, 1991).

A óptica começou a ter maior foco em meados de 1970. Trabalho pioneiro foi conduzido por Bryan no Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), no desenvolvimento de complexos componentes ópticos. No final de 1970 e início de 1980, pesquisadores do LLNL começaram a construir um torno de ultraprecisão, com a finalidade de serem usinadas peças de grandes dimensões com alta precisão. Donaldson e Patterson construíram o "Large Optics Diamond Turning Machine" em 1983. Trata-se de um torno de eixo vertical capaz de usinar peças de até 1,6 m de diâmetro e peso acima de 13.500 newtons. A precisão foi mantida através da estabilidade dimensional, e materiais com baixo coeficiente de expansão térmica foram usados em conjunto com controladores de temperatura e sistemas de medição (HENRY, 2002).

À partir da década de 70, a técnica de usinagem de ultraprecisão foi sucessivamente adotada com êxito na fabricação de discos de memória de computador e também componentes fotoreceptores usados em máquinas copiadoras e impressoras. Tais aplicações necessitam extrema precisão geométrica e podem ser obtidas com superfícies superpolidas. Essas superfícies são fabricadas mais eficientemente pelo torneamento com ferramenta de diamante, do que pelos processos convencionais tais como: retificação, lapidação e polimento (CHAPMAN, 200-?).

Chapman [200-?] considera que o processo é limitado a materiais que podem ser usinados com ferramenta de diamante. Esses materiais incluem a maioria dos elementos com estrutura cúbica de face centrada, fundamentalmente ligas não ferrosas como: alumínio, cobre, níquel, ouro, latão e bronze. Além destes a usinagem com diamante é bem apropriada para cortar materiais cristalinos como germânio, silício, sulfeto de zinco e também polímeros como polimetilmetacrilato, poliestireno e policarbonato.

Recentemente materiais poliméricos transparentes estão sendo usados largamente

na fabricação de componentes ópticos. Para que o uso destes materiais seja eficiente, qualidades como pureza óptica, transmissão e índice de refração devem ser cuidadosamente monitorados pelos fabricantes (BAUER, MÜLLER e PETZOLD, 2000).

O torneamento de materiais ópticos usando ferramenta de diamante têm sido usado para a produção de superfícies anesféricas e difractivas na região do espectro de IR. Comprimentos de onda no espectro de IR (~ 700 nm) são maiores do que as ondas da região visível (400 a 700 nm), o que concede a condição para que as especificações da rugosidade superficial obtida, não sejam tão rigorosa, como a exigida para os componentes no espectro visível (RIEDL, 2004).

Nenhum material isoladamente resolve todos os problemas ópticos, entretanto, ambos, vidro e polímero oferecem vantagens quando aplicados em vários problemas de engenharia. A comparação entre os dois apresentam desvantagens na substituição do polímero pelo vidro em algumas aplicações e relevantes vantagens em outras tais como: propriedades ópticas, volume e quantidade, níveis de precisão e aspectos comerciais (OPTICAL COATING LABORATORY, INC., 2002).

Uma significativa parcela de indústrias estão incorporando o plástico óptico em seus produtos, com objetivo de reduzir custos, condições de empregar geometrias complexas e uniformização dos componentes. A integração entre desenho, ferramental e fabricação é crítica para garantir bons resultados destes produtos (OPTICAL COATING LABORATORY, INC., 2002).

A usinagem de materiais poliméricos tem aumentado significativamente e o uso destes materiais está presente em muitos segmentos tais como equipamentos de precisão óptica e eletrônica. Devido a necessidade de alta precisão dimensional e excelente qualidade superficial, componentes para estas finalidades são produzidos por processos finais

de usinagem, posteriormente aos convencionais de moldagem e conformação. Em muitos casos é economicamente viável fabricar componentes plásticos usando somente o processo de usinagem, devido a complexidade geométrica e/ou quantidade a ser produzida (KOBAYASHI e HIRAKAWA, 1984).

A evolução dos sistemas utilizando polímeros ópticos, e sua aceitação em muitas indústrias e campos continuam avançando em aplicações tais como: diagnósticos médicos (laparoscópios, artroscópios, citoscópios, analisadores de sangue, etc.), sistemas visuais e impressão, sistemas computacionais (câmaras de vídeo, display de cristal líquido, leitores de código de barras, etc.) (OPTICAL COATING LABORATORY, INC., 2002).

Como exemplo podemos citar as pesquisas realizadas por Li et al (1998), envolvendo a fabricação de microlentes acústicas, em PMMA, com cavidades com diâmetros de $0,93 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ e espessura de $111 \pm 4 \text{ }\mu\text{m}$, usando técnicas de microusinagem especialmente o torneamento com diamante, a fim de aumentar a sensibilidade e resolução dos transdutores ultrasônicos de alta frequência, para medição da pressão arterial no sangue.

Para Carr e Feger (1993), os processos tradicionalmente usados para a produção de componentes poliméricos não oferecem precisão requerida para as novas aplicações.

O uso da usinagem de ultraprecisão na fabricação de componentes a partir de materiais poliméricos têm sido objeto de muitas pesquisas, a fim de obter-se condições de corte e geometrias da ferramenta ideais para cada tipo de materiais, visto que as características reológicas de cada polímero irão influir no mecanismo de formação do cavaco e conseqüentemente acabamento final exigido (SAITO, 1981).

Tolley (2005), apresentou recentemente resultados de pesquisas desenvolvidas pela empresa Syntec Technologies, Inc., na usinagem de PEI [poli(éter-sulfona)] e PES

[poli(éter-amida)], dois termoplásticos difíceis de usinar por ferramenta de diamante, devido a sua dureza, mas que apresentam alta resistência térmica (acima de 200°C), alto índice de refração (cerca de 1,68 para o PEI), e alta transmitância (1200 a 1600nm) próxima do infra vermelho. Com esta técnica denominada de HRDP (High Refraction Diamond Turning), ainda em processo de patente, foram obtidas rugosidades de 60Å (Rq), em comparação com 390Å (Rq) usinadas com ferramenta de diamante.

O polimetilmetacrilato (PMMA) é usado em dois terços de todos os componentes ópticos existentes, devido a sua alta estabilidade óptica, fácil usinabilidade, dureza e resistência a umidade (BAUER et al, 2000).

Este polímero apresenta a mesma transparência que os mais finos vidros ópticos. Sua transmitância de luz é de 92 por cento e índice de refração de 1,49, suficientemente necessários para a utilização em lentes e outras aplicações ópticas.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é estudar a influência das condições de usinagem e da geometria da ferramenta sobre o mecanismo de remoção do material e o desempenho da superfície. Para isso, o enfoque será dado tanto para a análise da integridade da superfície gerada através da remoção de material quanto para medidas de transmitância.

Para este fim alguns objetivos foram pré-definidos:

- Discutir e analisar os mecanismos evoluídos e a remoção do material.
- Analisar a influência da velocidade de avanço (f) e da profundidade de usinagem (ap) e o acabamento superficial.

1.3 Estrutura da Dissertação

O trabalho está organizado em 6 capítulos, a saber:

Capítulo 1 - Nesse capítulo é apresentada uma introdução da pesquisa referente a usinagem de ultraprecisão, no tocante a sua evolução.

Capítulo 2 - Apresenta uma sinopse a respeito dos experimentos sobre usinagem de ultraprecisão, ferramentas de diamante monocristalino e condições de usinagem e materiais empregados com ênfase à aplicação de materiais poliméricos.

Capítulo 3 - Materiais, métodos e procedimentos utilizados nos experimentos foram realizados em 3 etapas a saber: usinagem do material em torno de ultraprecisão com ferramenta de diamante, avaliação dos valores da transmitância; avaliação da integridade superficial, através da perfilometria óptica mecânica, análise da superfície final e morfologia dos cavacos.

A avaliação do efeito das condições de usinagem e geometria da ferramenta, sobre o estado da superfície é apresentado neste capítulo. Os mecanismos envolvidos na remoção do material serão discutidos à partir de observações feitas através do MEV. A superfície final obtida em relação a transmitância é analisada.

Capítulo 4 - Apresenta e discute os resultados obtidos nos experimentos.

Capítulo 5 - Apresenta as conclusões.

Capítulo 6 - Sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Polímeros

A palavra polímero originou-se do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição). Deste modo, polímero é uma macromolécula formada por dezenas de milhares de meros unidos através de ligação covalente. A matéria-prima para produção de um polímero é chamada monômero, que é uma molécula com uma grande unidade de repetição (mero). Em função da estrutura química, do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, os polímeros podem ser classificados em três grandes classes: plásticos, borrachas e fibras (CANEVAROLO, 2002).

As palavras plástico e polímero são usualmente tomadas como sinônimos, embora exista uma distinção entre o material puro (polímero) e o formulado para uso. O polímero é o material resultante do processo de polimerização e são raramente utilizados em sua forma pura. Quando aditivos são utilizados é que o termo plástico é usado (CRAWFORD apud BORRELLY, 2002).

Meyers e Chawla (1999) consideram que do ponto de vista estrutural, os polímeros

são muito mais complexos que metais e cerâmicas. Polímeros têm baixa resistência e possuem limites de temperatura mais baixos que os metais. Devido a sua predominante ligação covalente, os polímeros são geralmente maus condutores de calor e eletricidade, embora sejam mais resistentes a solventes que os metais.

Canevarolo (2002) considera que muitas das propriedades físicas dos polímeros são dependentes do comprimento da molécula, isto é, dependente de sua massa molecular, que envolve uma larga faixa de valores, podendo provocar grande variação em suas propriedades.

2.1.1 Classificação dos Polímeros

De acordo com Meyers e Chawla (1999), os polímeros são divididos em dois grandes grupos em relação ao seu comportamento térmico em: termofixos e termoplásticos.

Termofixos

Estes polímeros tornam-se sólidos após passarem de um estado líquido por aquecimento, por isso a denominação termofixo. O processo de solidificação chama-se cura. Durante a cura todas as pequenas moléculas são quimicamente unidas para formar uma grande cadeia molecular. A cura consiste da formação do cruzamento de moléculas adjacentes resultando de uma cadeia complexa interligada. Estes cruzamentos ligados evitam o deslocamento de cadeias individuais prevenindo deste modo o fluxo plástico com o aquecimento. A troca do estado líquido para o estado sólido é irreversível, além disso,

o aquecimento resulta somente em um desarranjo químico, não havendo fusão. Existem oito grandes classes de materiais termofixos que são: alquídios, alílicos, aminos, epóxis, fenólicos, poliésteres, silicones e uretanos (SAECHTLING, 1983).

Termoplásticos

Os termoplásticos tornam-se maleáveis quando são expostos ao calor e endurecem quando são resfriados, indiferente de como o processo é repetido. Pelo alternamento do aquecimento e resfriamento, eles podem ser processados várias vezes. No estado viscoso eles são como borracha líquida e no estado sólido são vítreos ou parcialmente cristalinos. Nos termoplásticos os átomos ou moléculas são ligados ponta a ponta em uma série de longas cadeias, cada uma existindo independente da outra. Existem limitações práticas para a quantidade de ciclos de aquecimento e resfriamento, no qual o termoplástico pode ser submetido. Um número excessivo de ciclos pode afetar a aparência e propriedades do material. Existem 11 classes de materiais termoplásticos que são: ABS, acetatos, acrílicos, celuloses, fluocarbonos, poliamidas, policarbonatos, polietilenos, polipropilenos, estirenos e vinis (SAECHTING, 1983).

2.1.2 Comportamento Térmico dos Polímeros

As modificações observadas nos materiais quando sujeitos a modificações de temperatura são de grande importância e incluem as temperaturas de transição vítrea (T_g), e de fusão cristalina (T_m).

Temperatura de transição vítrea (T_g)

Segundo Mano (1991), a transição vítrea está associada à região amorfa dos polímeros e representa a temperatura em que a mobilidade das cadeias moleculares, devido a rotação de grupos laterais em torno de ligações primárias, se torna restrita pela coesão intra-molecular. Abaixo da temperatura de transição vítrea, T_g desaparece a mobilidade das cadeias macromoleculares, e o material se torna mais rígido e quebradiço (como vidro, por isso “g”, do inglês “glass”). Nos polímeros de uso geral, T_g , não ultrapassa 110°C.

Temperatura de fusão cristalina (T_m)

A temperatura de fusão cristalina (“m” do inglês “melt”) é aquela em que as regiões ordenadas dos polímeros, isto é, os cristalitos e esferulitos se desagregam e fundem-se envolvendo mudança de estado e está associada a regiões cristalinas. Nos polímeros de alta cristalinidade a temperatura de fusão é relativamente alta, quando comparada à temperatura de fusão dos polímeros relativamente amorfos. Nos termoplásticos a temperatura máxima de fusão é inferior a 300°C sendo que os termofixos não apresentam fusão, pois sofrem carbonização por aquecimento (MANO, 1999).

2.1.3 Morfologia

Polímero amorfo

Quando a estrutura é amorfa, as cadeias moleculares são dispostas aleatoriamente, sem qualquer ordem aparente. Com a redução da temperatura de fusão os polímeros amorfos começam a ter uma mobilidade parcial em toda a massa polimérica formando o estado borrachoso. Quando a temperatura é reduzida abaixo da T_g , o polímero amorfo torna-se material vítreo. Polímeros amorfos possuem ampla faixa de amolecimento (não apresenta temperatura de fusão cristalina) têm moderada resistência ao aquecimento, boa resistência ao impacto e baixa contração (CANEVAROLO, 2002).

Exemplos de polímeros amorfos são: polimetilmetacrilato, poliestireno, policarbonato, ABS.

Polímero cristalino

É caracterizado pela ordenação dos radicais na massa polimérica. A regularidade é verificada considerando-se as posições que os átomos das cadeias ocupam quando afastados por distâncias de até $10\text{\AA}$. Embora o polímero tenha grande capacidade de cristalização esta não atinge 100 por cento, por isso é chamado de semi-cristalino (CANEVAROLO, 2002).

As características típicas dos polímeros que possuem cristalinidade são: rigidez em temperaturas elevadas, baixa fricção, alta dureza, resistência a quebras por esforços ambientais e maior resistência à fluência em relação aos polímeros amorfos (BORRELY, 2002).

Exemplos de polímeros cristalinos são: poliamida, polietileno de alta e baixa densidade, polipropileno, politetrafluoretileno.

2.1.4 Polimetilmetacrilato (PMMA)

A história de laboratório dos monômeros acrílicos começou em 1843, quando da primeira síntese do ácido acrílico. A isso seguiu-se em 1865 a preparação do etilmetacrilato, por Frankland e Duppa, enquanto em 1877, Fittig e Paul notaram que ele possuía certa tendência para a polimerização. Por volta de 1900, a maioria dos acrílicos mais comuns haviam sido preparados em laboratório e ao mesmo tempo já existiam alguns trabalhos sobre a sua polimerização. Em 1901, o Dr. Rohn, na Alemanha, começou um trabalho sistemático no campo dos acrílicos e mais tarde tomou parte ativa no desenvolvimento industrial do éster acrílico naquele país. O polimetilmetacrilato foi o primeiro polímero acrílico produzido industrialmente por Rohn e Maas, em 1927. Foi vendido como uma solução do polímero em solvente orgânico e foi usada principalmente em lacas e formulações para revestimentos superficiais. Mais tarde Rowland Hill (I.C.I.) estudou o metacrilato e sua polimerização, enquanto que Crawford (também da I.C.I.) desenvolveu um método econômico para a fabricação de monômeros (BRISTON e MILES, 1975).

O polimetilmetacrilato permite a passagem de luz, é resistente a intempéries, tem elevada estabilidade dimensional e excelentes combinações de propriedades estruturais e térmicas. Apresenta transparência igual aos mais apurados vidros ópticos.

