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

**AVALIAÇÃO DA REPLICAGEM DE MOLDES TORNEADOS COM
FERRAMENTA DE DIAMANTE USANDO PRENSAGEM A QUENTE EM
POLIMETILMETACRILATO (PMMA)**

ROBSON ALVES DE OLIVEIRA

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

Dedico este trabalho a minha família

AGRADECIMENTOS

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

Ao Prof. Dr. Renato Goulart Jasinevicius pela orientação, amizade, confiança e essa grande oportunidade;

Ao Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch pela colaboração e amizade;

A Profa. Dra. Luciana Montanari pela colaboração, amizade e discussão do trabalho;

A Taylor Hobson do Brasil Ltda em especial ao funcionário Marcelo Bulhões Montagnani pelo auxílio nos ensaios de perfilometria óptica;

Aos amigos do Grupo do laboratório de Engenharia de Ultraprecisão, Paulo, João Paulo, Fabiano e em especial ao René pela ajuda e amizade ao longo destes anos;

Aos técnicos do Departamento de Materiais (EESC-USP), em especial ao Pedro e Silvano;

Aos meus Pais pelo incentivo e apoio;

A minha namorada Patrícia, pela ajuda, carinho e companheirismo;

Ao amigo Paulo pela ajuda e amizade;

Aos grandes amigos que sempre serão lembrados, Fabio (Bola), Ernesto, Israel, Rodrigo, além de outros não citados, pelos ótimos momentos proporcionados e que estarão em minhas lembranças para o resto da minha vida;

O CNPq pelo apoio financeiro dado a este projeto.

Resumo

Oliveira, R. A. (2006). *Avaliação da replicagem de moldes torneados com ferramenta de diamante usando prensagem a quente em polimetilmetacrilato (PMMA)*. 133p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

Neste trabalho, diferentes tipos de microestruturas foram geradas por torneamento com ferramenta de diamante de ponta única e microendentação para serem replicadas através da prensagem a quente. Testes foram realizados para ser avaliada a geração destas microestruturas por dois métodos distintos: microdeformação e microusinagem, planejados para observar a replicação gerada por marca de endentaço Vickers (piramidal) e, remoo de material (torneamento com ferramenta de diamante de ponta nica). Uma reviso no processo de manufatura aplicada para a replico de microestruturas apresentada. Os materiais usados como molde e rplica foram o cobre eletroltico e o polimetilmetacrilato (PMMA), respectivamente. Inicialmente, a usinabilidade do cobre eletroltico foi avaliada sob diferentes condies de corte, a fim de determinar parmetros apropriados de torneamento para obter um fino revestimento de superfcie final (rugosidade). Observou-se que para avanos (f) de $10 \mu m / rev$ e profundidade de corte (ap) de $5 \mu m$, a superfcie apresentou um baixo valor de rugosidade, isto , 2,81 nm para rugosidade mdia (Ra) e 13,4 nm para rugosidade terica (Rt). Alm disso, observou-se que a microestrutura do material mostrou-se de fundamental papel na rugosidade, por conta da recuperao elstica dos gros devido a anisotropia da estrutura policristalina do cobre. As microestruturas geradas para a replicagem foram: a) lente esfrica, b) perfil “senoidal” e sulcos conctricos. Os resultados mostraram que vivel a reproduo, com boa conformidade das microestruturas, por meio de prensagem a quente. Observou-se que as bordas e as superfcies finas com rugosidade em torno de 10 nm rms foram bem replicadas.

Palavras Chaves: Cobre eletroltico, Polimetilmetacrilato, Ferramenta de Diamante, Torneamento de Ultrapreciso, Microestruturas pticas e Prensagem a Quente.

Abstract

Oliveira, R. A. (2006). *Evaluation of the replication of molds generated from single point diamond turning using hot embossing in polymethylmethacrylate (PMMA)*. 133p. Dissertação (M.S.c) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

In this work, different types of microstructures were generated by single point diamond turning and microindentation for will replicated through the hot embossing. Tests were carried to evaluate the generation these microstructures by two distinct methods: micro-deformation and micro-machining, planned to observe the replication of the mark generated by the Vickers indenter (Pyramidal) and the latter by material removal (single point diamond turning). A review on several manufacturing processes applied to replication of microfeatures, is presented. The materials used as mould and replication workpiece were electroless copper and polymethylmethacrylate (PMMA), respectively. Initially, the machinability of electroless copper was evaluated under different cutting conditions to determinate appropriate turning parameters to obtain very fine surface finish (roughness). It was observed that for $f = 10 \mu\text{m}/\text{rev}$ (feed rate) and $a_p = 5 \mu\text{m}$ (depth of cut), the surface presented the roughness' lowest value, i.e., 2,81 nm to medium roughness (R_a) and 13,4 nm to theoretical roughness (R_t). Moreover, it was observed that the microstructure of the material plays a fundamental role on roughness, because of the elastic recovery of grains due to the anisotropy of the polycrystalline structure of copper. The microfeatures generated were the following: a) spherical lens, b) "sinusoidal" profile and concentric grooves. The results showed that it is feasible to reproduce, with good agreement, the microfeatures by means of hot embossing. It was observed that thin edges and fine surfaces with roughness around 10 nm *rms* were well replicated.

Keywords: Electroless copper, Polymethylmethacrylate, Single point diamond tool, Ultra precision turning, Optics microstructures, Hot embossing.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1	– Superfície de cobre eletrolítico atacada quimicamente para revelar os contornos de grão.....	26
FIGURA 2.2	– (a) Perfil ideal, (b) Perfil real (TO et al, 2001).....	30
FIGURA 2.3	– Imagem topográfica (TalySurf CCI 3000).....	31
FIGURA 2.4	– Gráfico do perfil médio (TalySurf CCI 3000).....	32
FIGURA 2.5	– Gráfico espectral (TalySurf CCI 3000).....	32
FIGURA 2.6	– Imperfeição da aresta de corte da ferramenta (CORREIA, 2004).....	33
FIGURA 2.7	– Lentes plásticas moldadas por injeção, com zonas Fresnel, para lanternas de carros (BRINKSMEIER e PREUSS, 1997).....	35
FIGURA 2.8	– Fresamento circunferencial cônico de ranhuras Fresnel em superfícies assimétricas (BRINKSMEIER e PREUSS, 1997).....	35
FIGURA 2.9	– Exemplos de microestruturas fabricadas através de usinagem de ultraprecisão.....	37
FIGURA 2.10	– Exemplos de componentes ópticos fabricados através do torneamento com ferramenta de diamante.....	38
FIGURA 2.11	– Molde para uma lente bifocal intracular com ranhura Fresnel hiperbólicas (esquerda) e lente de retroprojeto com ranhuras Fresnel retas (direita) (BRINKSMEIER e PREUSS, 2000).....	40
FIGURA 2.12	– Imagem SEM de uma lâmina de alvo de alumínio com um degrau duplo de $7,5\ \mu m$ (esquerda) e imagem AFM de um degrau simples de $1,5\ \mu m$ sobre uma lâmina de alvo (direita) (BRINKSMEIER e SCHMÜTZ, 1998).....	40
FIGURA 2.13	– Visão geral dos processos de replicagem. O micro-relevo original é copiado através de eletrodeposição em Ni até que se obtenha um “shim”. A replicagem é feita por moldagem a quente, aplicação de resina ou por injeção (GALE et al, 2005).....	52
FIGURA 2.14	– Curva de transmissão da resina PMMA, obtida via espectrofotometria UV-Vis-NIR. Possibilidade de operação em toda a faixa do espectro visível, até cerca 2500 nm (CIRINO, 2002).....	54
FIGURA 2.15	– Esquema representando o processo de produção de um clone epoxy de um molde SU-8 positiva imagem, ao qual pode então ser usado como uma ferramenta estampa para prensar PMMA. As imagens inseridas são microfotografias de uma microestrutura com diferentes estágios de fabricação. O diâmetro do menor círculo é $950\ \mu m$ e o anel tem $25\ \mu m$ de largura (KOERNER et al, 2005).....	59
FIGURA 2.16	– Esquema representando a força e temperatura usada para prensar estruturas em PMMA com um molde de epoxy. A linha cheia representa a temperatura em função do tempo e a linha tracejada é a aplicação da força. A escala de tempo não é linear e não reflete o mesmo, onde um parâmetro instrumental foi mudado (KOERNER, et al, 2005).....	59
FIGURA 2.17	– A) Microfotografias de SEM (2500 X) dos pontos da imagem positiva através do microscópio de força atômica TGT1, e o resultado do prensamento em PMMA, cria uma imagem negativa correspondente	

	(B). Os pontos do molde original estão a $3\ \mu m$ de distância com uma altura de 300-500 nm. A imagem mostrada em (A) foi feita depois de 10 ciclos completos de prensagem (KOERNER et al, 2005).....	60
FIGURA 2.18	– Microfotografia SEM da região de um injetor de um dispositivo microfluído gravado em PMMA usando epoxy. As dimensões da canaleta têm $50\ \mu m$ de largura e $20\ \mu m$ de profundidade (KOERNER et al, 2005).....	61
FIGURA 3.1	– Amostra de cobre eletrolítico atacada quimicamente para revelação de grãos.....	63
FIGURA 3.2	– Amostra de Cobre eletrolítico com microestruturas (endentações).....	64
FIGURA 3.3	– Foto de uma amostra de polimetilmetacrilato (PMMA).....	65
FIGURA 3.4	– Imagens feitas através de perfilometria óptica da superfície polida com diamante. Valores de profundidades dos riscos deixados pelo processo atingem profundidades de até 50 nanômetros.....	67
FIGURA 3.5	– Ferramenta de diamante monocristalino (PORTO, 2004).....	68
FIGURA 3.6	– a) Imagem tridimensional de uma aresta de ferramenta diamante obtida através de microscopia de força atômica; b) imagem de ferramentas de diamante.....	69
FIGURA 3.7	– Geradora de Superfícies Anesféricas, RANKO PNEUMO ASG 2500 e controle Numérico ALLEN – BRADLEY CNC 8200.....	69
FIGURA 3.8	– a) Prensa utilizada para a replicagem de microestruturas em PMMA – Laboratório de Materiais da Engenharia de São Carlos – USP; b) desenho esquemático da câmara onde é feita a compressão das amostras.....	71
FIGURA 3.9	– Curva de aquecimento e resfriamento para o ciclo de moldagem a quente.....	71
FIGURA 3.10	– A peça-teste é inicialmente faceada antes de se iniciar os testes com a variação das condições de usinagem.....	76
FIGURA 3.11	– Desenho esquemático mostrando o perfil da face da amostra de cobre eletrolítico torneada com várias condições de corte (Tabela 3.5).....	77
FIGURA 3.12	– Peça usinada no torno ASG 2500 medida com perfilômetro de contato. Liga de cobre eletrolítico.....	77
FIGURA 3.13	– Suporte de alumínio para auxiliar a fixação da amostra na placa de vácuo para usinagem fora de centro.....	78
FIGURA 3.14	– Figura ilustrativa da segunda amostra de cobre eletrolítico, torneado com ferramenta de diamante.....	80
FIGURA 3.15	– Desenho esquemático, onde foram feitas as endentações na amostra de cobre.....	81
FIGURA 3.16	– Espectômetro instalado no Instituto de Física de São Carlos – USP.....	82
FIGURA 4.1	– Referem-se, respectivamente, à topografia e ao perfil traçado	

	perpendicularmente à direção do corte da superfície gerada com avanço de $25 \mu\text{m}/\text{rev}$	86
FIGURA 4.2	– a) e b) Microestrutura dos grãos cristalinos do cobre.....	87
FIGURA 4.3	– Influência da taxa de avanço sobre a rugosidade superficial pico a vale. Comparação entre valor estimado teoricamente e medidos experimentalmente no Talysurf CCI 3000. Ferramenta de diamante monocristalino ($R_p = 1.14 \text{ mm}$, ângulo de saída $\gamma = 0^\circ$, ângulo de folga $\alpha = 12^\circ$), profundidade de usinagem (a_p) conforme tabela 4.1 e rotação de 1000 rpm.....	88
FIGURA 4.4a	– Amostra usinada com $f = 25 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 5 \mu\text{m}/\text{rev}$. Espectro da superfície usinada e imagem tridimensional obtidos no Talysurf CCI 3000.....	89
FIGURA 4.4b	– Amostra usinada com $f = 20 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 5 \mu\text{m}/\text{rev}$. Espectro da superfície usinada e imagem tridimensional obtido no Talysurf CCI 3000.....	90
FIGURA 4.5	– Influência da profundidade de usinagem no acabamento superficial (R_t) medidos no Talysurf CCI 3000. Rotação 1000 rpm, avanço de $15 \mu\text{m}/\text{rev}$, ferramenta de diamante monocristalino ($R_p = 1.14 \text{ mm}$, ângulo de saída $\gamma = 0^\circ$, ângulo de folga $\alpha = 12^\circ$).....	91
FIGURA 4.6a	– Amostra usinada com $f = 15 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 5 \mu\text{m}/\text{rev}$. Espectro da superfície usinada e perfil da superfície obtidos no Talysurf CCI 3000.....	92
FIGURA 4.6b	– Amostra usinada com $f = 15 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}/\text{rev}$. Espectro da superfície usinada e perfil da superfície obtidos no Talysurf CCI 3000.....	93
FIGURA 4.7	– Efeito da recuperação da deformação elástica sobre a altura pico-a-vale. A recuperação elástica será mais pronunciada no material com maior módulo elasticidade, a) rugosidade superficial teórica (altura ideal); b) rugosidade superficial após usinagem.....	94
FIGURA 4.8	– Cavaco de cobre eletrolítico	95
FIGURA 4.9a	– Amostra usinada com $f = 5 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 5 \mu\text{m}/\text{rev}$. Espectro da superfície usinada e imagem tridimensional obtida no Talysurf CCI 3000.....	96
FIGURA 4.9b	– Diagrama esquemático mostrando o corte no interior de um único grão.....	97
FIGURA 4.10	– Amostra de Cobre eletrolítico com microestruturas (endentações).....	98
FIGURA 4.11	– Microestrutura (endentações) gerada na amostra de cobre eletrolítico com carga de $10 \text{ kgf}/\text{mm}^2$, imagens obtidas no Talysurf CCI 3000.....	99
FIGURA 4.12	– Degraus do setor 1 para o setor 2, gerada na amostra de cobre	