Sua transmitância é da ordem de 92 por cento dentro do espectro eletromagnético, dito visível, que se estende de 400 a 760 nm e índice de refração de 1,49, suficientemente alto para a utilização em lentes e outras aplicações ópticas típicas. As propriedades

mecânicas do polimetilmetacrilato são elevadas quando as cargas são relativamente de curto tempo de aplicação. As soluções aquosas da maioria dos produtos de limpeza não afetam o material, porém este tem baixa resistência aos ésteres, hidrocarbonetos aromáticos e cetonas (MULTIPLAST, 2004).

2.2 Outros Polímeros com Propriedades Ópticas

Os polímeros ópticos são inerentemente limitados em aplicações de luz visíveis. Muitos polímeros ópticos começam a absorver a faixa azul do espectro e tem bandas de absorção em 900, 1150, 1350 nm e tornam-se totalmente opacos em 2100 nm. A similaridade do espectro de absorção de muitos plásticos ópticos pode ser atribuída a igualdade de suas estruturas moleculares. Poucos materiais poliméricos têm sido usados em aplicações de filtros UV (<400 nm), devido a perdas na banda de transmissão do infravermelho (KOGLER, 1999).

A transparência à luz visível é apresentada por polímeros amorfos, ou com baixo grau de cristalinidade. É quantitativamente expressa pela transmitância, que é a razão entre a quantidade de luz que atravessa o meio e a quantidade de luz que incide sobre a superfície, podendo alcançar até 92 por cento. A quantidade de luz restante é refletida na superfície ou absorvida dentro do material transparente. Quando existem inclusões muito pequenas ou cristalitos, o material torna-se semi transparente ou mesmo opaco. A determinação da transmitância é feita pelos métodos ASTM D 1746 e é medida em porcentagem (MANO, 1991).

Kogler (1999), ressalta o grande desenvolvimento da ciência óptica aplicada a produtos visando aumento da qualidade de vida e contribuindo para o fortalecimento de-

sta. Em muitos destes produtos o principal constituinte é o vidro, mas a substituição pelo plástico torna-se marcante. Embora não exista ainda substituição total devido a certas deficiências comparadas com o vidro, dentre elas, ter maior coeficiente de expansão térmica, o plástico possui outras propriedades que fazem dele alternativa atrativa, tais como: baixa densidade, alta resistência ao impacto.

Recentemente materiais plásticos transparentes estão sendo usados largamente na fabricação de componentes ópticos. E, para que o uso desses materiais seja eficiente, qualidades como pureza óptica, transmissão e índice de refração que devem ser cuidadosamente monitorados pelos fabricantes.

Grande número de fabricantes de materiais ópticos estão incorporando o plástico óptico em seus produtos com o objetivo de reduzir custos, ter condições de empregar geometrias complexas e uniformizar os componentes. A integração entre desenho, feramental e fabricação é crítica para garantir bons resultados desses produtos (OPTICAL COATING LABORATORY, INC., 2002).

Segundo Ning (1998), os processos de retificação e polimento são difíceis e muito caros para produzir superfícies esféricas ou planas em vidro óptico. Entretanto os processos de moldagem e injeção tornam possível e econômico produzir superfícies ópticas sofisticadas em plástico.

A evolução de sistemas utilizando polímeros ópticos e sua aceitação continuam avançando em aplicações tais como: diagnósticos médicos (laparoscópios, artroscópios, citoscópios, analisadores de sangue, etc.), sistemas visuais de impressão, sistemas computacionais (câmeras de vídeo conferências, telas de cristal líquido, leitores de código de barras, etc.).

Bauer et al.(2002), consideram que plásticos ópticos clássicos não podem ser sub-

stituídos pelas resinas comuns disponíveis atualmente, por não apresentarem qualidades essenciais dos plásticos para uso em componentes ópticos tais como:

- Plasticidade (possibilitando a fabricação de superfícies e geometrias ópticas complexas),
- Baixo peso específico,
- Pigmentação,
- Alta resistência ao impacto,
- Capacidade de aceitar revestimento (resistência à abrasão, reflexão ou cobertura anti-reflexo),
- Economia no custo de produção em comparação com o vidro (aproximadamente 10 vezes menor),
- O custo com revestimento é aproximadamente da mesma ordem de grandeza em relação ao vidro.
- Baixa condutividade térmica,
- Birrefringência de aproximadamente 10^{-4} (devido ao processo de fabricação),
- Estabilidade a baixas temperaturas,
- Alto coeficiente de expansão térmica.
- Baixa resistência em relação a determinados solventes e/ou produtos químicos.
- Baixa dureza e alta estabilidade dimensional.

Teyssier e Devereese (1995) acreditam que o campo do polímero óptico não tem somente superado o vidro em algumas aplicações, mas é inegável o sucesso comercial em algumas das mais avançadas tecnologias na fabricação óptica.

2.2.1 Propriedades Ópticas

Índice de Refração

O índice de refração é definido como a razão entre a velocidade de radiação eletromagnética no vácuo (3×10^{10} cm/s) e a velocidade de um dado meio. O que se determina é a redução da velocidade da luz que passa do vácuo para um meio transparente e opticamente isotrópico. O índice de refração está relacionado ao desvio que ocorre quando o raio de luz passa em um ângulo inclinado de um meio para outro, e é definido pela razão entre os senos dos ângulos de incidência e refração. Esse índice é adimensional e medido segundo o método ASTM D 542, para a maioria dos polímeros o índice de refração está na faixa de 1,45 a 1,60 (MANO, 1991).

Embora o índice de refração dos plásticos ópticos seja próximo do padrão dos vidros óticos, a variação do índice em função da temperatura (dn/dt) é cerca de 50 vezes maior que dos vidros óticos. Isto faz o desempenho dos plásticos ópticos serem menos estáveis termicamente (KAROW, 1993).

A maior limitação para os sistemas ópticos está relacionada com a alteração do índice de refração e influência da temperatura (dn/dt). Em algumas aplicações isto pode criar indesejáveis aberrações e/ou mudanças no comprimento focal. Pode-se dizer que isto é devido em parte a absorção de umidade, baixa temperatura de transição vítrea e variação da expansão térmica, geralmente maior que o vidro, embora muitos polímeros operem na faixa de 200°C (TOLLEY, 2003).

Além disso o vidro está menos sujeito a formação de micro-trincas e bolhas que são centros espalhadores de luz.

Número Abbe

Toda vez que a luz passa através de uma superfície, ela sofre dispersão, e dependendo da quantidade da dispersão, o material pode ser classificado como sendo de maior ou menor qualidade óptica.

A dispersão cromática é a decomposição da luz branca em diversas cores. A aberração cromática é numericamente quantificada pela equação matemática criada por Ernest Abbe. A dispersão das cores ao atravessar um meio resulta em aberração cromática. Portanto a valor Abbe, mede a constringência dos materiais ópticos.

Para calcular o número Abbe, usa-se a eq. (1):

$$\text{Abbe} = \text{Nd} - 1 / \text{Nf} - \text{Nc} \quad (1)$$

Nd = índice nominal, correspondente a aberração na cor amarela.....nd = 589,3nm

Nf = índice nominal, correspondente a aberração na cor azul.....nf = 486,1nm

Nc = índice nominal, correspondente a aberração na cor vermelha.....nc = 656,3nm

Quanto maior variar o índice de refração, mais o material é dispersivo.

O número Abbe para plásticos ópticos variam de cerca de 100 até menos que 20. Este parâmetro é usado normalmente para descrever a variação do índice de dispersão (KOGLER, 1991).

Birrefringência

Também conhecido como dupla refração é observada quando uma radiação luminosa incide sobre um meio não isótropo, e a onda se decompõe em duas e se propagam em diferentes direções sendo uma componente chamada ordenada e um raio extraordinário. No caso de plásticos ópticos isso ocorre quando eles são submetidos a forças externas

como compressão e tração. Quando se observa esses materiais com luz branca polarizada um padrão de franjas aparece como uma série de contínuas e sucessivas faixas de diferentes cores. Cada uma dessas faixas representa um diferente grau de birrefringência. Em componentes plásticos essas tensões internas são introduzidas durante o processo de fabricação, entretanto lentes plásticas têm sido confeccionadas com reduzida birrefringência. Em aplicações muito críticas a birrefringência precisa ser analisada, entretanto para algumas aplicações ópticas essa condição pode ser desprezada (SILVA, 2002).

A Tabela 1, apresenta as principais características de vários polímeros ópticos comparadas com o vidro óptico BK7.

Tabela 1- Propriedades de vários materiais ópticos.

Propriedades	Unidades	PMMA	PS	PC	NAS	SAN	TPX	ADC	BK7
Índice de Refração	nf=486nm	1.486	1.604	1.598	1.575	1.578	1.473	1.510	1.522
	nd=589nm	1.491	1.590	1.586	1.533	1.567	1.467	1.504	1.517
	nc=656nm	1.488	1.585	1.581	1.558	1.563	1.464	1.501	1.514
Nº Abbe		61.4	31.1	34.5	35	37.8	51.9	56	64.6
Varição c/ Temperatura	dn/dt.10 ⁻⁵ /°C	-8.5	-12.0	-11.8 a -14.3	-14.0	-----	-----	-14.3	+0.3
Condutividade	cal/s-cm°C.10 ⁻⁴	4.96	2.4 a 3.3	4.65	4.5	2.9	4.0	5.0	0.266
Haze	%	2	3	3	3	3	5	3	-----
Transmitância	% (esp.3.17mm)	92	88	89	90	88	90	93	99.9
Abs. H2O	100% imerso 24h à 23°C	0.3	0.2	0.15	0.15	0.2 - 0.35	-----	0.2	-----
Deformação	%	0.2 - 0.6	0.2 - 0.6	0.5 - 0.7	0.2	0.2 - 0.6	1.5 - 3.6	-----	-----
Temperatura Recomendada	°C	92	82	124	93	88	-----	100	-----

Fonte: Kogler (1999)

2.3 Torneamento com Ferramenta de Diamante Monocristalino

A tecnologia da usinagem de ultraprecisão ao longo das últimas décadas, tem alcançado grandes avanços em relação ao projeto de máquinas, ferramentas e novos materiais. Nos anos 70, técnicas de usinagem de ultraprecisão foram adotadas com êxito na fabricação de componentes para computadores, máquinas fotocopadoras e impressoras, onde são necessárias, alta precisão geométrica aliada à superfícies com alto grau de acabamento (CHAPMAN, [20-?]).

Com o torneamento de ultraprecisão é possível produzir componentes com precisão de $1\mu\text{m}$ e rugosidade final de 10 nm ou menor, deste modo constituindo-se numa alternativa tecnológica para a fabricação de componentes avançados. Na indústria óptica e eletrônica, lentes, espelhos e insertos para moldes de injeção de lentes plásticas são tradicionalmente fabricadas por múltiplo processos como: retificação, lapidação e polimento. Este processo de produção consome tempo e o custo é alto, e somente perfis esféricos e superfícies planas são possíveis (XIANGDONG, 2000).

Segundo Paro (2002), a usinagem de ultraprecisão é reconhecida como uma solução tecnológica para a fabricação de muitos componentes optoeletrônicos para diversos equipamentos optomecânicos. Um dos mais importantes campos em que a tecnologia da usinagem de ultraprecisão é aplicada encontra-se na fabricação de moldes e matrizes para a produção em grande escala de componentes ópticos ultraprecisos onde são exigidos diferentes tipos de produtos.

Exemplos de campos de desenvolvimento em tecnologia da usinagem de ultraprecisão com algumas aplicações práticas são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Campos de desenvolvimento da tecnologia da usinagem de ultraprecisão.

1. Alta precisão / Melhor qualidade superficial	Dispositivos ópticos com baixos comprimentos de onda
2. Usinagem de elementos com geometrias complexas	Espelhos e lentes plano convexo Espelhos toroidais
3. Usinagem de grandes componentes	Telescópios, lasers
4. Usinagem de pequenos componentes / micro componentes com geometria complexa	Micromáquinas
5. Usinagem de materiais duros	Aço duro para matrizes Cerâmicas e outros materiais duros e frágeis

Fonte: Paro (2002)

Tanigushi apud Mammalis (2001), classifica as técnicas de usinagem em quatro grandes grupos para definir o desenvolvimento da usinagem de precisão:

- Usinagem convencional
- Usinagem de precisão
- Usinagem de alta precisão
- Usinagem de ultraprecisão

De acordo com a previsão de Tanigushi apud Mammalis (2001), na qual ele faz considerações do desenvolvimento no século XX, a precisão da usinagem convencional irá aproximar-se de 1 μm , usinagem de precisão 0,1 μm , usinagem de alta precisão 0,01 μm , conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Desenvolvimento da precisão em usinagem durante o Século XX.

Fonte: TANIGUCHI, (1994).

No contexto da usinagem de ultraprecisão, o torneamento com ferramenta de diamante monocristalino (ponta única) é um excelente processo de fabricação para a produção de componentes onde a complexidade de forma e acabamento são exigidos a níveis submicrométricos e nanométricos.

Chapman ([20-?]), considera que o uso da usinagem de ultraprecisão está centrada na tecnologia do torneamento com ferramenta de diamante. Como tal, o processo é limitado para materiais que podem ser usinados com diamante. Estes materiais incluem a maioria dos elementos com estrutura cúbica de face centrada, fundamentalmente ligas não ferrosas como: alumínio, cobre, níquel, ouro, latão e bronze. Além destes a usinagem com diamante é bem apropriada para cortar materiais cristalinos como: germânio, silício, sulfeto de zinco e polímeros como polimetilmetacrilato, poliestireno e policarbonato.

Em 1983, o torneamento com ferramenta diamante era a técnica usada para a fabricação de superfícies complexas com ferramenta nível de precisão micrométrica. Hoje o torneamento com diamante tem sido desenvolvido para que precisões de até 0,1 μm sejam realizadas rotineiramente (FRANSE, 1990).

A técnica do torneamento com ferramenta de diamante, realizada com uma máquina de ultraprecisão, controles com metrologia à laser e uma confiável ferramenta de diamante monocristalino, é usada em materiais dúcteis e frágeis. No passado, formas planas ou esféricas foram primeiramente concernidas na produção de componentes de materiais dúcteis, de maneira que a retificação e polimento eram superiores ao torneamento. Entretanto materiais frágeis têm sido usados por uma variedade de equipamentos em que são incorporados produtos ópticos, onde freqüentemente são exigidas formas anesféricas (NAKASUJI et al, 1990).

Porto et al (2004), apresenta na Tabela 4 uma lista de materiais frágeis que podem ser usinados com ferramenta de diamante, onde são incorporados novos materiais que estão relacionados principalmente à óptica de transmissão.

Tabela 4 - Materiais frágeis usinados com ferramenta de diamante com ponta única.

	Campo de Aplicação	Materiais	Especificações
Componentes mecânicos	HD de computadores	Alumínio	Precisão de forma
	Cabeçotes de videocassete	Níquel	0,1 0,5 μm
	Mancais aerostáticos	Cobre	Rugosidade Ra
	Moldes para lentes de Fresnel	Latão	$\leq 0.010 \mu\text{m}$
	Plings para conexão de fibra óptica		
	Blocos padrão		
Óptica de reflexão	Espelhos poligonais	Alumínio	Refletividade > 98%
	Impressora à laser	Cobre	Precisão de forma
	Copiadoras	Latão	0,2 0,01 μm
	Fotografia terra ar	Ouro	Rugosidade Ra
	espelhos para aplicação com laser	Níquel	$\leq 0,005 \mu\text{m}$
	Planos	Liga Cu-Be	
	Parabólicas	Molibidênio	
	Integradores de feixe		
Óptica de transmissão	Lentes de Fresnel	Monocristais:	Precisão de forma
	Lentes ópticas para aplicação em IV	Silício, germânio,	0,2 0,01 μm
	Lentes para fotocélulas	cleartran, GaAs,	Rugosidade Ra
	Lentes para aplicação em laser	LAP e KDP	$\leq 0,005 \mu\text{m}$
	Componentes ópticos para Cd players	Amorfos: vidros ópticos, zerodur, silica fundida.	

Fonte: Porto et al, (2004)

Em recentes pesquisas Gebhardt e Steinkopf (2003), relatam a possibilidade de produzir elementos micro-ópticos com micro-usinagem usando ferramenta de diamante com ponta única, onde lentes esféricas e anesféricas com diâmetros menores que 3,0 mm podem ser obtidos. O componente é posicionado à placa do torno e o corte é realizado

pelo movimento da ferramenta no plano X-Z. Devidos aos pequenos diâmetros e curvas acentuadas, é necessário o uso de ferramentas com raio de ponta pequeno e ângulo de folga pequenos. A Figura 2.1, mostra lentes de PMMA objetivas de uma micro câmera produzida por esta técnica.

Figura 2.1 Micro lentes torneadas com ferramenta de diamante com ponta única.

Fonte: Gebhardt e Steinkopf, (2003).

Outra aplicação é proposta por Davis et al.(2003), onde consideram que componentes micro-ópticos na faixa de 10 a 100 nm, são soluções tecnológicas disponíveis para telecomunicações, diagnósticos e imagens na área médica e sistemas de vigilância. Avanços na produção micro-óptica tem sido retardados por condições que atrasam o progresso na fabricação, testes e metrologia. Geralmente a técnica da litografia domina a produção

atual, limitada a padrão bidimensional com configuração de aparência inferior. Um método alternativo para a fabricação de componentes microfotônicos é o torneamento com diamante monocristalino, que oferece possibilidade de geração de contorno tridimensional, acabamento final em torno de 1 nm Rz e superfícies com formas variáveis.

Franse (1990) considera que no torneamento com ferramenta de diamante, a remoção do material é feita por ação mecânica e os efeitos térmicos e químicos tem influência secundária, pois a precisão obtida depende da rigidez estática, condições dinâmicas e térmicas da máquina-ferramenta e sua capacidade de executar e controlar os movimentos e condições da ferramenta de corte.

No torneamento de ultraprecisão a aresta de corte da ferramenta e vibrações originadas pela máquina-ferramenta e ambientais podem afetar a superfície da peça, onde marcas periódicas são criadas formando uma superfície ondulada (HOCHENG e HSIEH, 2004).

Mudanças parciais de umidade e pressão atmosférica afetam a precisão e devem ser evitadas. Considerações térmicas também são importantes, pois a deficiência no controle da temperatura é a grande causa de erros no processo de usinagem de precisão. Conseqüentemente o ambiente onde a máquina-ferramenta está instalada deverá ser mantido em $\pm 18^{\circ}\text{C}$. Para minimizar erros causados pela troca de temperatura, a peça, máquina e componentes deverão estar em equilíbrio térmico antes de iniciar a remoção do material.

Em função da máquina-ferramenta de ultraprecisão trabalhar com tolerâncias submicrométricas, os movimentos entre peça e ferramenta que são extremamente precisos, e necessitam portanto, que sistemas de controle e posicionamento sejam considerados de vital importância para os resultados pretendidos (PORTO et al, 2004).

Nos últimos 10 anos há avanços significativos em controles, sistemas de realimentação, servomotores e consequentemente no projeto e construção de máquinas em geral e tem evoluído para que hoje os sistemas de usinagem de ultraprecisão, sejam mais precisos e com custo mais baixo resultando na proliferação do seu uso com uma extensa faixa de aplicação (CHAPMAN,[20-?]).

2.3.1 Ferramenta de Diamante Monocristalino

Ferramentas de diamante monocristalino com geometria definida são necessárias na usinagem de superfícies ópticas, as quais necessitam de um super acabamento para proporcionar um alto grau de refletividade (JASINEVICIUS et al, 1993).

A ferramenta de corte utilizada em sistemas de usinagem de ultraprecisão deve ter a capacidade de cortar estavelmente em regiões subnanométricas onde algumas vezes o cavaco contínuo removido poderá ter quilômetros de comprimento. As ferramentas de diamante monocristalino são exclusivamente utilizadas por sua reprodutibilidade de formas e resistência ao desgaste (IKAWA et al, 1991).

Em pesquisas realizadas na usinagem de ultraprecisão em ligas de Al, Yuan et al (1996), considera que a afiação da aresta de corte tem considerável influência na integridade superficial. A rugosidade superficial, microdureza, tensão residual e deformação plástica da superfície usinada são afetadas pela variação do raio da aresta de corte, ou seja, com menor raio da aresta de corte foi obtida melhor qualidade superficial.

Jasinevicius et al.(2004), considera que a aresta de corte de uma ferramenta de diamante pode ser polida até que se obtenha um raio menor que alguns nanômetros e que a espessura mínima de corte seja da mesma grandeza. O desgaste de aresta da ferramenta

prejudica a transição frágil-dúctil na usinagem de materiais frágeis, em razão do aumento do raio da aresta da ferramenta gerando desgaste frágil em função do aumento da pressão para permitir o regime dúctil fazendo com que o material atinja o desgaste frágil antes de atingir o regime dúctil.

Apresenta também baixo coeficiente de expansão térmica aliado a alta condutividade térmica, fazendo com que o calor gerado durante a usinagem, não seja deslocado através da aresta de corte, a fim de evitar expansão da ferramenta e alterações das dimensões da peça. Tem baixíssima compressibilidade, de maneira que a ferramenta não sofre compressão devido as forças de corte (BREHM, 1976).

O diamante monocristalino têm propriedades únicas tornando-o material ideal para ferramenta de ponta única em usinagem óptica. Pode ser bem afiado com uso de técnicas avançadas de lapidação para garantir qualidade no acabamento superficial de profundidades de corte nanométricas, para que refletância e dispersão estejam próximas dos níveis ópticos de polimento (BREHM, 1976).

As ferramentas de diamante são fabricadas obedecendo-se critérios de favorável orientação cristalográfica assegurando o mínimo desgaste e características da ferramenta em contato com a peça durante o corte (FRANSE, 1994).

A resistência da ferramenta de diamante apresenta um tempo de vida útil de aproximadamente 20 vezes maior que a ferramenta de metal duro, dado que o diamante é cerca de 4 vezes mais duro que o carboneto. Além disso, sua rigidez permite serem obtidas arestas de corte extremamente afiadas, em função do reduzido nível de espaçamento atômico do diamante, que situa-se entre 0,3 e 0,5 nm (HENRY, 2002).

O desgaste da ferramenta de diamante em polímeros é maior do que no cobre algumas vezes. Isto é atribuído geralmente a alta temperatura localizada, durante a usinagem

do polímero, devido a sua baixa condutividade térmica. A maior parte do calor gerado vai para a ferramenta, que tendo uma aresta de corte muito pequena eleva a temperatura gradativamente (FRIEDRICH, 1998).

Na usinagem com ferramenta de diamante de materiais poliméricos (termoplásticos e termofixos), tais como: PMMA, acrílico e fuorsilicone e acrílico hidrofóbico usados na confecção de lentes de contato, Kiela (2001) observou que o material contendo silicone, cuja tendência é reagir com os átomos de carbono do diamante provocou uma erosão química na ferramenta. Constatou que ao final do corte havia uma suave degradação da superfície, chamada “rainbow effects” observado em microscópio com ampliação de 20x. Este efeito é causado pela erosão química da aresta de corte e também pelo fato da estrutura molecular do diamante apresentar variação de resistência em diversos pontos.

Embora polímeros amorfos e diamante sejam eletricamente materiais isolantes, eletricidade estática pode ser esperada durante o torneamento decorrente do atrito entre ferramenta e peça. A cisão das cadeias poliméricas durante o corte gera uma carga adicional, que irá acumular-se na superfície de corte resultando em um campo elétrico, criando uma descarga entre ferramenta e peça formando radicais altamente reativos. Pesquisas feitas por Gubbels et al.(2004) mostram que luminescência decorrente desta descarga pode ser observada durante o corte de polímeros (PMMA e PC). O PMMA não apresentou luminescência, mas foram notadas pequenas lascas ao longo da aresta de corte atacadas por radicais reativos, resultando em sério desgaste. O corte do PC apresentou luminescência e maior desgaste nas faces de saída e incidência. Não houve diferença com relação ao desgaste tanto no corte à seco quanto úmido, embora tenha sido observado que com a umidade relativa do ar > 70 por cento, reduz-se a carga tribo-elétrica.

A seleção do diamante e a sua orientação é a base para uma boa ferramenta. Se

nenhum destes critérios forem considerados, a variação do desempenho da ferramenta irá ocorrer devido a pequenas diferenças químicas e estruturais no cristal do diamante. Uma ferramenta de boa qualidade tem raios polidos e ótima superfície na face de folga. Na face de saída algumas linhas podem ser toleradas, mas a aresta deverá ser livre de marcas, quando observadas com aumento de 500x. Linhas de lapidação são aceitas somente quando elas não aparecem na totalidade da aresta, e não influenciam na aresta de corte. As Figuras 2.2 e 2.3, apresentam um modelo de ferramenta de boa qualidade, enquanto a ferramenta das Figuras 2.4 e 2.5, tem as linhas de lapidação ao longo do raio, que resulta em uma aresta de uma aresta de corte fragmentada. A face frontal de folga mostra muitas microcrateras que são resultantes de uma retificação mal executada (COX e van HULST, 200?).

Figura 2.2 - Perfil de uma ferramenta de boa qualidade. Aumento 500x

Fonte: Cox e van Hulst, (200?).

Figura 2.3 - Perfil de uma ferramenta de boa qualidade. Aumento 500x

Fonte: Cox e van Hulst (200?).

Figura 2.4 - Perfil de uma ferramenta de qualidade inferior. Aumento 500x

Fonte: Cox e van Hulst (200?).

Figura 2.5 - Linhas de lapidação de uma ferramenta de qualidade inferior. Aumento 500x

Fonte: Cox e van Hulst (200-?).

No PMMA, o desgaste é geralmente mecânico e gradativo em um longo tempo, enquanto que em plásticos reforçados com fibra de vidro a reação química do pó abrasivo sobre o diamante é que produz maior desgaste (COX e van HULST, 200-?).

O desgaste da ferramenta não aparece imediatamente, mas desenvolve-se por um período de tempo. Primeiramente a aresta de corte começa a arredondar após o torneamento de poucas peças e conseqüentemente diferentes tipos de desgaste irão ocorrer como: lascas, desgaste da face de saída e da face de incidência (COX e van HULST, 200-?).

O projeto de ferramentas de diamante deve atender aos requisitos necessários à usinagem de ultraprecisão, em que acabamentos superficiais menores que 10 nm são freqüentes (PORTO et al, 2004).

A Figura 2.6, detalha a geometria de uma ferramenta de diamante monocristalino utilizada no torneamento de ultra precisão (JASINEVICIUS, 1994).

- r_ϵ Raio de ponta
- b Largura da aresta cortante
- α_1 Ângulo de folga
- α_2 Ângulo de folga extra
- γ Ângulo de saída
- ϵ Janela de aresta cortante

Figura 2.6 - Geometria de uma ferramenta de diamante monocristalino.

Fonte: Jasinevicius (1994).

Grabchenko et al.(2001), recomenda que ferramentas de diamante monocristalino usadas na usinagem de polímeros ópticos, tem alguns requisitos que devem ser observados a fim de que seja obtido o máximo desempenho exigido no acabamento final, tais como:

- Regularidade da estrutura da superfície do material da ferramenta, que garanta um raio mínimo de arredondamento da aresta de corte, e a mínima rugosidade da superfície de trabalho da cunha de corte.
- Mínimo coeficiente de atrito e adesão com o material à ser usinado.
- Resistência ao desgaste (capacidade de manter as dimensões geométricas por um longo tempo).

Em recentes pesquisas no desenvolvimento de ferramentas para torneamento de materiais poliméricos, Grabchenko et al (2001), apresenta na Figura 2.7 sugestão de geometria para semi acabamento e acabamento final.

Figura 2.7 - Ferramenta de diamante monocristalino.

Fonte: Grabchenko (2001).

2.4 Mecanismo de Remoção em Materiais Poliméricos

2.4.1 Introdução

O fenômeno de corte do material quando trabalhado por uma ferramenta, é análo-

go ao esforço de compressão exercido por uma cunha no material. Quando a ferramenta de corte penetra no material na direção de corte, como na Figura 2.8, a força da resistência ao corte R' que resulta na força normal F_{fn} e na força tangencial F_f na superfície de saída, atua na ferramenta. Quando a força de corte R , que é também chamada de reação R' atua sobre o material deforma-o até a ruptura, e o cavaco é produzido.

Fig. 2.8 - Características das condições de corte.

Fonte: Kobayashi e Saito (1962).

Kobayashi e Saito (1962), apresentam um modelo de mecanismo de corte ortogonal de um polímero termoplástico, mostrado na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Característica do corte ortogonal de um polímero.

Fonte: Kobayashi e Saito (1962).

Pode-se definir τ_s , como a tensão de cisalhamento no plano de cisalhamento AO e τ_c como a tensão de cisalhamento na superfície de saída BO. A distribuição da tensão de cada plano é suposta uniforme. Como a face AB é paralela à direção da força de corte R, o comprimento de contato BO, entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta será expressa pela eq. (2).

$$BO = \frac{d \sin(\theta + \beta - \alpha)}{\sin\theta \cos\beta} \quad (2)$$

e do equilíbrio de forças do triângulo ABO, as seguintes relações são deduzidas pelas eqs. (3) e (4).

$$\tau_s = R \cos(\theta + \beta - \alpha) \frac{\sin\theta}{d} \quad (3)$$

$$\tau_c = \frac{R \sin 2\beta \sin\theta}{2d \sin(\theta + \beta - \alpha)} \quad (4)$$

Em baixas velocidades de corte, τ_c pode ser igual a τ_s , conforme eq. (5).

$$\sin 2\beta = \sin[2(\theta + \beta - \alpha)] \quad (5)$$

O coeficiente de atrito (μ) entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta é muito pequeno, como visto na eq. (6).

$$\mu = (\pi/2) - 2\beta + \alpha \quad (6)$$

A força de atrito F_f e a força normal de atrito F_{fn} são calculadas à partir dos valores das componentes das forças de corte, e então o coeficiente de atrito pode ser calcu-

lado de: $\mu = F_f / F_{fn}$, e o valor de μ varia com o ângulo de saída da ferramenta.

Se $\mu = \theta$, então, este é determinado pela eq. (7).

$$\theta = [(\pi/2) + \alpha] \quad (7)$$

por conseguinte o plano de cisalhamento coincidirá com a superfície de saída da ferramenta.

Além disso, a deformação do material trabalhado ocorre somente na superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta. Isto significa que os cavacos são formados pela forte ação da aresta de corte da ferramenta com uma deformação por compressão e não pelo deslocamento do plano de cisalhamento. O ângulo de cisalhamento θ pode ser calculado através da medida da espessura do cavaco dc . Por conseguinte a deformação do cisalhamento γ_c e a tensão de cisalhamento τ_s no plano de cisalhamento podem ser calculadas usando o ângulo de cisalhamento θ .

A grandeza e direção da força de corte é calculada à partir de duas componentes medidas. Ferramenta com ângulo de saída negativo tende a comprimir o material para baixo durante o corte. Por outro lado, ângulo de saída positivo comprime o material para cima. O ângulo de saída no qual a força de compressão é igual a zero, é definido como ângulo de saída crítico. Este pode ser o ângulo de saída ideal para o corte de polímeros para obter-se alta precisão, porque a direção da resultante da força de corte coincide exatamente com a direção de corte, e neste caso o material não é deformado nem para cima ou para baixo durante o corte (KOBAYASHI e SAITO, 1962).