	eletrolítico, imagens obtidas no Talysurf CCI 3000.....	100
FIGURA 4.13 –	Demonstração entre a profundidade das steps previstas (teórica) e a encontrada (experimental).....	101
FIGURA 4.14 –	a) Amostra de cobre eletrolítico com microperfis torneado com ferramenta de diamante para a prensagem a quente no PMMA. b) Perfil da superfície torneada.....	101
FIGURA 4.15 a-	Réplica de PMMA 1. Pode se observar através da seta e do gráfico, que não sofreu a replicagem.....	103
FIGURA 4.15 b-	Réplica de PMMA 2. Pode se observar que o centro foi replicado, mas as extremidades, como mostra a seta e o gráfico, ainda não foram.....	103
FIGURA 4.15 c-	Réplica de PMMA 3. Pode se observar que o centro foi replicado, e já temos uma replicagem mais significativa das bordas, mas ainda não foi replicada totalmente.....	104
FIGURA 4.15 d-	Réplica de PMMA 4. Pode se observar que a replicagem foi completa. A seta indica uma sujeira que aderiu ao PMMA durante a montagem na prensa.....	104
FIGURA 4.16 –	Peça final para replicagem a quente no PMMA.....	105
FIGURA 4.17 –	Amostra de PMMA, após a prensagem a quente.....	105
FIGURA 4.18 –	a) Peça de cobre, microcaracterística da lente esférica (concavidade), setor 1, b) Réplica da lente esférica no PMMA....	107
FIGURA 4.19 –	a) Peça de cobre, microcaracterística da lente esférica (concavidade), setor 1, b) Réplica da lente esférica no PMMA....	108
FIGURA 4.20 –	a) Peça de cobre, microcaracterística das endentações, setor 4, b) Réplica das endentações no PMMA.....	109
FIGURA 4.21 –	a) Peça de cobre, microcaracterística da senoide, setor 3, b) Réplica de da senoide no PMMA.....	110
FIGURA 4.22 –	a) Peça de cobre, microcaracterística dos microperfiz, setor 2, b) Réplica dos microperfis no PMMA.....	111
FIGURA 4.23a -	Microperfis confeccionado na amostra de cobre, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L.....	113
FIGURA 4.23b -	Microperfis produzidos através da prensagem a quente na amostra de PMMA, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L.....	113
FIGURA 4.24a -	Medição da rugosidade no molde de cobre (microperfis), foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L.....	114
FIGURA 4.24b -	Medição da rugosidade na réplica de PMMA, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L.....	114
FIGURA 4.25a -	Lente esférica (concavidade) confeccionada na amostra de cobre, foto produzida através de um perfilômetro mecânico,	

	Taylor - Hobson, série 120L.....	116
FIGURA 4.25b -	Lente esférica (concavidade) produzido através da prensagem a quente na amostra de PMMA, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L.....	116
FIGURA 4.26a -	Medição da rugosidade no molde de cobre (lente esférica, concavidade), foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L.....	117
FIGURA 4.26b -	Medição da rugosidade na réplica de PMMA, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L.....	117
FIGURA 4.27a -	Senoide confeccionada na amostra de cobre, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L.....	119
FIGURA 4.27b -	Senoide produzida através da prensagem a quente na amostra de PMMA, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L.....	119
FIGURA 4.28a -	Medição da rugosidade no molde de cobre (senoide), foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L.....	120
FIGURA 4.28b -	Medição da rugosidade na réplica de PMMA, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L.....	120
FIGURA 4.29 -	Amostra de PMMA polida com níquel de cobre.....	121
FIGURA 4.30 -	Cobre eletrolítico torneado com ferramenta de diamante.....	122
FIGURA 4.31 -	Curva de transmitância do PMMA face 1, polido e replicado a quente.....	122
FIGURA 4.32 -	Curva de transmitância do PMMA face 2, polido e replicado a quente.....	123

Lista de Tabelas

TABELA 2.1	– Tolerância de componentes para diversos produtos fabricados utilizando processos de usinagem.....	22
TABELA 2.2	– Materiais frágeis usinados com ferramenta de diamante.....	24
TABELA 2.3	– Materiais usados na usinagem de ultraprecisão.....	29
TABELA 2.4	– Propriedades ópticas e mecânicas de polímeros empregados com maior frequência na replicagem de elementos ópticos difrativos (EOD).....	51
TABELA 3.1	– Dados das endentações obtidas na amostra de cobre eletrolítico através do microdurômetro Leica VMHT MOT.....	64
TABELA 3.2	– Características geométricas da ferramenta de diamante monocristalino.....	68
TABELA 3.3	– Testes da prensagem a quente da segunda amostra de cobre eletrolítico torneado e das amostras de PMMA, para a replicagem das microranhuradas.....	72
TABELA 3.4	– Especificações técnicas do Talysurf CCI 3000.....	74
TABELA 3.5	– Condições de corte aplicadas na amostra de cobre eletrolítico para avaliação do acabamento.....	76
TABELA 3.6	– Profundidades produzidas na amostra de cobre eletrolítico para a geração de microestruturas.....	79
TABELA 3.7	– Profundidade de corte da segunda amostra de cobre e a respectiva largura da ranhura deixada na peça estimada através da equação $W = (2 * rp * ap)^{1/2}$	80
TABELA 3.8	– Parâmetros utilizados no torneamento da terceira amostra de cobre eletrolítico.....	81
TABELA 4.1	– Resultados da rugosidade através dos avanços e profundidades trabalhadas na primeira amostra de cobre eletrolítico.....	85
TABELA 4.2	– Testes de prensagem a quente da segunda amostra de cobre eletrolítico e da réplica de PMMA.....	102

Lista de Abreviaturas e Símbolos

Å	-	Ângstrom
AFM	-	Atomic Force Microscopy
Al	-	Alumínio
ap	-	Profundidade
Bar	-	Pressão barométrica
CIs	-	Circuitos Integrados
cm ²	-	Centímetro quadrado
CN	-	Comando numérico
Cu	-	Cobre
EOD	-	Elemento óptico difrativo
<i>f</i>	-	Avanço
g	-	Grama
KN	-	Quilonewton
KPa	-	Quilopascal
m	-	Metro
min	-	Minuto
ml	-	Mililitro
mm	-	Milímetro
n	-	Índice de refração
N	-	Newton
nm	-	Nanômetro (10 ⁻⁹ m)
NOA	-	Norland Optical Adhesive
°C	-	Graus Celsius
OFHC	-	Oxygen Free High Conductivity
PC	-	Policarbonato
PDMS	-	Polydimethylsiloxane
PMMA	-	Polimetilmetacrilato
PVC	-	Policloreto de vinila
Ra	-	Rugosidade média
Rp	-	Raio de Ponta
rpm	-	Rotação por minuto
Rt	-	Máxima altura pico-a-vale individual
s	-	Segundos
SEM	-	Scanning electronic microscopy
St	-	Rugosidade superficial pico-a-vale relativa a uma área
STS	-	Slow Tool Servo
SU-8	-	Material funcional
Sz	-	Rugosidade superficial média relativa a uma área
Tg	-	Transição vítrea
μm	-	Micrômetro (10 ⁻⁶ m)
UV	-	UltraVioleta
VLSI	-	Very large scale integration