De acordo com Kobayashi (1967), alguns fatores que afetam o corte de polímeros podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 - Fatores que afetam o corte em polímeros.

Fator	Maior influência
Ângulo de saída	Formação do cavaco
Ângulo de folga	Desgaste da ferramenta
Raio de ponta	Rugosidade da superfície de corte
Parâmetros de usinagem	
Profundidade de corte	Formação do cavaco e rugosidade da superfície de corte
Velocidade de corte	Formação do cavaco e rugosidade da superfície de corte
Taxa de avanço	Formação do cavaco e rugosidade da superfície de corte
Temperatura ambiente	Geração de calor, aquecimento, derretimento

Fonte: Kobayashi (1967).

2.4.2 Formação do Cavaco

O mecanismo de formação do cavaco durante a usinagem varia com as condições de corte e propriedades térmicas e mecânicas do material a ser trabalhado, que deverão ser previamente analisadas para assegurar a alta qualidade e precisão do produto final (KOBAYASHI e SAITO, 1962).

Saito (1981), classifica os tipos de cavacos de polímeros no corte ortogonal em dois grandes grupos, contínuos e descontínuos, e estes podem ser divididas em seis tipos conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Tipos de cavacos.

Tipos de cavacos	Principal causa da formação
Clivagem	Clivagem e fratura em tensão
Contínuo	Cisalhamento contínuo
Cisalhado	Cisalhamento interrompido
Descontínuo-Tipo arrancado	Cisalhado com compressão
Arrancado com trinca	Cisalhado com tensão
Trincado	Propagação da trinca

Fonte: Saito (1981).

Estudos conduzidos por Rubenstein e Storie (1969), no torneamento de um polímero acrílico com ângulos de saída entre -20° e $+40^\circ$, com variações de 5° e utilizando taxas avanços de 0,04 a 0,21 mm/rev. mostraram que o aumento do avanço e do ângulo de saída da ferramenta favorecem a transição de dúctil para frágil na formação do cavaco. Como as condições de corte foram alteradas foram obtidos quatro tipos de cavacos: contínuos, descontínuos de comprimento maior que 6 mm, descontínuos entre 3 e 6 mm, e de comprimento abaixo de 3 mm. Neste último tipo os cavacos foram formados freqüentemente na forma de agulhas.

O mecanismo de remoção do cavaco de polímeros pode ser comparado a um fenômeno reológico similar a tensão de deformação e fratura. O diagrama de tensão deformação típico para polímeros é mostrado na Figura 2.10. Na curva (1), de 0 até A é uma região elástica e a fratura ocorre em A mostrando uma fratura frágil. Se a tensão do material durante o corte existir na faixa de 0 a A, o cavaco será produzido por uma trinca,

que é o cavaco do tipo descontínuo com trinca. Na curva (2), a região AB, mostra uma deformação plástica. Se a deformação do material durante o corte vai além do ponto A, este entra na região plástica, começa a fluir plasticamente e os cavacos do tipo contínuo e cisalhado são formados. A curva (3), mostra uma grande deformação elástica sendo que o material comporta-se como borracha. Quando a deformação elástica do material na região do corte é grande, o cavaco formado é do tipo clivagem, onde a espessura do cavaco é aproximadamente igual a profundidade de corte (SAITO, 1981).

Figura 2.10 - Diagrama tensão-deformação típico para polímeros.

Fonte: Saito (1981).

A formação do cavaco tem grande importância com relação as propriedades do material e conseqüentemente sobre as características de corte e acabamento final.

A relação entre a tensão e compressão, irá afetar a usinabilidade dos polímeros. A resistência à compressão nos termofixos é cerca de seis vezes maior que sua resistên-

cia à tensão. Ao contrário, alguns termoplásticos tem maior resistência à tensão que a compressão. Isto pode ser vantajoso para selecionar o perfil de corte da ferramenta, para que a fratura sobre tensão seja produzida. Grandes ângulos de saída podem servir a este propósito reduzindo o esforço requerido para o corte. Entretanto existe um limite prático do ângulo máximo à ser usado para que a fratura frágil seja produzida em alguns tipos de polímeros, formando cavacos descontínuos e conseqüentemente uma indesejável superfície rugosa (KOBAYASHI, 1967).

Xiao e Zhang (2002) pesquisaram o fenômeno de formação do cavaco em dois termoplásticos muito dúcteis à temperatura ambiente, devido a sua baixa temperatura de transição vítrea (T_g) : HDPE (polietileno de alta densidade) e LDPE (polietileno de baixa densidade). Observaram que os cavacos do LDPE se curvaram para dentro ou no sentido horário, enquanto no HDPE, formaram-se para fora no sentido anti-horário. Cavacos do tipo contínuo apresentaram curvaturas menos acentuadas a baixas velocidades de corte e esta condição pode ser entendida pelas Figuras 2.11 e 2.12.

Sabe-se que existem duas grandes zonas de deformação durante a formação do cavaco, comumente chamadas de zona primária e zona secundária. A deformação por cisalhamento ocorre na zona primária provocada pela alteração da direção do fluxo do material. Quando a força de cisalhamento excede esta tensão inicia-se a deformação plástica. Como esta deformação ocorre no plano de cisalhamento, na direção do movimento da ferramenta, o cavaco conseqüentemente curvará para fora conforme Figura 2.11. Na zona secundária, a deformação plástica e a compressão residual torcem o cavaco para dentro fazendo com que a direção final do enrolamento do cavaco seja determinada pela resultante dos dois fatores anteriores (XIAO e ZHANG, 2002).

Figura 2.11 - Mecanismo de formação do cavaco com alta deformação plástica.

Fonte: Xiao e Zhang (2002).

Figura 2.12 - Mecanismo de formação do cavaco com baixa deformação plástica.

Fonte: Xiao e Zhang (2002).

2.4.2 Transição Frágil – Dúctil

Em escala microscópica, a deformação em polímeros envolve alongamento e rotação das cadeias moleculares. Comumente a deformação de polímeros pode ser classificada como frágil, dúctil e elastomérica. Fatores como duração da tensão e temperatura afetam muito mais os polímeros do que os metais e cerâmicas. Isto deve-se ao fato de que os polímeros são viscoelásticos, isto é, sua condição de tensão-deformação depende do tempo (MEYERS e CHAWLA, 1999).

Acima da temperatura de transição vítrea (T_g), os polímeros podem apresentar fluência ou alta condição elástica, devido a ativação térmica garantindo que a mobilidade molecular seja alta. Abaixo da T_g a configuração molecular está inerte e a fratura frágil ocorre com propagação da trinca (CALLISTER, 1997).

Existem basicamente dois tipos de fratura: a fratura frágil e fratura dúctil. A fratura frágil é caracterizada pela ruptura do material antes de atingir a deformação plástica, sendo que esta apresenta um escoamento e uma deformação plástica antes da ocorrência da ruptura. Na fratura dúctil a tensão onde ocorre o escoamento (“yield point”) é mais importante pelo fato do material polimérico deformar-se irreversivelmente (CANEVAROLO, 2002).

A tensão produzida pelo corte em combinação com a dureza do material determina a condição de um polímero comportar-se como frágil ou dúctil. A tensão pode ser influenciada pelas condições termo-mecânicas, entretanto a dureza é influenciada pela cadeia molecular do polímero. Algumas propriedades como resistência ao impacto e fluência por cisalhamento estão relacionadas ao peso molecular do material (KREVELLEN, 1990).

Griffith (1921), desenvolveu a teoria de fratura frágil que é mais fácil de ser

quantificada matematicamente do que a teoria de fratura dúctil baseando-se na capacidade que o material possui de propagar uma trinca em crescimento. Essa trinca pode ser uma falha natural do material ou gerada por uma sollicitação mecânica. Griffith considera que a tensão crítica para o início da fratura σ_f , para que haja propagação da trinca perpendicular à sollicitação pode ser expressa pela eq. (8)

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi c}} \quad (8)$$

onde E = módulo de elasticidade; γ_s = energia superficial exigida; c = comprimento da trinca, sendo que a propagação da trinca após atingir a tensão crítica pode levar à ruptura do material. A equação estabelece que quanto maior o comprimento da trinca c , menor é a tensão σ_f para propagação desta, e menos resistente torna-se o material. O aumento de γ_s determina a menor chance da trinca desenvolver-se ou seja, menor é a tenacidade do material (CANEVAROLO, 2002).

No regime frágil os polímeros sofrem um tipo de fratura chamada fissuramento, em que as cadeias poliméricas situadas à frente da trinca formam uma linha ao longo do eixo de tensão, resultando em concentração de tensões. Outro tipo de deformação também precursor de polímeros é o fenômeno chamado de banda de cisalhamento, que a formação de uma faixa de material com alto fluxo de tensão. A figura 2.13 ilustra o processo de formação dessas irregularidades.

Figura 2.13 - Processo de Fratura em Polímeros.

Fonte: MEYERS E CHAWLA (1999).

Os mecanismos de fratura em polímeros dúcteis, embora dependam da propagação de trincas, são muito mais complexos, visto que o processo de fratura nestes ocorrem em vários estágios tais como: escoamento das moléculas poliméricas, estiramento à frio e estágio final da fratura, sendo que o escoamento (“yielding”) ocorre após serem atingidos níveis de deformações irreversíveis e a tensão nesse estágio registra a resistência do material a deformações permanentes. Quando o escoamento é iniciado, as moléculas são orientadas na direção da sollicitação e quando atingem um grau elevado de orientação inicia-se o processo de ruptura (CANEVAROLO, 2002).

Muitos polímeros fraturam no modo frágil abaixo da sua temperatura de transição vítrea (T_g). Isto é particularmente característico de polímeros que possuem alta densidade entre as cadeias de ligação, e nesta circunstância a estrutura da cadeia molecular do polímero no início é rígida e até que desalinha e/ou movimenta-se. Frequentemente o fenômeno da fissura e escoamento antecede a fratura e ambos implicam na localização da deformação plástica no material. A maior diferença entre elas é que a trinca ocorre com o aumento no volume enquanto o escoamento ocorre a um volume constante. Em polímeros frágeis como o polimetilmetacrilato (PMMA) e o poliestireno (PS), a trinca antecede a fratura frágil. Em polímeros dúcteis como o policarbonato (PC) e polietileno (PE), que tem cadeias de ligações flexíveis, o escoamento é o modo dominante da deformação, e a fratura é dúctil (MEYERS e CHAWLA, 1999).

A usinagem na região dúctil é preferido para metais, por causa das pequenas forças de corte e movimento suave da ferramenta. Para materiais poliméricos entretanto, a ferramenta pode remover e dar melhor acabamento no corte, se o polímero também tornar-se dúctil. Com o aumento da temperatura acima da T_g , os polímeros passam da condição de frágil para dúctil concluindo-se que a usinagem acima da T_g resulta em me-

lhor qualidade superficial. No estado vítreo o processo de corte pode induzir a formação de trincas na superfície (AVILA et al, 2003).

Em estudos realizados por Gubbels et al.(2004), na usinagem do poliestireno (PS) de pesos moleculares diferentes, com a finalidade de avaliar a influência do envelhecimento (“aging” - térmico) e rejuvenecimento (“rejuvenation” – termomecânico) observou-se que apesar de não haver diferença na condição dúctil-frágil ficou evidenciado a diferença entre as forças de corte, onde as amostras envelhecidas (“aging”) apresentaram maiores forças indicando que a tensão inicial contribui significativamente no mecanismo de corte dos polímeros.

A tensão inicial é um fator predominante no processo de corte e pode ser originada na zona de deformação plástica. O PS com baixo peso molecular, têm uma Tg reduzida ($\sim 100^{\circ}\text{C}$) significando que sua cadeia molecular tem alta mobilidade térmica, o que acarreta fácil deformação plástica, que irá formar uma grande área de contato, e como consequência altas forças de corte (GUBBELS et al, 2004).

Smith (1989) considera que o efeito da temperatura de transição vítrea (Tg) no acabamento superficial de um polímero termoplástico usinado com ferramenta de diamante monocristalino é o parâmetro mais importante. Se a temperatura na zona de corte excede a Tg, uma boa superfície final pode ser obtida, pois o material é usinado no modo dúctil.

2.5 Influência dos Parâmetros de Corte

Xiao e Zhang (2002) estudaram o efeito da taxa de avanço (f) e rotação (rpm) na qualidade superficial do polietileno de alta densidade (HDPE), um polímero termo-plásti-

co, com objetivo de avaliar o acabamento final. Os autores observaram que a qualidade se deteriorou com o aumento do avanço, devido a espessura da camada removida. Com uma taxa de avanço muito grande e uma rotação alta, a rugosidade permaneceu invariável e apresentou marcas do corte bem definidas. Diminuindo-se o avanço foi obtida uma superfície lisa, com acentuada redução dos riscos da ferramenta sendo que a influência do aumento da rotação foi significativa conseguindo-se uma superfície brilhante a 2500 rpm e opaca a 100 rpm. O estudo mostra que a integridade superficial melhor com alta rotação, devido a dureza do material provocado pela alta taxa de deformação.

O fenômeno da fratura no corte de polímeros varia com o tipo de material e também com as condições de corte, e em especial com a velocidade de corte. Na usina gem de amostras de PMMA, com a velocidade de corte inicial próxima de 0 m/min., e final de 0,8 m/min., Kobayashi e Saito (1962) observaram que na condição de velocidade máxima, a deformação na zona plástica foi pequena, não apresentando trincas e redução na espessura dos cavacos descontínuos que diminuiu. Quando a velocidade decresceu para 0,2 m/min. trincas ocorreram, e a deformação na zona plástica aumentou. Com uma velocidade de corte quase estática, as trincas aumentaram e a deformação na zona plástica foi claramente visível.

Kobayashi e Saito (1962) admitem que o aumento da força de corte em consequência do aumento da velocidade de corte é devido a um grande número de cadeias moleculares que resistem à deformação, visto que a velocidade de relaxação é incapaz de acompanhar a velocidade de deformação, ou seja, a velocidade de corte .

Lavrynenko (1999) concluiu que a influência da velocidade de corte na qualidade superficial de um polímero óptico é evidente. Na usinagem de uma amostra de poliestireno concluíram que existem pelo menos duas faixas ótimas de velocidade de corte

para o bom desempenho de fabricação com o mínimo defeito, ou seja, na zona de baixa velocidade ($v_c \leq 30$ m/min.) e na zona de alta velocidade ($v_c \geq 750$ m/min.). Dentro do intervalo de velocidade desta zona e em particular dentro da faixa de $100 \text{ m/min.} \leq v_c \leq 40 \text{ m/min.}$, ocorreu a destruição térmica do polímero e deterioração da superfície óptica.

Carr e Feger (1993) também constataram que na usinagem de ultraprecisão de vários tipos de polímeros, as propriedades e a viscoelasticidade do material, tem uma influência decisiva na rugosidade final. Devido as propriedades viscoelásticas dependerem do tempo e da temperatura, a variação da rotação (rpm) pode alterar o mecanismo de corte, de fratura frágil com superfícies irregulares, para a remoção em regime dúctil, apresentando superfície final quase polida.

Kobayashi e Hirakawa (1984) observaram que com baixa taxa de avanço o comportamento do polímero é caracterizado como plástico, e com avanços altos torna-se elástico, em função destas deformações serem dependentes do tempo de relaxação.

Para Saito (1981), o aumento da força de corte, decorrente do aumento da velocidade de corte são produzidos cavacos do tipo contínuo, sendo que por outro lado com altas velocidade e com força de corte pequena e constante, o cavaco será do tipo descontínuo com trinca. Deste modo considera que em baixas velocidades de corte os cavacos são produzidos por fratura dúctil com fluxo viscoelástico e com altas velocidades de corte por fratura frágil com trinca. Conseqüentemente o fenômeno de fratura durante a formação do cavaco, depende da velocidade e da força de corte.

2.6 Influência da Geometria da Ferramenta

A geometria da ferramenta (ângulo de saída e raio da ponta) associada as condições

de usinagem (avanço, profundidade de corte e velocidade de corte) têm influência na rugosidade, formação do cavaco, desgaste da ferramenta e amolecimento do material polimérico. O ângulo de saída e a taxa de avanço são importantes parâmetros que determinam a rugosidade superficial na usinagem de um polímero (ZHANG e XIAO, 2002).

Kobayashi (1962) considera ser a geometria da ferramenta a condição primordial com relação a qualidade superficial, para certos tipos de polímeros. Conseqüentemente o ângulo de saída é identificado como o mais importante parâmetro determinante da rugosidade superficial na usinagem de um polímero.

Carr e Feger (1993) apresentam um modelo para explicar a reação do material polimérico durante a usinagem através do ângulo de saída da ferramenta de aresta simples. A Figura 2.14, mostra o mecanismo de formação do cavaco no torneamento de materiais poliméricos, para os três ângulos de saída.

Figura 2.14 - Mecanismo de formação do cavaco para um material polimérico.

Fonte: Carr e Feger (1993)

Ângulo de saída negativo: Em materiais frágeis, quando o esforço produzido pela aresta cortante excede o limite de resistência de um polímero, a trinca irá propagar-se na direção do vetor força. É importante notar que esse modelo admite que as trincas organizam-se e propagam-se através do campo compressivo, isto é, à frente da ferramenta. Trincas formadas no campo de tensão atrás da aresta de corte têm características diferentes de propagação movendo-se ortogonalmente ao vetor força. O controle da rugosidade de polímeros frágeis é orientado pela precisão com que direcionamos a propagação da trinca. Com grandes ângulos de saída negativos a trinca irá estender-se para baixo. A ferramenta irá movimentar-se além da trinca rompendo pequenos pedaços de material. O cavaco produzido nesta condição é maciço, com tendência a ser contínuo e a superfície final constituída é grandemente de sulcos produzidos pelo rompimento do material (CARR e FEGER, 1993).

Ângulo de saída neutro: Se o vetor força é direcionado ao longo da superfície, a trinca também estará no plano de corte. Após uma pequena distância, a trinca irá mudar levemente de direção produzindo defeito na superfície. Além disso, pelo acaso natural da propagação da trinca, a direção desta é provavelmente influenciada pela orientação das cadeias poliméricas, variação macroscópica de densidade e natureza química do material. Os cavacos produzidos quando o ângulo de saída é próximo de zero são longos, com arestas lisas, indicando uma remoção relativamente fácil do material (CARR e FEGER, 1993).

Ângulo de saída positivo: Um ângulo de saída positivo irá direcionar o vetor força para cima pelo plano de corte. A pequena compressibilidade do polímero causam pequenas ilhas do material, que se projetam acima do plano de corte. Após a ferramenta ter passado, essas pequenas ilhas expandem-se para cima aumentando a rugosidade final.

Se o ângulo de saída aumentar progressivamente, a rugosidade aumentará e os cavacos produzidos serão do tipo descontínuos (CARR e FEGER, 1993).

Um aumento no raio da ferramenta freqüentemente conduz à uma piora na deformação e processo de formação do cavaco, como consequência do aumento da área de contato entre ferramenta e peça. Entretanto o uso de ferramentas com raios grandes ($4 < r_p < 8$ mm) é um recurso utilizado, quando um aumento da velocidade de corte é necessário para aumentar a produtividade da usinagem (GRABCHENKO, 2001).

O ângulo de saída no qual a força de compressão é igual a zero é definido como ângulo de saída crítico. Este pode ser o ângulo de saída ideal para o corte de polímeros, para obter-se alta precisão, porque a direção da resultante da força de corte coincide exatamente com a direção de corte, e neste caso o material não é deformado para cima ou para baixo durante o corte. Além disso, o ângulo de saída crítico deverá ser igual ao ângulo de atrito na superfície de saída da ferramenta, de maneira que influencie as condições de atrito do cavaco, na superfície de saída da ferramenta. O ângulo de saída crítico varia com diferentes tipos de polímeros, profundidade de corte e velocidade de corte (KO-BAYASHI e SAITO, 1962).

2.7 Influência da Temperatura no Corte

O trabalho necessário para deformação e fratura de um sólido pode ser armazenado internamente, usado para a geração de uma nova superfície, ou dissipado normalmente na forma de calor. A fratura de polímeros amorfos implica no processo de dissipação associado com trincas e é particular para cada tipo de material. A tensão aumenta gradativamente causando a desintegração da cadeia polimérica próxima ao início da trinca, seguida pela formação de fibrilas moleculares, alongamento e ruptura destas, causando a

deformação total do polímero (BJERKE e LAMBROS, 2002).

A maior parte do calor gerado durante a deformação plástica de qualquer material é convertida em calor interno. Nos metais isto não é muito importante, pois estes são bons condutores de calor e, exceto à temperaturas extremamente altas, a variação da temperatura do material é insignificante. Os polímeros por serem maus condutores de calor, concentram o calor gerado originado de uma deformação plástica em regiões localizadas causando com isso seu amolecimento. No caso da fadiga, o calor pode ser dissipado facilmente à baixos esforços e frequências, porém pode resultar em um amolecimento significativo, devido a altos esforços e frequências em cargas cíclicas, sendo este fenômeno chamado de aquecimento adiabático (MEYERS e CHAWLA, 1999).

As propriedades térmicas como calor específico, condutividade térmica, coeficiente de expansão térmica e temperatura de amolecimento exercem efeitos sobre a usinagem dos polímeros. O calor específico por unidade de peso dos plásticos são normalmente mais que $0,2 \text{ cal}/(^{\circ}\text{C})(\text{g})$, maiores que dos metais. Entretanto devido a densidade dos plásticos serem muito mais baixas que a dos metais, os valores do calor específico por unidade de volume para os plásticos são menores que dos metais. Por conseguinte a elevação de temperatura no plástico será maior quando uma quantidade de calor é aplicada para igual volume, de plástico e metal. Como exemplo temos que, se aplicarmos 20 cal a um centímetro cúbico de aço e poliestireno, a elevação de temperatura no aço será somente de $23,2^{\circ}\text{C}$, comparada a $58,8^{\circ}\text{C}$ no poliestireno (KOBAYASHI, 1967).

Além disso, a condutividade térmica dos plásticos são menores que $2,2 \times 10^{-3} \text{ cal}/(\text{s})(\text{cm})(^{\circ}\text{C})$, que é muito pequena se comparada a do aço. Deste modo todo o calor gerado pelo atrito entre o plástico e o metal da ferramenta de corte será conduzido para a ferramenta.

A razão que este calor é transferido para o aço (λ_t) pode ser calculada como mostrado na eq. (9).

$$\frac{\lambda_s}{(\lambda_s + \lambda_p)} \quad (9)$$

onde λ_s é a condutividade térmica do aço e λ_p , a condutividade térmica do plástico. Como o cálculo indica, que a razão de calor transferida para o aço por condução térmica é de 99,2 a 99,8 por cento do total gerado, o remanescente 0,2 a 0,8 por cento será conduzido para o plástico. Além disso, uma vez que a quantidade de calor transferido para o plástico não pode alcançar o interior da massa, somente a camada superficial irá sofrer uma significativa elevação de temperatura (KOBAYASHI, 1967).

No torneamento com ferramenta de diamante monocristalino, de uma superfície polimérica plana, fontes externas de calor são ausentes, e a formação do calor na zona de corte ocorre em função da deformação plástica e fratura do material, devido a interação entre a aresta de corte, atrito do material cortado ao longo da superfície de saída da ferramenta e atrito devido a recuperação elástica do material ao longo da superfície de incidência da ferramenta (LAVRYNENKO, 2004).

A temperatura de corte é um dos mais importantes fatores físicos da usinagem de polímeros ópticos, visto que o grau de destruição depende da intensidade da temperatura. Isto é muito importante para materiais poliméricos ópticos, que são sensíveis ao fator térmico, que deve ser amplamente considerado na formação da alta qualidade superficial e para assegurar as propriedades funcionais. A emissão do calor quando o material polimérico é cortado está concentrada na área de deformação plástica e nas áreas de contato entre ferramenta e peça.

Em pesquisas realizadas por Grabchenko et al.(2000), curvas isotermas de um

polímero óptico, a ferramenta de corte e o cavaco são mostradas na Figura 2.15, enquanto os valores numéricos da temperatura, quando da variação da velocidade de corte e material da ferramenta são apresentados na Tabela 7.

Figura 2.15 - Curvas isotermas da usinagem de um polímero.

Fonte: Grabchenko (2000).

Tabela 7 - Valores de temperatura em função da variação da velocidade de corte.

Número da isoterma	Temperatura das isothermas (°C)					
	Ferramenta - H.S.S.			Ferramenta – Diamante		
	vc=10	vc=30	vc=60	vc=10	vc=30	vc=60
1	20	20	20	20	20	20
2	22	27	32	21	23	24
3	25	34	44	23	28	30
4	26	41	56	24	32	37
5	29	48	70	26	38	44
6	32	55	79	30	43	50
7	34	62	91	32	50	58
8	36	69	104	33	50	63
9	38	76	115	35	56	72
10	41	83	127	37	63	79

Fonte: Grabchenko (2000).

O estudo das isothermas obtidas mostra que a alta condutividade de calor da ferramenta de corte em comparação com o polímero usinado, evidencia que é necessário selecionar o material da ferramenta com a máxima condutividade térmica, sendo o diamante o mais indicado. Na Tabela 7, acima pode ser visto que a melhor velocidade de corte efetiva com ferramenta de aço rápido foi de 30 m/min o uso da ferramenta de diamante permitiu o aumento da velocidade de corte para 60 m/min, deixando claro que

mesmo com o aumento da velocidade de corte a temperatura da superfície do polímero permaneceu abaixo de 80 °C, que para este material não deve ser ultrapassado, para evitar a destruição térmica deste, com o aparecimento de micro trincas evitando-se uma considerável redução de suas propriedades (GRABCHENKO et al, 2000).

A rugosidade de um polímero termoplástico com alta temperatura de transição vítrea (T_g) e alta resistência mecânica é geralmente pequena. Uma superfície ótima de um termoplástico pode ser obtida pelo aumento da velocidade de corte, entretanto o efeito da variação da temperatura à alta velocidade de corte pode ser mais significativo do que a variação da tensão (ZHANG e XIAO, 2002).

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Características do material

Os experimentos foram direcionados para determinar a influência dos parâmetros de corte, particularmente a profundidade de corte e avanço, na topografia e superfície final. As características do material são apresentadas abaixo, na usinagem de ultrapecisão do PMMA, cujas propriedades mecânicas são dependentes da temperatura ambiente este material é frágil. As características do material são apresentadas abaixo.

Nome: Polimetilmetacrilato

Abreviação: PMMA

Outra denominação: Plástico acrílico

Denominações comerciais mais comuns: Acrigel, Lucite, Perspex, Plexiglas.

A tabela 8 mostra as propriedades do material.

Tabela 8 - Propriedades do PMMA

PROPRIEDADES	VALORES
Peso Molecular	500.000 - 1.000.000
Densidade (g/cm ³)	1,18
Temperatura de fusão cristalina (°C)	160
Temperatura de fusão vítrea (°C)	105

Fonte: Mano (1991).

A Figura 3.1 apresenta a estrutura molecular do PMMA.

Fig. 3.1 - Estrutura molecular do polimetilmetacrilato.

Fonte: Mano (1991).

3.2 Procedimentos Experimentais

Para realizar as operações de faceamento das amostras, foi usado uma máquina geradora de superfícies anesféricas marca RANK PNEUMO, modelo ASG 2500, equipada com comando numérico computadorizado, marca ALLEN-BRADLEY, modelo CNC 8200 mostrados na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Gerador de superfícies anesféricas RANK PNEUMO ASG 2500 e Controle Numérico ALLEN-BRADLEY CNC 8200.

As amostras de PMMA, com diâmetro de 16 mm e 5 mm de espessura foram previamente usinadas (desbaste) em torno convencional marca Romi, modelo TORMAX 20, com o objetivo de garantir a máxima planicidade entre as faces diminuindo o número de passes na operação final de acabamento, no torno de ultraprecisão.

A operação de desbaste foi complementada com lixamento (lixa de carbetto de silício, grana 1200), em uma superfície totalmente plana (mesa de granito), para retirar as rebarbas e o ponto de centro deixados pela ferramenta.

Devido à necessidade de eliminar-se os riscos decorrentes do lixamento foi feito polimento com com pasta de diamante de 1 μm , em discos de feltro utilizando a politriz marca METASERV. Esta operação também ajudou na detecção de defeitos do material (marcas no interior da peça) observadas no microscópio marca OLIMPUS, modelo BX60M, com aumento de 100 vezes.

Os discos foram montados em um dispositivo de alumínio com quatro cavidades, Figuras 3.3 e 3.4, para que fossem usinados fora de centro, garantindo a ausência de marcas principalmente no centro das amostras, área de suma importância para avaliação da transmitância.

Figura 3.3 - Dispositivo de alumínio para a montagem dos discos de PMMA.

Figura 3.4 - Montagem do dispositivo de alumínio a placa de vácuo.

O dispositivo de alumínio foi fixado à placa do torno através do sistema de vácuo (70 mbar), com atenção quanto a sua estanqueidade, para evitar qualquer dano ao conjunto máquina/ferramenta, bem como garantir precisão no processo de corte. Os cortes foram feitos no sentido radial para o centro da placa, e cada amostra foi faceada em ambos os lados. Este tipo de operação é caracterizado pela profundidade de corte constante.

Como o material empregado nas amostras é de uso comercial acredita-se que esta condição tenha influenciado na qualidade final obtida, devido às tensões internas geradas durante o processo de fabricação das barras, onde primeiramente o material é fundido ou extrudado em células, depois cortado em barras quadradas de 18 x 18 x 1000 mm, para ser usinado entre pontos em torno convencional até o diâmetro de 16 mm, e como operação final é feito o polimento. Nenhum procedimento é realizado para alívio das tensões decorrentes do processo.

O fluido de corte usado foi o ALKALISOL 900, um óleo sintético solúvel em água com função de lubrificar e refrigerar, direcionado em forma de névoa sobre a peça/ferramenta durante a usinagem. A temperatura da sala foi mantida constante em $21 \pm 0,1^\circ\text{C}$.

Nos testes preliminares foi utilizada a ferramenta marca CONTOUR FINE TOOLING, modelo CO 45 NG, com ângulo de saída $\gamma = -5^\circ$ e raio de ponta $R_p = 1.143$ mm. Taxa de avanço de 5,10,15 e 20 $\mu\text{m/rev}$ e profundidade de usinagem de 10 μm foram usados com rotação de 1000 rpm, e teve como objetivo comparar o desempenho entre as ferramentas com ângulo positivo e negativo, em relação à qualidade superficial.

Os discos foram usinados primeiramente com taxa de avanço de 5, 10, 15 e 20 $\mu\text{m/rev}$, profundidade de usinagem de 10 μm e rotação do eixo da árvore de 550 rpm. Na 2ª etapa a taxa de avanço foi mantida constante com 5 $\mu\text{m/rev}$ variando-se a profundidade de usinagem para 4 μm e mantida a rotação em 550 rpm sendo usinadas quatro peças por vez para cada condição de corte. Na segunda fase de testes foi utilizada uma ferramenta de diamante monocristalino, marca CONTOUR FINE TOOLING, modelo CO 60JG, com a seguinte geometria de corte: ângulo de saída $\gamma = 12^\circ$; ângulo de folga $\alpha = 5^\circ$; e raio de ponta $R_p = 1.524$ mm. Na Tabela 9, estão listados as condições de corte e geometrias das ferramentas usadas no torneamento das amostras.