Sumário

CAPÍTULO 1 – Introdução.....	15
1.1 – Justificativa.....	18
1.2 – Objetivo e Estrutura da Dissertação.....	19
CAPÍTULO 2 – Revisão Bibliográfica.....	20
2.1 – Usinagem de Ultraprecisão.....	20
2.2 – Característica dos Materiais.....	24
2.3 – Influência do Comportamento Elastoplástico do Material Sobre a Geração da Superfície.....	30
2.4 – Geração de Superfícies no Torneamento de Ultraprecisão.....	32
2.5 – Geração de Microestruturas através de Torneamento com Ferramenta de Diamante.....	34
2.6 – Geração de Microestruturas.....	39
2.7 – Replicagem.....	41
2.8 – Métodos de Produção Óptica.....	42
2.9 – Replicagem de Elementos Ópticos.....	49
2.10 – Processos de Fabricação de Elementos Ópticos Difrativos.....	50
2.11 – Moldes de Microlentes de Baixo Custo Fabricadas em Polímeros a partir de Micromoldes.....	53
2.12 – Prensagem a Quente de Microestruturas e Canaletas para Microfluído.....	55
CAPÍTULO 3 – Materiais e Métodos.....	62
3.1 – Considerações Gerais.....	62
3.2 – Caracterização do Material Usado nos Ensaio de Usinagem.....	62
3.2.1 – Cobre Eletrolítico – Metalografia e Medição de Dureza.....	62
3.2.2 – Polimetilmetacrilato.....	65
3.3 – Ferramenta de Corte.....	67
3.4 – Máquina - Ferramenta para Usinagem.....	69

3.5 – Prensagem a Quente.....	70
3.6 – Rugosidade Superficial.....	72
3.7 – Ensaio Preliminares.....	75
3.8 – Métodos para a Geração de Microprefis.....	77
3.9 – Método para a Medição de Transmitância.....	82
CAPÍTULO 4 – Resultados e Discussão.....	83
4.1 – Influência das Condições de Usigem.....	83
4.1.1 – Influência do Avanço (f).....	83
4.1.2 – Influência da Profundidade de Usinagem (a_p).....	91
4.1.3 – Influência do Material da Peça.....	92
4.1.4 – Influência da Policristalinidade.....	94
4.2 – Resultados das Microestruturas Produzidas.....	97
4.2.1 – Endentação.....	97
4.2.2 – Torneamento.....	99
4.3 – Reprodução através de Prensagem a Quente.....	101
CAPÍTULO 5 – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	124
5.1 – Conclusões.....	124
5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros.....	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127

CAPÍTULO 1

1 – Introdução

Atualmente, a maioria dos produtos manufaturados requer um alto nível de precisão na sua fabricação, devido ao importante papel que eles possuem no desenvolvimento de modernas tecnologias. Para atender a estas demandas, tanto novos materiais de alto desempenho como técnicas de usinagem vêm sendo desenvolvidas. O uso destas novas técnicas permite que se alcancem tolerâncias nanométricas no uso destes materiais, com destaque para a usinagem de ultraprecisão (NGOI e SREEJITH, 2001).

A tecnologia de usinagem de ultraprecisão iniciou um maior desenvolvimento nos anos 80 e 90 e foi amplamente estudada principalmente na usinagem de materiais metálicos, como alumínio e cobre para gerar superfícies espelhadas através de torneamento com ferramenta de diamante. A aplicação de usinagem de ultraprecisão está atualmente sendo expandida para a usinagem de materiais ferrosos, materiais difíceis de usar – frágeis – (cristais semicondutores e vidros) e até mesmo materiais cerâmicos. O desenvolvimento da tecnologia de usinagem de ultraprecisão deve muito aos esforços no desenvolvimento de ferramentas de diamante de ultraprecisão, além de tecnologias de controle (MORIWAKI e OKUDA, 1989).

A usinagem de ultraprecisão permite a produção de peças com precisão de forma submicrométrica e rugosidade da ordem nanométrica (IKAWA et al, 1991). Conseqüentemente o projeto da máquina-ferramenta e o comportamento do processo devem ser bem entendidos, juntamente com a interação entre o processo e a máquina, isto é, a interação entre ferramenta e a peça (COLAFEMINA, 2005).

O bom entendimento do processo de microusinagem é de vital importância para futuros desenvolvimentos de tecnologia de usinagem de ultraprecisão e melhores projetos de máquinas-ferramenta.

A capacidade de produzir superfícies com propriedades óptica sem o emprego de processos posteriores, como lapidação e polimento, fez do torneamento de ultraprecisão uma das tecnologias de fabricação óptica mais empregada nas últimas duas décadas (ZHOU e NGOI apud SILVA, 2003).

Ultraprecisão inclui dimensões de componentes da ordem de 1nm e medidas de resolução na ordem de $1\text{ \AA}$ (10^{-10} m), daí o termo “Nanotecnologia” (DUDUCH, 1993). Tais ordens de grandeza não são alcançadas por meio de adaptações ou modificações de processos convencionais, mas unicamente pelo desenvolvimento de novas técnicas de usinagem e medição, envolvendo: posicionadores de ultraprecisão, metrologia e controle, usinabilidade de ultraprecisão de materiais disponíveis, materiais ferramenta (por exemplo, diamante) e a interação entre ferramenta de corte e peça de trabalho durante a usinagem (JASINEVICIUS, 1994).

O uso de máquinas-ferramenta de ultraprecisão proporciona oportunidades únicas para a manufatura de elementos microscópicos funcionais.

A confecção de microestruturas com qualidades ópticas é favorecida quando feitas através de máquinas-ferramenta de ultraprecisão. Tais microestruturas podem ser obtidas por diversos processos, um deles, a litografia onde um perfil desejado é obtido através da remoção sucessiva de camadas através de ataque químico. No entanto, o torneamento com ferramenta de diamante com ângulos pré-definidos se demonstra muito eficaz quando usado para este fim, pois ele oferece a geração de superfícies com geometrias complexas (Correa, 2004).

Dentre os fatores que contribuem para a geometria da superfície, está a rugosidade, a qual está presente em todas as superfícies obtidas por processos de usinagem. Desde que a rugosidade foi ouvida como um som vindo de um gramofone, sendo a intensidade do som conectada à altura da aspereza, a quantificação do conceito de rugosidade tem recebido enorme atenção da ciência e indústria. Primeiramente analogicamente, nos últimos 30 anos, digitalmente (DE CHIFFRE et al apud CAMARGO, 2005). Assim, a natureza de superfície obtida em processos de manufatura tem sido longamente reconhecida, e também causado impacto significativo no desempenho do produto (LUCCA et al apud CAMARGO, 2005).

A rugosidade é parte da constituição da topografia da superfície. Segundo LI et al (2004) “*superfície topográfica são as estruturas residuais microgeométricas de diferentes formas e tamanhos resultantes do efeito integrado por muitos fatores em processo de manufatura*”.

Atualmente os componentes que possuem microestruturas estão sendo produzidos em quantidades crescentes para aplicações ópticas, médicas e científicas. As microestruturas com qualidade óptica são mais freqüentemente geradas por torneamento ou *fly-cutting* (tipo de fresamento) com ferramentas de diamante. Estes processos são utilizados para obtenção de ranhuras lineares ou estruturas periódicas de micropismas. O desenvolvimento de peças micromecânicas e/ou microópticas fabricadas em materiais resistentes, demanda, por um lado, profundos conhecimentos das técnicas de fabricação e mecanismos de remoção de material e, por outro, amplos conhecimentos sobre projeto e garantia de qualidade.