TABELA 9 - Parâmetros usados no torneamento de ultraprecisão do PMMA.

FERRAMENTA	ÂNGULO DE SAÍDA $\gamma (^\circ)$	RAIO DE PONTA DA FERRAMENTA r_p (mm)	ROTAÇÃO DO EIXO ÁRVORE rpm	TAXA DE AVANÇO f ($\mu\text{m/rev}$)	PROFUNDIDADE DE USINAGEM a_p (μm)
CO45NG	-5	1.143	1.000	5, 10, 15 e 20	10
CO60J	+5	1.524	550	5, 10, 15 e 20	4 e 10

Após cada etapa da usinagem as amostras foram lavadas em água corrente com detergente neutro sujeitando-as pelas laterais, para evitar contato com a superfície usinada sendo a secagem feita suavemente com jato de ar.

3.3 Análise das superfícies

Após a usinagem cada amostra foi examinada no microcópio marca UNION, modelo EXAMET, para verificar se as faces foram totalmente usinadas, e posteriormente analisadas no espectômetro, entre 300 e 1100 nm, usando o programa Fast Espectômetro Ocean Optics. Neste espectômetro as amostras são posicionadas em um dispositivo prismático em forma de “V”, e a luz direcionada da esquerda para direita passa através dos discos. Este equipamento está instalado no Instituto de Física de São Carlos.

A morfologia dos cavacos e topografia das superfícies usinadas, foram avaliadas pela técnica MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), no microscópio marca LEO, modelo LEO 440 operando a 20 kW. As amostras foram metalizadas e analisadas na metalizadora marca BAL-TEC, modelo MED 020, pertencentes ao Instituto de Química de São Carlos.

A perfilometria mecânica das superfícies foi realizada no Laboratório de Precisão da Escola de Engenharia de São Carlos usando um perfilômetro marca TAYLOR-HOBSON, modelo FORM TALYSURF 120L, Figura 3.5, com ponta de diamante à 90°, “cut-off” de 0,08 mm e raio de ponta de 2,0 μm , e resolução de 4 nm. Foi feita após os exames ópticos, para que os danos causados na superfície da peça pela ponta de diamante que é pressionada sobre a peça, não influenciasse nos resultados.

Figura 3.5 - Perfilômetro FORM TALYSURF 120L.

A perfilometria óptica usada para a caracterização das superfícies, foi realizada no perfilômetro marca TAYLOR HOBSON, modelo FORM TALYSURF CCI 3000, mostrado na figura 3.6. Este instrumento faz medições tridimensionais sem contato e não destrutivo, com a peça. Permite medições de superfícies com variação de pico a vale entre 1 nm e 100 μm de altura, com a resolução de 0,01 nm.

Figura 3.6 - Perfilômetro FORM TALYSURF CCI 3000.

Os parâmetros para avaliação da rugosidade disponíveis no instrumento e adotados neste trabalho foram (CARPINETTI et al, 2000):

a) Rugosidade Média (Ra). É definida como a amplitude média do perfil em relação a linha de interferência, sobre um comprimento do perfil correspondente a cada comprimento amostral considerado. Matematicamente é expressa pela eq. (10).

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

onde,

y = pontos discretos ao longo do perfil

n = número de pontos considerados

O valor de Ra, não faz distinção entre os picos e vales, sendo esta informação muito importante em aplicações como superfícies de deslizamento.

b) Alturas de Picos e Vales (Rt,Rz). Em determinadas condições, torna-se necessário especificar a altura máxima da irregularidade (pico-a-vale), ao invés de ter-se a altura média fornecida por Ra ou Rq. O parâmetro mais usado é o Rt (Rauhtief = profundidade em alemão), que é a distância vertical entre os pontos mais altos e mais baixos dentro do comprimento de medição. Este valor pode ser alterado devido a presença de riscos ou partículas de sujeira sobre a superfície medida.

O parâmetro Rz corresponde a média dos cinco maiores picos e cinco maiores vales ao longo do comprimento de medição e é expresso pela eq. (11)

$$Rz = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_5 + V_1 + V_2 + \dots + V_5}{10} \quad (11)$$

onde,

P = valor do pico

V = valor do vale

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Considerações Gerais

A demanda por processos de fabricação adequados à confecção de produtos a partir de materiais poliméricos, com mínima introdução de defeitos aponta para a necessidade de ampliação do conhecimento dos mecanismos envolvidos na interação mecânica ferramenta/material.

Os processos de usinagem de ultraprecisão aplicados à fabricação de componentes com qualidade óptica em materiais poliméricos podem ser considerados críticos quando a temperatura de corte excede os valores da temperatura de transição vítrea (T_g). No caso dos polímeros ópticos esta temperatura é da ordem de 105°C para o caso particular do PMMA. Quando esta temperatura é excedida danos podem ser observados nas camadas mais externas. Estas alterações, embora muitas vezes confinadas a uma camada superficial muito delgada podem limitar a qualidade do componente e, em alguns casos, reduzir o desempenho da superfície.

Exigências relacionadas com qualidade superficial (por exemplo, rugosidade e microtrincas) variam com a aplicação individual da superfície. Assim, a natureza e extensão dessas alterações são fortemente dependentes não somente do processo usado, mas também do material da peça.

A compreensão dos mecanismos básicos que causam essas alterações superficiais, decorrentes da interação ferramenta/peça, torna-se essencial para que se possa atingir uma melhoria no produto. Para essa finalidade torna-se essencial não só caracterizar a integridade da superfície, mas também qualificar os tipos de danos e os efeitos no desempenho óptico.

Na usinagem de polímeros ópticos observou-se que a remoção de material pode afetar diretamente a qualidade da superfície. Deve-se ressaltar que os polímeros ópticos, apesar de apresentarem baixa dureza e, portanto gerarem cavacos contínuos no regime dúctil, a superfície não responde da mesma maneira, mas com característica de regime frágil.

Técnicas como perfilometria óptica e mecânica, e microscopia serão usadas para avaliação do estado final da superfície usinada. A espectrofotometria foi aplicada para análise da transmitância do componente usinado visando obter um parâmetro para avaliar a influência das condições de corte e geometria sobre o desempenho do componente.

Em todas as etapas dos testes, quatro amostras foram usinadas ao mesmo tempo, em ambas as faces, sendo os valores das rugosidades obtidos através da média de quatro medições repetidas de uma mesma amostra e direção, perfazendo um total de desesseis medições para cada condição de usinagem. As medições da perfilometria foram realizadas nas mesmas faces em que foram feitas as medidas de transmitância.

4.2 Influência da Taxa de Avanço (f) no Acabamento Superficial

A Figura 4.1a apresenta imagens feitas através de perfilometria óptica de uma superfície de PMMA polida com pasta de diamante antes da usinagem de ultraprecisão, com tamanho médio de grãos de 1 μm . A imagem mostra um mapeamento topográfico da superfície delimitado por padrões de cores. A Figura 4.1b mostra o perfil linear da superfície. Pode-se observar que os riscos randomicamente orientados decorrentes do processo de polimento (Figura 4.1b) atingem valores da ordem de pouco mais de 50 nanômetros. Os valores de rugosidade refletem muito bem essas pequenas irregularidades na superfície, no qual o valor de R_t estimado foi de 51,6 nm e R_a foi de 4,67 nm.

O perfilômetro óptico usado nos ensaios apresenta parâmetros de rugosidade estimados para a área avaliada, denominados pela letra S (do inglês “surface”). No caso dessa amostra o valor de S_t foi de 183 nanômetros e o de S_a de 8,05 nanômetros. Esse parâmetro demonstra que quaisquer irregularidades geradas na superfície são facilmente detectadas e se refletem nos valores de rugosidade geral da superfície.

Figura 4.1 – a) imagen feita no Talysurf CCI 3000, através de perfilometria óptica, da superfície polida com pasta de diamante. b) riscos deixados pelo processo atingem profundidades de até 50 nanômetros.

A partir de amostras polidas realizaram-se os ensaios de torneamento das peças. O polimento foi necessário para se garantir que a altura das amostras nos suportes fosse a mais similar possível, pois a profundidade de usinagem que se aplicaria seria de 0,10 μm. O principal objetivo desses ensaios foi obter um panorama realista da capacidade do processo de torneamento com ferramenta de diamante em dar acabamento em amostras de PMMA. Com isso pode-se prever o limite do processo em termos de rugosidade. Sabe-se que o valor da rugosidade para usinagem de materiais como cobre eletrolítico e ligas de alumínio, o valor da rugosidade R_a é geralmente inferior a 10 nm!

As Figuras 4.2a e 4.2b apresentam os resultados da rugosidade em função da taxa

de avanço (f). A ferramenta CO 45NG, usada na primeira etapa de testes, tem ângulo de saída levemente negativo ($\gamma = -5^\circ$). Os resultados da rugosidade R_a e R_t em função da taxa de avanço, mostraram que houve aumento da rugosidade como previsto pelas eqs. (12) e (13).

$$R_t = f^2/8.r_p \quad (12)$$

$$R_a = 0,0321.f^2/r_p, \quad (13)$$

onde:

R_t = máxima altura pico-a-vale individual (μ)

R_a = rugosidade média (μ)

f = taxa de avanço ($\mu\text{m}/\text{rev}$)

r_p = raio de ponta da ferramenta (mm)

(a)

(b)

Figura 4.2a Variação da rugosidade R_a em função da taxa de avanço, medida no Taly-surf 120L, rotação = 1000 rpm, $a_p = 10 \mu\text{m}$. Ferramenta CO 45 NG, com $\gamma = -5^\circ$. **4.2b** Variação da rugosidade R_t em função da taxa de avanço, medida no Talysurf 120L, rotação = 1000 rpm, $a_p = 10 \mu\text{m}$. Ferramenta CO 45NG com $\gamma = -5^\circ$.

As imagens feitas no Talysurf CCI 3000, mostram na Figura 4.3a, o perfil da rugosidade para taxa de avanço de $15 \mu\text{m}/\text{rev}$, onde pode ser observada uma forte presença de picos que fazem com que a rugosidade se eleve bastante. Na Figura 4.3 b no espectro da superfície em questão se observa que não há variações de ondulação desta, devido ao grau de repetibilidade e precisão da usinagem com ferramenta de diamante.

(a)

(b)

Figura 4.3 a) - Perfil linear da rugosidade da superfície mostrando picos agudos ao longo do comprimento de avaliação. b) - Espectro da superfície usinada pela ferramenta CO 45NG com $\gamma = -5^\circ$, $f = 15 \mu\text{m}/\text{rev}$, $ap = 10 \mu\text{m}$, rotação = 1000 rpm. Ambos obtidos por meio do Talysurf CCI 3000.

As Figuras 4.4 a, 4.4 b e 4.4 c mostram imagens feitas através de microscopia óptica com ampliação de 200x. Nas imagens não é possível observar qualquer dano causado pela ferramenta/condições de corte.

Figura 4.4 - Imagens feitas através de microscopia óptica das amostras torneadas; a) $f = 10 \mu\text{m/rev}$, b) $f = 15 \mu\text{m/rev}$, c) $f = 20 \mu\text{m/rev}$, rotação = 1000 rpm, usinadas com ferramenta CO 45NG com $\gamma = -5^\circ$. Ampliação 200x.

4.2.1 Mecanismos de Remoção de Material e Geração da Superfície

Os resultados de acabamento apresentados demonstram que é possível obter su-

perfícies com acabamento superficial bastante superior. No entanto, no caso dos polímeros pode-se afirmar que o regime de remoção de material apresenta alguns aspectos interessantes e que valem a pena serem explorados nesse trabalho.

Pela experiência com usinagem de metais é possível afirmar que se pode prever resultados excepcionais a partir do tipo de cavaco removido. Por exemplo, cavacos contínuos têm relação direta com a obtenção de acabamento superficial de boa qualidade (JASINEVICIUS, 1998)

A figura 4.5 apresenta uma fotomicrografia feita através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de cavacos removidos com avanço de $10\text{ }\mu\text{m/rev}$ e $a_p = 10\text{ }\mu\text{m}$. A imagem mostra dois aspectos importantes: primeiro o cavaco é contínuo e o segundo que mesmo sendo muito delgado ele mantém sua integridade.

Figura 4.5 - Fotomicrografia de cavacos de PMMA feita através de Microscopia Eletrônica de Varredura. $f = 10\text{ }\mu\text{m/rev}$, $a_p = 10\text{ }\mu\text{m}$, rotação = 1000 rpm. Ferramenta CO 45NG com $\gamma = -5^\circ$. Ampliação 100x.

A superfície referente a esse cavaco foi apresentada na Figura 4.4 a e mostra que a superfície não apresenta danos aparentes. No entanto quando se faz uma avaliação

mais precisa da superfície através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) observa-se que a ductilidade obtida na remoção de material não se reflete de forma semelhante para a geração da superfície. A Figura 4.6 a e b apresentam duas imagens de superfícies geradas com ampliações diferentes, 1000 e 3000x, respectivamente. Observa-se que há presença de pequenas trincas na superfície previstas pelo modelo proposto por Carr e Feger (1993) apresentado na Figura 2.14. Nesse modelo, os autores mostram que ferramentas com ângulo de saída negativo tendem a gerar pequenos danos na superfície como microtrincas durante a passagem da ferramenta. Deve-se ressaltar que o PMMA não pode ser comparado com metais, pois sua estrutura é amorfa. Em função disso o estado de tensão gerado pelo corte na superfície tende a formar esses pequenos danos.

Figura 4.6. Fotomicrografia feita através de MEV da superfície de PMMA torneada com ferramenta CO 45NG com $\gamma = -5^\circ$, $f = 10 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$, rotação = 1000 rpm. a) Ampliação 1000x. b) Ampliação 3000x.

Assim, chega-se a um contraponto interessante: de um lado a remoção de cavaco ocorre no regime dúctil e por outro a geração da superfície ocorre com mecanismos dúctil

e frágil simultaneamente. Deve-se, no entanto ressaltar que o aparecimento dessas trincas ocorre não necessariamente devido a fragilidade do material como no caso de materiais frágeis, mas a um processo complexo envolvendo temperatura, condições de corte e geometria.

Como visto anteriormente esses danos podem ser atenuados quando se usa ferramentas com geometrias com ângulos de saída positivo e neutro. Esses danos também afetam o desempenho das superfícies usinadas comprometendo.

A seguir serão apresentados resultados onde se aplicou ferramentas com ângulo de saída positivo e será investigada a relação entre o regime de remoção, integridade da superfície e transmitância, para se saber de forma efetiva o efeito dos danos no desempenho do componente de PMMA torneado com ferramenta de diamante.

Nas Figuras 4.7a e 4.7b são apresentados os resultados da rugosidade R_a e, R_t , medida através de perfilometria mecânica no FORM TALYSURF 120L, feita entre a média de todas as amostras usinadas na segunda etapa de testes com a ferramenta CO 60JG com ângulo de saída $\gamma = 5^\circ$.

Figura 4.7 a) - Variação da rugosidade R_a , em função da taxa de avanço, entre a média das amostras, medida no Taysurf 120L, rotação = 550 rpm, $a_p = 10 \mu\text{m}$. Ferramenta CO 60JG com $\gamma = 5^\circ$.

Figura 4.7 b) - Variação da rugosidade R_t , em função da taxa de avanço, entre a média das amostras, medida no Taylsurf 120L, rotação = 550 rpm, $a_p = 10 \mu\text{m}$. Ferramenta CO 60JG com $\gamma = 5^\circ$.

Ficou evidenciado que com uso da ferramenta com $\gamma = 5^\circ$, os melhores resultados foram obtidos com taxa de avanço de $10 \mu\text{m/rev}$ e profundidade de usinagem de $10 \mu\text{m}$, conseguimos os menores valores de rugosidade entre as quatro amostras, com $R_a = 33,2 \text{ nm}$ ($\pm 2 \text{ nm}$) e $R_t = 329,0 \text{ nm}$ ($\pm 14 \text{ nm}$). Teoricamente a rugosidade de uma superfície tende a diminuir quando o avanço também diminui, e segundo Xiao e Zhang (2002) isto é função da espessura da camada de material removido diminuir em cada revolução.

O gráfico da Figura 4.8 apresenta a comparação dos valores da rugosidade R_a em função do avanço, obtidos usando ferramentas com ângulos de saída diferentes. Os valores de R_a mostram uma tendência de aumento gradativo para a ferramenta com ângulo de saída negativo ($\gamma = -5^\circ$) chegando ao máximo de $64,5 \text{ nm}$ para o avanço de $20 \mu\text{m/rev}$. Comparativamente, os valores de R_a para a ferramenta com ângulo de saída positivo são menores para as taxas de avanços de $5, 10$ e $20 \mu\text{m/rev}$, tendo um ligeiro aumento com a taxa de avanço de $15 \mu\text{m/rev}$ que pode ser decorrente da passagem da ferramenta por uma

zona de instabilidade do material.

Essa diferença entre os valores de rugosidade também pode estar relacionada com a geometria do raio de ponta da ferramenta. No caso da ferramenta com ângulo de -5° o raio de ponta é de 1,143mm e da ferramenta com ângulo de 5° este valor é de 1,524 mm. Fazendo-se analogia a equação 14, verifica-se coerência nas curvas do gráfico.

Figura 4.8 - Variação da rugosidade Ra, em função da taxa de avanço, medida no Taylsurf 120L, rotação = 550 rpm, $a_p = 10 \mu\text{m}$. Ferramenta CO 60JG com $\gamma = 5^\circ$ e Ferramenta CO 45NG com $\gamma = -5^\circ$.

De acordo com o modelo proposto por Carr e Feger (1993) mostrado na Figura 2.14, o uso de ângulo de saída levemente positivo tende a formar pequenos sulcos que se expandem no plano de corte após a passagem da ferramenta aumentando a rugosidade.

A Figura 4.9 apresenta a morfologia da superfície da amostra 2D, usinada com ferramenta com ângulo de saída $\gamma = 5^\circ$ obtida pelo MEV. Observa-se que a imagem da superfície gerada está caracterizada pelas marcas da taxa de avanço uniforme da ferramenta e acredita-se que a presença de microtrincas e sulcos micrométricos possam ter influenciado na integridade superficial em relação à qualidade óptica esperada.

Figura 4.9 - Micrografia feita através de MEV da amostra 2D, usinada com $f = 10 \mu\text{m}/\text{rev}$; $a_p = 10 \mu\text{m}$; rotação = 550 rpm. Ferramenta 60 COJG com $\gamma = 5^\circ$ Ampliação de 5.000x.

A superfície mostrada na Figura 4.9 pode ser comparada com os resultados obtidos por Smith (1989), na usinagem do PMMA com ferramenta de diamante em um torno gerador de superfícies anesféricas mod. Pneumo ASG 2500, que considerou a formação

dos sulcos (ploughing) e microtrincas como sendo decorrentes da instabilidade do fluxo viscoelástico, presente nos polímeros, em função do aumento de temperatura decorrente da tensão aplicada.

A instabilidade do fluxo viscoelástico deve ser considerada na análise desta superfície, pois o efeito das propriedades do material quando estão sob a ação de cisalhamento, de acordo com Xiao e Zhang (2002) provoca a formação de bandas de cisalhamento, fenômeno este característico na usinagem de polímeros. O escoamento por bandas de cisalhamento é decorrente dos efeitos do amolecimento do material sob tensão, e são provenientes de pequenas heterogeneidades de deformação devido a imperfeições internas ou concentração de tensões (CANEVAROLO, 2002).

Como foram usadas profundidades de usinagem e taxas de avanços muito pequenos supõe-se que estas condições também possam ter ocasionado um mecanismo de remoção denominado ploughing (sulcamento). Nesse mecanismo o material é plasticamente empurrado para os lados quando solicitado podendo ser feita analogia com a remoção realizada em metais, que de acordo com Jasinevicius (1998) resume-se a pequenas rebarbas que são escoadas lateralmente ou simplesmente compactadas (esse mecanismo pode ter sido responsável pelos picos apresentados pelo perfil mostrado na Figura 4.3a.

O mecanismo de formação do cavaco é de fundamental importância, pois mostra as propriedades do material com relação à integridade superficial, usinabilidade e características de usinagem.

A Figura 4.10a mostra o cavaco contínuo em forma de fita formado predominantemente no cisalhamento. Devido à espessura de corte ser muito delgada é possível observar através dele sendo por isso chamado de transeletrônico (JASINEVICIUS et al, 2004).

Na Figura 4.10b é possível observar os segmentos em forma de lamelas justapostas formadas na parte superior do cavaco, com tamanhos equivalentes visto que não houve aumento da espessura de corte. Note-se o grau de adesão e uniformidade das lamelas causadas pela deformação plástica do material indicando a grande precisão e reprodutibilidade na usinagem com ferramenta de diamante.

A figura 4.10c identifica a superfície inferior na qual o cavaco faz contato com a ferramenta, e onde se observa uma intensa deformação plástica imposta pela ferramenta devido à força de cisalhamento exceder a tensão de escoamento do material.

Em função da deformação plástica ocorrer no plano de cisalhamento na direção do movimento da ferramenta, o cavaco consequentemente tende a curvar-se no sentido anti-horário.

A lateral do cavaco mostrada na Figura 4.10d apresenta uma parte mais delgada, onde as lamelas são menores e mais finas e estão dispostas ordenadamente.

Para as demais condições de corte com a ferramenta CO 60JG, os resultados obtidos foram praticamente idênticos, ou seja, cavacos contínuos com formato de fita formados por cisalhamento.

Rubenstein e Storie (1969) observaram que durante o estágio de formação do cavaco de um polímero ocorre o empilhamento do material “pile up” à frente da ferramenta e neste momento não existe movimento do cavaco em relação à face de saída da ferramenta. Isto persiste até que um comprimento suficiente de contato entre cavaco e ferramenta seja estabelecido iniciando então o movimento do material sobre a face de saída onde o ciclo é repetido várias vezes. Cada um desses empilhamentos “pile up” é caracterizado pela produção de um segmento chamado lamela. O fator que determina a forma do cavaco é o grau de adesão entre as lamelas. As dimensões destas lamelas podem

variar com a profundidade de corte.

Os cavacos formados durante os testes, com as diversas condições de corte foram do tipo contínuo, que de acordo com a literatura (CARR e FEGER, 1993), quando são produzidos indicam uma remoção relativamente fácil do material. Segundo Saito (1981), este tipo de cavaco é produzido no plano de cisalhamento gerado acima da ponta da ferramenta, e é constituído de pequenas lamelas justapostas significando que a deformação plástica ocorreu predominantemente.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 4.10 - Análise do cavaco feita através de MEV usinado com $f = 10 \mu\text{m}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$; rotação = 1000 rpm, $\gamma = 5^\circ$. a) Cavaco em forma de fita. Ampliação de 100x; b) Estrutura lamelar na parte superior do cavaco. Ampliação de 5.000x; c) Parte inferior do cavaco que faz contato com a superfície de saída da ferramenta. Ampliação de 1.000x; d) Lateral do cavaco. Ampliação de 3.000x.

4.3 Influência da Profundidade de Usinagem (a_p) no Acabamento superficial

Em pesquisas realizadas por Kobayashi (1967), Roy e Basu (1977), na usinagem de polímeros termoplásticos, os autores constataram que a profundidade de usinagem não exerce influência significativa na rugosidade obtida.

Jasinevicius et al.(2004), considera que a profundidade de usinagem influi apenas no aumento da largura de corte do material, somente se a taxa de avanço permanecer constante. Por outro lado, o aumento da taxa de avanço resultará somente no aumento da espessura do cavaco e rugosidade, conforme mostrado na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Relação entre taxa de avanço e profundidade de usinagem

Fonte: Jasinevicius et al (2004)

Na Figura 4.12 o gráfico com valores experimentais relativos as amostras usinadas com $f = 5 \mu\text{m}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$ e $4 \mu\text{m}$ respectivamente mostra que a rugosidade não sofreu influência, com a variação da profundidade da usinagem. O valor médio da rugosidade entre as amostras usinadas com $a_p = 10 \mu\text{m}$ foi de $35.4 \text{ nm} (\pm 2,04 \text{ nm})$ e para amostras com $a_p = 4 \mu\text{m}$, a média foi de $47,1 \text{ nm} (\pm 1,89 \text{ nm})$.

Obteve-se um desvio padrão de ± 0.7 nm entre a média das profundidades de usinagem $a_p = 4 \mu\text{m}$ e $10 \mu\text{m}$, que pode ser considerado desprezível nos resultados da rugosidade, pois está bem abaixo da ordem de grandeza de resolução do instrumento de medição utilizado na determinação da rugosidade. Considera-se que a condição em que $a_p = 10 \mu\text{m}$ ser a espessura efetiva de corte, na qual foi obtida a melhor resolução no acabamento superficial.

Figura 4.12 - Influência da profundidade de corte na rugosidade superficial Ra de amostras usinadas com $a_p = 10 \mu\text{m}$ e $4 \mu\text{m}$, rotação = 550 rpm com os respectivos desvios padrões. medida no Taylsurf 120L. Ferramenta 60COJG com $\gamma = 5^\circ$

Pode-se verificar na Figura 4.13, que a topografia das superfícies usinadas com $a_p = 10 \mu\text{m}$ e $a_p = 4 \mu\text{m}$, com taxa de avanço de $5 \mu\text{m/rev}$ apresentam as marcas da ferramenta caracterizando uma uniformidade na planicidade. A similaridade entre as superfícies usinadas obtidas em todas as condições de corte, mostra um processo em regime dúctil e reflete que a profundidade de corte não exerceu influência significativa no acabamento superficial. Acrescenta-se que a morfologia do cavaco gerado foi semelhante, todos contínuos em forma de fita, nas diversas condições de corte testadas.

Figura 4.13 - Micrografia feita através de MEV comparativa entre as amostras usinadas com: a) $ap = 10 \mu\text{m}$ e b) com $ap = 4 \mu\text{m}$, $f = 5 \mu\text{m/rev}$, rotação = 550 rpm. Ferramenta CO 60J com $\gamma = 5^\circ$. Ampliação 1000x.

4.5 Análise das Superfícies Geradas em Relação à Transmissão Óptica

A qualidade final da superfície exigida para componentes ópticos poliméricos termoplásticos usinados com ferramenta de diamante, de acordo com Tolley (2005) é da ordem de 0,1 nm. Para tanto a integridade da superfície obtida deve permitir que as propriedades ópticas sejam alcançadas de acordo com parâmetros pré-estabelecidos.

No presente trabalho a transmitância é a propriedade óptica com maior relevância, pois define o grau de qualidade óptica de uma lente, com relação ao comprimento de onda. No PMMA, ela é equivalente a maioria dos vidros ópticos ao longo do espectro visível. O objetivo deste trabalho foi estabelecer parâmetros que permitam ao mesmo tempo verificar a qualidade do material usinado e também fornecerem dados que sirvam

de referência para futuros trabalhos que abordem o torneamento com ferramenta de diamante do polimetilmetacrilato, para fins ópticos.

As amostras foram analisadas através de um espectrofotômetro, e as curvas de transmitância obtidas para cada condição de corte podem ser observadas na Figura 4.14.

Figura 4.14 - Curvas de transmitância obtidas da média das amostras com relação as condições de corte. a) $f = 5$; b) $f = 10$; c) $f = 15$; d) $f = 20 \mu\text{m/rev}$ com $a_p = 10 \mu\text{m}$; e) $f = 5 \mu\text{m/rev}$ com $a_p = 4 \mu\text{m}$. Ferramenta CO 60J com $\gamma = 5^\circ$.

No gráfico a) é possível observar o padrão de regularidade entre todas as amostras do conjunto 1 que embora possuam índices de transmitância diferentes, os valores das curvas permaneceram praticamente constantes em relação aos comprimentos de onda. Isto pode ser decorrente da passagem da luz em uma região com baixo índice de danos superficiais, e conseqüentemente houve a redução do espalhamento luminoso.

Embora o melhor índice de rugosidade tenha sido obtido com as amostras usinadas com $f = 10 \mu\text{m/rev}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$, representadas pela Figura b), o maior valor da transmitância medido foi de 86,5 por cento, relativo a amostra 2B. Este valor pode ser considerado baixo em relação ao valor de 90,3 por cento obtido na curva da Figura a), usinado com $f = 5 \mu\text{m/rev}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$ referente a amostra 1A, com as mesmas condições de corte onde obteve-se um índice de rugosidade maior.

Note-se que o valor do desvio padrão nas medições feitas na amostra 1A relativa ao gráfico a), em relação a R_a onde se obteve a melhor transmitância é aproximadamente 10 vezes maior do que na amostra 2B do gráfico b), que apresentou melhor rugosidade, embora isto não tenha se refletido na medida da transmitância, como pode ser visto na Tabela 10.

Tabela 10. Valores de rugosidade e transmitância das amostras 1A e 2B.

Amostra	R_a (nm)	Desvio (nm)	Transmitância (%)
1A	45,6	$\pm 6,64$	90,3
2B	33,2	$\pm 0,69$	86,5

O valor encontrado na literatura para a transmitância do PMMA, com uma espessura de 3,17 mm é de 92 por cento. Entretanto existe uma pequena diferença em relação

aos valores obtidos nos testes, pois a espessura das amostras utilizadas foi de 5mm, e acredita-se que esta diferença também possa ter influenciado na medida da transmitância obtida.

Um dos fatores que também pode ter exercido influência na qualidade superficial obtida e refletido nos valores de transmitância é a temperatura de transição vítrea (T_g), pois segundo Smith (1989), se a temperatura na zona de corte for inferior a T_g , será caracterizado regime frágil com superfícies de qualidade inferior. Abaixo da T_g , a configuração molecular está inerte e a fratura frágil ocorre com propagação da trinca. O PMMA é considerado um polímero frágil (amorfo) à temperatura ambiente, devido a alta densidade das suas cadeias de ligação, por este motivo freqüentemente a fissura e escoamento antecedem a fratura.

Outro parâmetro que contribuiu decisivamente para os valores altos de rugosidade, e conseqüentemente influenciado na transmitância, foi a qualidade do material empregado, que apresentou marcas ao longo do centro dos discos, provavelmente originadas durante o processo de fabricação das barras. Estas irregularidades ocorrem devido a tensões internas, e é uma característica de muitos materiais poliméricos, quando submetidos a forças externas como tração ou compressão como podem ser vistas na Figura 4.15.

Figura 4.15 - Irregularidades na parte interna da amostra de PMMA polida. Ampliação de 200x.

Autores como Kobayashi (1984) e Lavrynenko (1999) consideram que as propriedades físicas e químicas de um material polimérico para fins ópticos exercem grande influência na qualidade final, e que estas devem ser rigorosamente controladas. A estrutura química tem ação direta no processo de fratura durante o corte, pois ativam o início de propagação de trincas. O modo e condições de como o processo de polimerização são conduzidos (temperatura e resfriamento) afetam na formação da estrutura e orientação das macromoléculas, influenciando na formação da massa molecular, que de acordo com pesquisas conduzidas por Lavrynenko (1999), o aumento da rugosidade superficial é diretamente proporcional ao aumento da massa molecular.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou a viabilidade do processo de usinagem do PMMA, para fins ópticos com ferramenta de diamante salientando-se que a melhora na integridade superficial e como consequência a transmitância podem ser conseguidas com novas pesquisas relacionadas a qualidade do material empregado, condições de corte e geometria da ferramenta.