O efeito de propriedades do material em mecanismos de microusinagem é considerado extremamente importante. Esta importância é relatada por Jasinevicius et al (1999) mostrando que o processo de materiais policristalinos envolve aspectos interessantes relatados para interação ferramenta/material.

Processos convencionais (não determinísticos) tais como polimento, lapidação e usinagem química (*etching*) comumente usados para o acabamento superficial desses componentes, são considerados ineficientes com baixa taxa de remoção requerendo longo tempo, sendo, portanto, caros e tornando-se um obstáculo à fabricação em série (JASINEVICIUS, 1994). Com isso a fabricação de microestruturas está intimamente relacionada à fabricação de microcomponentes através de técnicas de replicação.

Para muitas aplicações, a reprodução em larga escala de microestruturas e microlentes podem ser viabilizadas através de técnicas de microinjeção, termoformagem ou moldagem a frio (BLOUGH et al, 1997).

Os moldes demandam superfícies com acabamento superficial, com qualidade óptica e, opcionalmente, as paredes da microestrutura necessitam ser ligeiramente inclinadas e livres de rebarbas para facilitar a desmoldagem. Aliado a isso, elas devem ser produzidas em materiais duros para resistir ao desgaste devido aos milhares de ciclos a que estão submetidos (BRINKSMEIER et al, 1999).

Outro aspecto interessante é que se de um lado, as tecnologias de fabricação de microestruturas buscam novos materiais para melhorar a vida útil dos moldes, por outro, se busca também injetar novos materiais. A exemplo disso a literatura recente mostra o

interesse crescente em se produzir componentes com microestruturas através de microinjeção e replicação de pós metálicos e cerâmicos, além de outros materiais como os polímeros, por exemplo, polimetilmetacrilato (PMMA). Isto abre novas oportunidades de integração em pesquisas e desenvolvimento.

1.1 – Justificativa

A principal motivação para o presente trabalho é iniciar atividades envolvendo a replicagem, no que se refere à introdução de material, método e avaliação da superfície para a fabricação de elementos ópticos.

O esclarecimento e alguns aspectos relativos aos processos de replicação baseados em microestruturas geradas mecanicamente pode ser considerado um assunto de amplo interesse. Para que seja possível este esclarecimento, algumas geometrias (como exemplo, lente esférica, microperfis, senoide) com estruturas padronizadas serão produzidas variando o comprimento e a relação altura/largura (razão de aspecto). Outro fator que se pretende é a reprodução dessas microestruturas (*steps*), através da prensagem a quente do polimetilmetacrilato (PMMA) diretamente sobre a superfície usinada. O processo de geração das microestruturas contará com apoio de metrologia de alta precisão, usada para avaliação da qualidade dos componentes e também para correção de erros induzidos pelo processo e pelo material.

Neste sentido, este trabalho propõe a replicagem. Para tanto, propõe-se a utilização de cobre eletrolítico como molde, uma vez que vários artigos citam esse material na usinagem de ultraprecisão, devido à facilidade de remoção de material e a qualidade óptica alcançada no acabamento superficial, bem como o polimetilmetacrilato (PMMA) para produzir a réplica.

Além disso, o trabalho irá avaliar o torneamento com diamante no cobre, pois para melhorar a qualidade de microestruturas produzidas por replicagem, é importante conhecer a qualidade dos respectivos moldes, bem como a replicada no PMMA, pois outra preocupação que surge com este tipo de tecnologia refere-se à qualidade das superfícies reproduzidas.

A tendência, hoje, não é só de domínio de processo, mas também do comportamento subsequente dos componentes fabricados.

A contribuição deste trabalho vem de encontro com este pensamento, buscando entender melhor os problemas e dificuldades encontrados na usinagem e replicagem de polímeros, no caso PMMA.

1.2 – Objetivo e Estrutura da Dissertação

O objetivo deste trabalho é investigar a capacidade do processo de microusinagem com ferramenta de diamante monocristalino para geração de microestruturas em metal não ferroso, a saber, cobre eletrolítico, bem como investigar a reprodução dessas microestruturas em amostras de PMMA, após a moldagem (prensagem a quente). A influência de aspectos como as das condições de usinagem (profundidade de usinagem e avanço) sobre o acabamento (rugosidade, tamanho de grãos) e a razão de aspecto (largura e altura) serão analisadas, visando assim, estabelecer uma cadeia produtiva completa de componentes ópticos com qualidade.

A dissertação está estruturada em capítulos, incluindo este capítulo introdutório, onde aborda uma visão geral da usinagem de ultraprecisão e replicagem;

O capítulo 2 faz uma revisão bibliográfica sobre usinagem de ultraprecisão, geração e características dos materiais, rugosidade, geração de microestruturas e métodos de replicagem;

O capítulo 3 apresenta a metodologia experimental expondo as montagens executadas para os ensaios e os equipamentos usados nos procedimentos experimentais;

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões sobre o ensaio;

O capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

E por último, as referências bibliográficas.

Capítulo 2

2 – Revisão Bibliográfica

2.1 – Usinagem de Ultraprecisão

A usinagem de ultraprecisão se preocupa com a produção de componentes com alta exatidão e qualidade superficial. Para atender a uma demanda crescente e de melhor qualidade, as necessidades de melhoria tornam-se óbvias nas tecnologias de usinagem de ultraprecisão.

A usinagem de ultraprecisão está sendo aplicada para itens de alto volume de produção, tais como: disco de memória de computadores, lentes de contato, moldes dentários, cilindros para impressão, espelhos metálicos, transdutores, sensores ópticos (DOWN et al apud CAMARGO, 2005).

A usinagem de ultraprecisão exige alguns requisitos básicos, tais como: máquinas-ferramenta com mancais aerostáticos, elevada rigidez, controle ultra-preciso de posicionamento, ferramenta de diamante, e, o material a ser usinado, que deve ser escolhido de forma a permitir um nível de acabamento superficial de ordem nanométrica. Segundo Duduch (1993), usinagem de ultraprecisão requer uma combinação do melhor material, medição e controle.

A usinagem de ultraprecisão ou torneamento com ferramenta de diamante é uma tecnologia recente que elimina quase todas as etapas com processos convencionais (retificação, lapidação e polimento) para fabricação de elementos ópticos. A grande vantagem deste processo em relação aos tradicionais, é a capacidade de gerar superfícies complexas como as anesféricas. Isto se deve ao fato que no torneamento é possível determinar e controlar a trajetória da ferramenta. Exigências de acabamento superficial na ordem de dezenas de nanômetros ($10^{-9}m$ ou $0,001\mu m$) e precisão de forma

na faixa de micron a submicrons são geralmente obtidas com esse processo (JASINEVICIUS, 1998).

A importância da usinagem de ultraprecisão tem aumentado a cada dia. Hoje, pode-se encontrar em vídeo cassete e *CD player*, componentes usinados com tolerâncias que antes só eram encontradas em equipamentos militares ou em pesquisas. Itens fabricados com usinagem de ultraprecisão estão se tornando cada vez mais comuns na aplicação diária, tais como lentes esféricas, espelhos de reflexão de alta precisão e outras aplicações ópticas (DORNFELD et al. apud CAMARGO, 2005).