Observou-se em todas as condições de usinagem a presença de microtrincas e sulcos na superfície final, as quais podem ser atribuídos ao fenômeno da instabilidade do fluxo viscoelástico que provoca escoamento por bandas de cisalhamento, característico em materiais poliméricos, quando este são submetidos a tensões e/ou deformações.

Como esperado, a variação da profundidade de usinagem, não apresentou influência significativa no acabamento final, em função das condições de corte envolvidas no processo, conforme resultados de estudos apresentados na literatura. A variação do valor da rugosidade, de $\pm 0,7$ nm entre as médias das amostras testadas pode ser considerada desprezível.

Sabe-se que rugosidade aumenta com o aumento da taxa de avanço (f). Esta tendência foi constatada com uma variação significativa, quando foi usada a taxa de avanço de $f = 15 \mu\text{m/rev}$, com ferramenta com ângulo de saída $\gamma = 5^\circ$ nos testes realizados com o uso da taxa de avanço $f = 5 \mu\text{m/rev}$, também houve um ligeiro aumento da rugosi-

dade, em relação à condição de corte com $f = 10 \mu\text{m / rev}$.

Com o uso de ferramenta com ângulo de saída ligeiramente positivo ($\gamma = 5^\circ$) obteve-se os melhores índices de rugosidade R_a usando as mesmas condições de corte em relação a ferramenta com ângulo negativo ($\gamma = -5^\circ$), conforme gráfico apresentado na Figura 4.2.

Pela análise dos cavacos gerados em todas as condições de corte, do tipo contínuo e estrutura lamelar compacta verificou-se que o processo foi realizado no regime dúctil predominantemente, acima da T_g do material. Considera-se ser este o regime mais favorável para a usinagem de materiais poliméricos, e em particular o PMMA.

Em função do material testado apresentar irregularidades, oriundas do processo de fabricação, com geração de tensões internas, o valor da transmitância requerido foi comprometido devido à superfície final obtida apresentar micro irregularidades impróprias para esta avaliação. Ressalte-se a mínima influência do sistema máquina-ferramenta nos resultados finais.

Capítulo 6

TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para o desenvolvimento de novas pesquisas relacionados com este trabalho é proposto:

- Estudo das condições de usinagem, com variação da rotação (rpm), para avaliação da influência da velocidade e força de corte.
- Estudo comparativo entre o PC e PMMA para avaliação da integridade superficial com relação a geometria da ferramenta e parâmetros de corte.
- Usinagem sem meio refrigerante para avaliação da influência da temperatura de corte na integridade superficial.
- Emprego do material (PMMA) com melhor qualidade e específico para aplicações ópticas visando melhoria no valor da transmitância.
- Avaliação do desgaste da ferramenta.

REFERÊNCIAS

ALAUDDIN, M.; CHOUDHURY, I. A.; EL BARADIE, M.A.; HASHMI, M.S.J. (1995).
Plastics and their machining: a review. *Journal of Materials Processing Technology*, v.54,
p.40-46.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. (1995). ASTM D 542. Standard
Test Method for Index of Refraction of Transparent Organic Plastics. Philadelphia.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (1997). ASTM D 1746.
Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics.
Philadelphia.

AVILA, M.; MISRA, D.; SHEFELBINE, W.; O'REILLY, E. (2003). Surface quality in
Machining Foldable Acrylic-based Intra-Ocular Lenses. Dept. Mechanical Engineering.
University of California. Berkeley. California.

BAL-TEC AG (1996). Catálogo técnico sobre metalurgia de superficies.

BAUER, T.; MÜLLER, W.; PETZOLD, S. (2000). Optik aus Kunststoff-Möglichkeiten und
Grenzen. *Jarrbuch für Optic und Feinmechanik*. Berlin: Verlag Schiele & Schön, p.40-
44.

BJERKE, T.; LAMBRO, J. (2002). Heating During Shearing and Opening Dominated Dynamic Fracture of Polymers. *Experimental Mechanics*, v.42, n.1, p.107-114.

BORRELY, J.H. (2002). Estudo comparativo da degradação do poliestireno e poliestileno de alto impacto por envelhecimento natural e artificial. 108 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

BREHM, P.D. (1976). Diamond machining of metal & plastic optics. *SPIE- Advances in Precision Machining of Optics*, v.93, p.124-127

BRISTON, J.H.; MILES, D.C. (1975). *Tecnologia dos Polímeros*. São Paulo: Polígono .

CALLISTER, W.D. (1997). *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 4rd Edition. New York: John Wiley & Sons.

CANEVAROLO Jr, S.V. (2002). *Ciência dos polímeros*. São Paulo: Artliber Editora.

CARPINETTI, L.A.; GONSALVES FILHO, E.V.; PORTO, A.J.V.; JASINEVICIUS, R.G. (2000). *Rugosidade Superficial – Conceitos e Princípios de Medição*. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

CARR, J.W.; FEGER, C. (1993). Ultraprecision machining of polymers. *Precision Engineering*, v.4, p.221-235.

CHOI, I.; KIM, J. (1999) Development of monitoring system on the diamond tool wear. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.39, n.3, p.505-515.

COX, A.; van HULST, F. (2005). A Closer Look to Diamond Tools. Contour Fine Tooling. Disponível em < http://homepages.nildram.co.uk/~contour/glab_con.htm >. Acesso em 13.jan.2005.

DAVIES, M.A.; EVANS, C.J.; PATTERSON, S.R.; VOHRA, R.; BERGNER, B.C. (2003). Application of precision diamond machining to the manufacture of micro-photonics components. Proc. of SPIE, v.5183, p.94-108.

DUDUCH, J.G.; PORTO, A.J.V.; JASINEVICIUS, R.G.; RUBIO, J.C.C.; MONTANARI, L. (2004). Projeto de Máquinas – Ferramenta. In: PORTO.A.J.V. (Org.). Usinagem de Ultraprecisão. São Carlos: RiMa. Cap 10, p. 177-211.

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

FRIEDRICH, C. (1998). Precision Micromanufacturing Process Applied to Miniaturization Technologies. Departament of mechanical Engineering. Michigan Technological University. Michigam.

GEBHARDT, A.; SEINKOPF, R. (2003). Diamond turning of micro-optical surfaces. Fraunhofer IOF Annual Report, p. 20-25.

GRABCHENKO, A.I.; VEREZUB, N.V.; LAVRYNENKO, S.N.; HORVATH, M.; MAMALIS, A.G. (2000). Precision cutting of optical polymer components for bioengineering applications. *Journal of Materials Processing Technology*, v.97, p.126-131.

GRABCHENKO, A.I.; VEREZUB, N.V.; FEREROV, A.M.; GETMANOV, A.A.; HORVATH, M.; MAMALIS, A.G. (2001). Precision Machining of Optical Products Made from Polymeric Materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.17, p. 93-103.

GRIFFITH, A.A. (1921). The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of The Royal Society of London. Serie A* 221, p. 163-198. Proc. of 4th European International Conference, Glasgow, Scotland, p.97-98.

GUBBELS, G.P.H.; DELBRESSINE, F.L.M.; GOVAERT, L.E.; SCHELLEKENS, P.H.J. (2004). Precision cutting of glassy polymers: influence of aging on the cutting process. *Proceedings of SPIE*, v.5252, p. 111-121.

GUBBELS, G.P.H.; van der BEEK, G.J.F.T.; HOEP, A.L.; DELBRESSINE, F.L.M.; van HALEWYN, H. (2004). Diamond Tool Wear when Cutting Amorphous Polymers. *Annals of the CIRP*, v.53, n.1, p. 447-450.

HENRY, S.W. (2002). Instrumentation for Tool Wear Evaluation. M.S. Thesis. College of Engineering. The Pennsylvania State University, Pennsylvania. 2002.

HOCHENG, H.; HSICH, M.L.; (2004). Signal analysis of surface roughness in diamond turning of lens molds. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.44, p. 1607-1618.

INDUSTRIAS ROMI S.A. (2002). *Literatura técnica sobre torno universal modelo TOR-MAX 20*.

IKAWA, N.; DONALDSON, R.R.; KOMANDURI, R.; KÖNIG, W.; McKEOWN, P.A.; MORIWAKI, T.; STOWERS, I.F. (1991). Ultraprecision Metal Cutting – The Past, the Present and the Future. *Annals of the CIRP*, v.15, nº. 2, p. 587-593.

JASINEVICIUS, R.G.; PORTO, A.J.V.; PURQUERIO, B.M.; DUDUCH, J.G. (1993). Uma Revisão sobre Ferramenta de Diamante Monocristalino para Usinagem de Ultraprecisão. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, v.15, n.4, p. 409-414.

JASINEVICIUS, R.G. (1994). *Caracterização da usinabilidade de ultraprecisão em ligas de alumínio fabricadas no Brasil*. 141. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

JASINEVICIUS, R.G.;DUDUCH, J.G.; PORTO, A.J.V. (2004). Ferramentas Monocortantes de Diamante Monocristalino. In: PORTO,A.J.V. (Org). *Usinagem de Ultraprecisão*. São Carlos: RiMa. Cap.3, p.25-46.

KAROW, H.H. (1993). *Fabrication Methods for Precision Optics*. New York: John Wiley & Sons.

KIELA, H.J.; (2001). The Influence of Materials on Surface Quality in Ultra-precision Cutting of Contact Lenses. *Glogal Contact*, v.21, p.26-27.

KOBAYASHI, A.; SAITO, K. (1962). On the cutting mechanism of high polymers. *Journal of Polymer Science*, v.58, p. 1377-1395.

KOBAYASHI, A. (1967). *Machining of Plastics*. New York: MacGraw-Hill.

KOBAYASHI, A.; HIRAKAWA, K. (1984). Ultraprecision Machining of Plastics, part 1, polymethylmethacrylate. *Polymer-Plastic, Technology. Engineering*, p. 15-25.

KOGLER, K. (1999). Selection of Plastics for Optical Applications. *Amptiac*, v.3, n.2.

KRAUSKOPF, B. (1984). Diamond Turning: Reflecting the Demands for Precision. *Manufacturing Engineering*, v.92, p.90-100.

KREVELEN, D.W.van. (1990). *Properties of Polymers*. 3rd. Amsterdam: Elsevier.

LAVRYNENKO, S.N. (1999). Distinctive Features of Polymeric Optical Components Precision Machining. *Proceedings of 1° Euspen International Conference*, v.1, p.207-210.

LAVRYNENKO, S.N. (2004). Mathematical Modelling of Temperature Propagation in Cutting Zone for Ultra Precision Process of Polymers. Poceedings of 4º Euspem International Conference, Glasgow, Scotland, p. 159-160.

LEO ELECTRON MICROSCOPY LTD (1996). Catálogo técnico sobre equipamento para microscopia eletrônica de varredura.

LI, J.; FRIEDRICH, C.R.; KEYNTON, R.S. (1998). Design and Evaluation of Microfabricated Acoustical Lenses for High Frequency Ultrasound Applications. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, BED- v.39, p. 363-364.

MAMALIS, A.G.; GRABCHENKO, A.I.; HORVÁTH, M.; MÉSZÁROS, I.; PAULMIER, D. (2001). Ultraprecision metal removal processing of mirror-surfaces. Journal of Materials Processing Technology, v.108, p.265-277.

MANO, E.B. (1991). Polímeros como Materiais de Engenharia. São Paulo: Editora Edgard Blücher.

MEYERS, M.A.; CHAWLA, K.K. (1999). Mechanical Behaviour of Materials. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

MULTIPLAST. (2004). Literatura técnica sobre polimetilmetacrilato.

NAKASUJI, T.; KODERA, S.; HARA, S.; MATSUNAGA, H.; IKAWA, N. (1990). Turning of Brittle Materials for Optical Components. Annals of the CIRP, V.53, P.1049-1094.

NING, A. (1998). Plastic vs. Glass Optics: Factors to Consider. Part of SPIE “ Precision Plastic Optics”. Disponível em < <http://www.optics-online.com/doc/files/whitepap.pdf>. >. Acesso em 10.mar.2005.

OLYMPUS OPTICAL CO. Catálogo técnico sobre microscópio óptico.

OPTICAL COATING LABORATORY, INC. (2002). A Introduction to the design, manufacture and application of plastic optics. Disponível em < [http:// www.ocl.com./search/index.html](http://www.ocl.com./search/index.html).> Acesso em 22.mai.2004.

PARO, J. (2002). Mechanics for Eletronics. VTT Research Programme 2000-2002. Technical Research Center of Finland (VTT).

PORTO,A.J.V.; DUDUCH, J.G.; JASINEVICIUS, R.G. (2004).Usinagem de Ultraprecisão. In: PORTO, A.J.V. (Org.). Usinagem de Ultraprecisão.São Carlos: RiMa. Cap.1, p.1-7.

RIEDL, M. (2004). Advances in single-point diamond turning provid improved performance for visible as well as IR optics. SPIE’s oemagazine, p.26-29.

ROY, P. K.; BASU, S. K. (1977). Evaluation of Processing Factors on Turning of Thermoplastics. *Polymer Engineering and Science*, v. 17, n.10, p. 751-757.

RUBENSTEIN, C.; STORIE, R.M. (1969). The cutting of polymers. *International Journal Machining Design Research*, v.9, p.117-130.

SAECHTLING, H. (1983). *International Plastics Handbook*. Munchen: Hanser Gardner Publications.

SAITO, K. (1981). Fracture Phenomena of High Polymers in Cutting. *Journal of Macromolecular Science*, part B, v.19, n.3, p.459-485.

SILVA, A.R. (2002). *Confecção e caracterização óptica e estrutural de lentes plásticas obtidas pelo processo de injeção*. 78p. Dissertação (Mestrado) – Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SMITTH, E. F. (1989). *Single-Point Diamond Turning of Amorphous Thermoplastics Polymers*. M.S. Thesis. Dept° of Materials Science and Engineering. Graduate Faculty of North Carolina State University. Raleigh. 1989.

TANIGUCHI, N. (1994). The State of the Art of Nanotechnology for Processing of Ultraprecision and Ultrafine Products. *Precision Engineering*, v.16, n.1, p. 5-24.

TAYLOR HOBSON DO BRASIL. (2006). Literatural técnica sobre equipamentos para metrologia. Disponível em < www.taylorhobson.com.br>. Acesso em 30.mai.2006.

TEYSSIER, C.; DEVEREESE, C. (1995). What's Next for Plastic Optics?. *Laser & Eletronics*, v.14, n.13.

TOLLEY, P. (2003). Polymer Optics Gain Respects. *Photonics Spectra*. October 2003.

TOLLEY, P. (2005). Pushing the polymer envelope. *Proc. SPIE*. v.5872, p. 102-113.

UNION OPTICAL CO., LTD (1989). Catálogo técnico sobre microscópio.

VALENTE, C.M. (2003). Analysis of Tool and Workpiec Iteration in Diamond Turning using Grafical Analysis of Acoustic Emission. Laboratoty OF Manufacturing Automa-tion, Precision Manufacturing Group, University of California, Berkeley. Disponível em < [http:// repositories.cdlib.org/ima/pmg/2002_valente](http://repositories.cdlib.org/ima/pmg/2002_valente) >. Acesso em 02.mar.2005.

XIANGDONG, L. (2000). Ultra- Precision Turning Technology. Precision Machining Group, Process Technology Division, Singapore Institute of Manufacturing Technology, Singapore.

XIAO, K.Q.; ZHANG, L.C. (2002). The role of viscous deformation in the machining of polymers. *International Journal of Mechanical Sciences*, v.44, p. 2317-2336.

YUAN, Z.J.; ZHOU, M.; DONG, S. (1996). Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining. *Journal of Materials Processing Technology*, v.62, p.327-330.