A definição de torneamento de ultraprecisão ou torneamento com ponta única de diamante passa antes pela definição de “ultraprecisão”. Segundo Duduch (1993), “ultraprecisão” está relacionada ao maior nível de exatidão alcançável, em uma determinada época, com um determinado tipo de equipamento. É uma operação de usinagem que foi inicialmente desenvolvida para produção de componentes ópticos a partir de materiais dúcteis, como alumínio e cobre. Surgiu como uma segunda opção à retificação de ultraprecisão após a 2ª Guerra Mundial, em empresas privadas da Europa e por Departamentos Militares dos Estados Unidos, sendo que uma das primeiras máquinas-ferramenta de ultraprecisão com ferramenta de diamante foi construída em 1962 naquele país, impulsionando pesquisas em máquinas-ferramenta de ultraprecisão em todo o mundo (KRAUSKOPF, 1984 e COBERTT et al, 2000).

As máquinas-ferramenta para o torneamento de ultraprecisão são construídas com alta precisão e rigidez. Metrologia a laser é usada para controle de posicionamento e avanços (deslocamentos). As máquinas são equipadas com comandos numéricos computadorizados (CNC) altamente avançados e com capacidade de compensação de erros geométricos e térmicos (DUDUCH, 1993).

McKeown (1987) definiu uma possível classificação das usinagens convencionais, de precisão e de ultraprecisão, em termos de tolerância e variedade de produtos por processo, mostrada na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Tolerância de componentes para diversos produtos fabricados utilizando processos de usinagem.

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

Fonte – McKEOWN, P. A.(1987).

Os componentes torneados com ferramenta de diamante requer exatidão de forma, tamanho, rugosidade, refletividade e exatidão da imagem óptica. Porém, do ponto de vista da indústria de manufatura de componentes de ultraprecisão, estes critérios podem ser confinados a: rugosidade e exatidão de forma e de tamanho.

O papel dos materiais no desenvolvimento da tecnologia moderna é de suma importância. Enquanto a tecnologia se torna mais e mais sofisticada, os materiais usados têm que corresponder à altura. Primeiro, espera-se dos materiais usados em aplicações sofisticadas que sejam: confiáveis, seguros e que tenham um alto desempenho em termos de eficiência. Segundo, os materiais têm que ser cada vez mais leves para a grande maioria das aplicações. Terceiro, devem ter uma combinação de propriedades que possibilitem seu uso para fins específicos. E finalmente, os produtos atuais são usados cada vez mais em meio ambientes específicos e/ou agressivos, como alta temperatura, em aplicações de criogenia, altamente corrosivos, vácuo, condições de alta pressão hidrostática entre outros. Materiais convencionais nem sempre são aplicáveis a esses fins. Novos materiais estão sendo criados e utilizados, dentre eles, os materiais frágeis. E, em termos de manufatura, a usinagem de ultraprecisão é cada vez mais requerida para o processamento de tais materiais, com destaque para o torneamento de ultraprecisão, ou torneamento com ponta única de diamante (NGOI e SREEJITH, 2001).

Porto et al. (2004), apresenta uma lista de materiais frágeis que podem ser usinados com ferramenta de diamante na tabela 2.2, onde são incorporados novos materiais que estão relacionados principalmente à óptica de transmissão, mostrando que a exatidão da superfície em componentes de ultraprecisão depende do campo de aplicação, o qual é bastante variável e também mostra os materiais utilizados em cada aplicação.

Tabela 2.2 – Materiais frágeis usinados com ferramenta de diamante.

	Campo de aplicação	Materiais	Especificações
Componentes mecânicos	<ul style="list-style-type: none"> • HD de computadores • Cabeçotes de leitores de videocassete • Mancais aerostáticos • Moldes para lentes de Fresnel • Plugs para conexão de fibra óptica • Blocos padrão 	<ul style="list-style-type: none"> • Alumínio • Níquel • Cobre • Latão 	<ul style="list-style-type: none"> • Precisão de forma 0,1 – 0,5 μm • Rugosidade Ra = 0,010 μm
Óptica de reflexão	Espelhos poligonais para: <ul style="list-style-type: none"> • impressora laser • copiadoras • fotografia terra-ar Espelhos para aplicações com laser: <ul style="list-style-type: none"> • planos • parabólicos • integrados de feixe 	<ul style="list-style-type: none"> • Alumínio • Cobre • Latão • Ouro • Níquel • Liga Cu-Be • Molibdenium 	<ul style="list-style-type: none"> • Refletividade > 98% • Precisão de forma 0,2 – 0,01 μm • Rugosidade Ra = 0,005 μm
Óptica de transmissão	<ul style="list-style-type: none"> • Lentes de Fresnel • Lentes ópticas para aplicação em IV • Lentes para fotocélulas • Lentes para aplicação em laser • Componentes ópticos para CD players 	Monocristais: Silício, germânio, cleartran, GaAs, ZnS, LiNO ₃ , CdS, LAP e KDP Amorfos: Vidros ópticos, zerodur, sílica fundida	<ul style="list-style-type: none"> • Precisão de forma 0,2 – 0,01 μm • Rugosidade Ra ≤ 0,005 μm

Fonte – Porto et al. (2004).

2.2 – Característica dos Materiais

Em geral, os materiais mais facilmente usinados com diamante são os metais não ferrosos tais como o alumínio e o cobre, pois apresentam baixa resistência ao escoamento e relativamente baixa reatividade química com carbono do diamante (TANAKA et al., 1981). A formação de cavaco no torneamento de um material não ferroso ocorre a baixos níveis de energia em função da alta ductilidade que apresentam esses materiais (SHAW apud PORTO, 1995).

No torneamento com diamante é possível atingir um acabamento muito próximo do previsto teoricamente, já que em materiais normalmente classificados como torneáveis com diamante dificilmente ocorre a formação de arestas postiças (*built-up-edge*) na ferramenta, entretanto uma aresta postiça aderente pode, ocasionalmente, forma-se quando da usinagem de alguns tipos de alumínio dentro de determinadas faixas de velocidade de corte, o que pode deteriorar o acabamento superficial (BAO e STEVENSON, 1976).

Portanto, a qualidade do material a ser usinado pode ter grande influência no acabamento superficial, sobretudo na usinagem de ultraprecisão. Um fator de influência predominante no acabamento superficial é a diferença (não uniformidade) das propriedades elásticas e principalmente plásticas entre grãos distintos de um material policristalino. Essa diferença de comportamento resulta em superfícies usinadas com variações entre grãos vizinhos os quais determinam a qualidade superficial.

Os contornos de grão, figura 2.1, podem ser considerados como outro fator de influência no acabamento de uma superfície usinada, por conterem impurezas decorrentes da fundição (depositadas durante a solidificação do material). Estas impurezas resultam em propriedades mecânicas diferentes entre o material de base e os contornos do grão.

Em uma pesquisa divulgada por Cheung e Lee (2000), estes afirmam que o perfil de uma superfície torneada é composto por vários componentes, dentre os quais os autores citam as propriedades e a orientação cristalográfica do material e a geometria da ferramenta que esta sendo utilizada. Afirmam ainda que, em microcorte, como em torneada com diamante, o material da peça induz vibrações, devido à variação na orientação cristalográfica do material. Comenta ainda que, trabalhos estão sendo desenvolvidos para avaliar esta variação da rugosidade causada por estas trepidações. Os autores concluíram que a variação da rugosidade com relação ao material utilizado é significativa, quando em formação de superfície em escala nanométrica.

As impurezas não apenas podem se instalar nos contornos de grão, mas também dentro dos grãos. Além disso, partículas de carbetos ligadas a alguns materiais (por exemplo, silício em ligas de Al), se instalam de uma forma finamente distribuída. A forma encontrada para minimizar a influência dessas inclusões duras sobre o acabamento e vida útil da ferramenta é através da geometria das ferramentas, com a utilização de ângulos de saída mais negativos, os quais removem facilmente estas inclusões da matriz ao invés de arrancá-las da superfície o que poderia causar o

riscamento e conseqüentemente, a degradação da superfície (OHMORI e TAKADA, 1982).

Figura 2.1 – Superfície de cobre eletrolítico atacada quimicamente para revelar os contornos de grãos.

Os materiais usados para peças de precisão são cuidadosamente inspecionados quanto a diversas propriedades tais como composição, resistência, etc. Porém, defeitos microscópicos do material, causados freqüentemente por impurezas ou precipitações, impõem limites ao acabamento superficial devido à formação de defeitos conhecidos como “vazios”. Os vazios inicialmente no interior do material, passam a se integrar à superfície, e trincas são geradas pela aproximação da aresta de corte. As trincas se desenvolvem dividindo os vazios entre o lado do cavaco e o lado da superfície acabada (OHMORI e TAKADA, 1982).

Outro fator importante é o efeito da anisotropia dos materiais. No torneamento de ultraprecisão pode vir a ocorrer que a espessura do cavaco venha a ser menor que o tamanho dos grãos do material. Por conseqüência, os materiais para usinagem de ultraprecisão devem apresentar uma estrutura cristalina regular e microgranular ou então, monocristalina.

Em materiais policristalinos, cada cristal está aleatoriamente orientado, como podemos perceber na figura 2.1, e conseqüentemente, a condição do acabamento superficial muda de acordo com a orientação dos cristais. Todavia, podem-se obter resultados satisfatórios através da minimização da diferença no grau de deformação e ruptura (fratura) entre os grãos do material.

Materiais policristalinos são anisotrópicos, mas, ao reduzir-se a seção de corte, a ferramenta poderá estar cortando no domínio de um único grão. A espessura de corte se estabelece na posição de equilíbrio entre a força aplicada pela ferramenta e a reação do material do grão. Quando o corte passa para o grão seguinte, que estatisticamente apresenta uma outra orientação cristalográfica, a posição de equilíbrio será diferente por causa da mudança das propriedades físicas do grão. Isso se torna mais pronunciado em materiais com granulometria muito grande.

Em estruturas com granulometria fina, mesmo na usinagem de ultraprecisão, vários grãos serão cortados simultaneamente, de forma que a posição de equilíbrio para a espessura de corte se dê em uma posição média, e não oscile com grande intensidade. Para isso, devem ser utilizadas ferramentas com raio de ponta grande no corte de materiais policristalinos (JASINEVICIUS et al., 2003).

Outro aspecto importante é que o cavaco formado no torneamento de ultraprecisão de materiais policristalinos é do tipo lamelar (VON TURKOVICH e BLACK, 1970 e OHMORI e TAKADA, 1982). Seria importante evitar os efeitos nocivos da anisotropia, ou seja, utilizar ferramentas com raio de ponta grande e um material com estrutura granular refinada, devido ao fato de que as diferenças em termos de resistência mecânica em cada grão podem ocasionar microvibrações na interface ferramenta/peça, o que influenciará na rugosidade superficial. Além disso, quando satisfeita essa condição, a ferramenta corta o material, que é policristalino, como se fosse um monocristal (PORTO, 1995).

Outra fonte de vibrações seria grandes profundidades de corte, uma vez que, poderia-se estar cortando mais de uma camada de grãos onde além de se ter que vencer a resistência mecânica de cada grão teria-se que vencer a resistência mecânica dos contornos de grão das camadas envolvidas pelo corte (PORTO, 1995).

Sato et al (1991), procura melhorar a acuracidade do corte a partir do ponto de vista da peça procurando tornar claras as características do mecanismo de microusinagem e assim melhorar as propriedades do acabamento através da utilização da anisotropia do próprio material. Os autores perceberam que havia um gradiente na

força principal próximo de uma profundidade de corte de $1\mu m$, sugerindo uma mudança no mecanismo do mesmo, possivelmente estaria ocorrendo o efeito TAMANHO (“*SIZE EFFEC*”) que é o aumento na força de corte específica com a diminuição da profundidade de corte. Esse efeito ocorre devido à diminuição do ângulo de cisalhamento, que por sua vez aumenta o coeficiente de atrito na face da ferramenta (NAKAYAMA e TAMURA, 1968).

Para Callister (2002), os materiais sólidos são agrupados em três classificações, baseadas principalmente na composição química e estrutura atômica, onde a maioria dos materiais se encaixa em um desses três grupos. São eles:

1. **Metais:** são extremamente bons condutores de eletricidade e calor, não são transparentes a luz visível, uma superfície metálica polida possui uma aparência lustrosa e são muito resistentes, porém deformáveis.
2. **Cerâmicos:** são compostos pelos elementos metálicos e não metálicos: são freqüentemente óxidos, nitretos e carbetos. Neste grupo, encontra-se o vidro. Estes materiais são isolantes à passagem de calor, são mais resistentes a altas temperaturas e a ambientes abrasivos do que os metais e polímeros, e são mais duros, porém quebradiços.
3. **Polímeros:** são os plásticos e borrachas, possuem baixa densidade e são extremamente flexíveis.

Porém, o autor adiciona outro grupo também muito importante para a engenharia:

- a. **Compósitos:** é projetado para mostrar uma combinação das melhores características de cada um dos materiais que o compõe. Exemplo, fibra de vidro que adquire resistência do vidro e a flexibilidade do polímero.
- b. **Semicondutores:** possuem propriedades intermediárias entre aquelas apresentadas pelos condutores elétricos e pelos isolantes. Este grupo

torna possível o advento dos circuitos integrados, que revolucionaram totalmente as indústrias de eletrônicos.

- c. **Biomateriais:** são aqueles implantados no interior do corpo humano, sendo que todos os materiais citados acima, podem fazer parte deste grupo.

Ainda podemos citar os materiais chamados de **avançados**, que podem ser de todos os tipos de materiais acima mencionados, cujas propriedades foram aprimoradas. São materiais utilizados em alta tecnologia. Por alta tecnologia pode-se dizer que são aquelas relativamente sofisticadas, como exemplos: vídeo cassete, aparelho de CD, computadores, fibras ópticas, espaçonaves, armazenamento magnético, circuito integrado, materiais usados em laser, etc.

Alguns dos materiais mais usados na usinagem de ultraprecisão estão listados na tabela 2.3 (SILVA, 1999).

Tabela 2.3 – Materiais usados na usinagem de ultraprecisão.

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

Fonte – SILVA, H. A.T. (1999).

2.3 – Influência do Comportamento Elastoplástico do Material sobre a Geração da Superfície

Durante a usinagem, o material está sujeito a uma alta pressão causada pela atividade do corte, derivando em uma deformação plástica e elástica. Livre desta pressão o material sofre uma recuperação tanto plástica quanto elástica, que é variável, dependendo da orientação cristalográfica do material que está sendo usinado. Conseqüentemente, uma ondulação na superfície poderá se formar, causando marcas e maior rugosidade na superfície usinada. A figura 2.2a, mostra o perfil ideal deixado pela ferramenta de corte. E a figura 2.2b, mostra o perfil real, após a recuperação do material. Nota-se que em b tanto a profundidade quanto à largura dos sulcos, deixada pela ferramenta, são maiores, e que, este efeito de recuperação distorce as marcas formadas na superfície usinada, além de adicionar uma rugosidade superficial, pois, a rugosidade teórica R_t , considera uma superfície ideal com ausência de deformações plásticas e elásticas ou outros fatores de distúrbios, tais como, erro no movimento do eixo árvore e vibrações da máquina, que são detectados pela geometria da ferramenta e velocidade de corte (TO et al, 2001).

Figura 2.2 – (a) Perfil ideal, (b) Perfil real.

Este efeito acarreta um resultado final que não é significativo em usinagem convencional. Porém, em torneamento com diamante não pode ser negligenciado, conforme pode ser comprovado por uma análise espectral (TO et al, 2001). Nesta análise, o perfil rugoso ao longo da direção axial da superfície torneada é medido, e identificam-se fatores que influenciam a rugosidade, causados pelo erro de rotação do eixo árvore, vibração e recuperação do material. Ou seja, através desta análise espectral é possível avaliar o desempenho da máquina-ferramenta e as propriedades do material usinado (SATA et al., 1985).

A figura 2.3; 2.4 e 2.5, obtidas com o TalySurf CCI 3000, representam uma imagem topográfica, um gráfico do perfil axial medido e um gráfico espectral, respectivamente, extraídos de uma superfície de cobre policristalino torneado com diamante. A rugosidade medida no sulco deixado pela ferramenta de diamante, no sentido de corte, foi de 0,593 nm, valor bastante significativo para uma usinagem de ultraprecisão.

Os metais policristalinos cúbicos de face centrada, como ligas de alumínio e cobre, são os materiais mais frequentemente usados para óptica metálica. A textura das superfícies usinadas com diamante em metais policristalinos é fortemente influenciada pelas propriedades anisotrópicas elásticas e plásticas do material da peça.

Figura 2.3 – Imagem topográfica (TalySurf CCI 3000).

Figura 2.4 – Gráfico do perfil médio (TalySurf CCI 3000).

Figura 2.5 – Gráfico espectral (TalySurf CCI 3000).

2.4 – Geração de Superfícies no Torneamento de Ultraprecisão

König (1991) diz que na usinagem de ultraprecisão, os parâmetros de corte são da ordem de micrômetros ou menores. Portanto, o processo de remoção de material e geração de superfícies torna-se crítico em razão da microindentação entre a aresta de corte da ferramenta e o material. Por exemplo, materiais policristalinos apresentam microestrutura com tamanho médio de grão da ordem de algumas dezenas a centenas de micrômetros, o que conseqüentemente torna as dimensões de usinagem muito menores que o tamanho médio dos grãos. Portanto, em seções de corte reduzidas (profundidade de usinagem versus avanço), a ferramenta estará cortando no domínio de um único grão.

Segundo König (1991), a microtopografia da superfície ou rugosidade resulta da transferência do perfil da ferramenta sobre a peça, sendo o movimento relativo entre eles especificamente controlado (Figura 2.6). Portanto, a rugosidade é gerada tanto pelo controle dos movimentos da máquina-ferramenta (movimento relativo entre ferramenta e peça) quanto pelas características de transferência do perfil da aresta cortante para a peça.

Jasinevicius, et al., (2004) faz essa mesma observação, dizendo que o perfil da superfície usinada é basicamente composto pela reprodução do perfil da ferramenta no plano normal à direção de corte. O processo de transferência de perfil poderá ser afetado pelo desgaste da aresta decorrente da sua interação com o material, ou em outras palavras, na afinidade interfacial. O diamante é um material conhecido por possuir pouca afinidade com uma ampla variedade de materiais. A aresta de corte de diamante é considerada como a que possui melhor fidelidade de transferência, sendo estimada da ordem de 10 nm. Portanto qualquer irregularidade, por menor que seja, na aresta de corte devido ao microlascamento ou outros fatores, pode ser reproduzida na superfície usinada, ver figura 2.6.

Figura 2.6 – Imperfeição da aresta de corte da ferramenta (CORREIA, 2004).

Para se obter superfícies com qualidade óptica, através do torneamento com ferramenta de diamante, é necessário que o processo introduza um baixo nível de energia à interface microscópica entre a aresta de diamante e a peça. Isto é necessário principalmente para retardar a interação química entre o diamante e o material da peça.

Além disso, temos a influência dos tamanhos de grãos já mencionados no trabalho. Operações de fabricação, tais como a laminação a frio, poderia ser usada a fim de se fazer a homogeneização agregada às propriedades da policristalização. Isto forneceria a textura aos grãos de cristais, isto é, grãos com a orientação preferencial. Em relação a este processo de fabricação, Jasinevicius et al. (2003), apresenta resultados obtidos da usinagem com diamante de ponta única em lidas de Al-Mg modificado mecanicamente e metalurgicamente. Duas diferentes amostras foram testadas com a mesma condição de corte (avanço e profundidade), com tamanho de grãos reduzidos e laminadas a frio (redução de 80%). As superfícies são avaliadas (rugosidade e microdureza) para validar a integridade da superfície. Na conclusão, ambas as estrutura fina de grãos quanto o encruamento do material, têm grande tensão de escoamento e em consequência um baixo efeito de anisotropia no material (JASINEVICIUS et al, 2003).

.2.5 – Geração de Microestruturas através de Torneamento com Ferramenta de Diamante

Um potencial futuro do mercado para peças usinadas de precisão está na manufatura de moldes de injeção complexos, como exemplo: sistemas de iluminação de carros. Um exemplo da indústria automotiva é mostrado na figura 2.7. Uma lente de lanterna traseira, típica de um carro, contém prismas Fresnel refrativos ao redor de seu centro e prismas adjacentes para reflexão interna total. Tradicionalmente, estas estruturas são sobrepostas em superfícies giratórias simétricas. A estrutura negativa da lente tem que ser usinada com diamante em um molde (BRINKSMEIER e PREUSS, 1997).

Figura 2.7 – Lentes plásticas moldadas por injeção, com zonas Fresnel, para lanternas de carros (BRINKSMEIER e PREUSS, 1997).

Novos projetos de lentes irão requerer zonas Fresnel a serem sobrepostas em superfícies assimétricas, com o requisito adicional de inclinações que mudam continuamente dentro de cada zona individual. Esta tarefa de usinagem pode ser resolvida por fresamento de topo cônico ou fresamento circunferencial cônico. Enquanto o primeiro processo requer quatro eixos CN (Comando numérico), o último somente pode ser realizado com cinco eixos CN, uma vez que o plano da ferramenta tem que ser posicionado tangencialmente com relação à inclinação local e a direção local da ranhura figura 2.8 (BRINKSMEIER e PREUSS, 1997).

Figura 2.8 – Fresamento circunferencial cônico de ranhuras Fresnel em superfícies assimétricas (BRINKSMEIER e PREUSS, 1997).

Com o objetivo de evitar desvios de contorno no fresamento circunferencial cônico, o raio da ferramenta deve ser minimizado. Para manter velocidades de corte razoáveis, são necessários fusos de alta frequência. Entretanto, ainda não foram totalmente analisados o desgaste da ferramenta, as propriedades dinâmicas da ferramenta e o desempenho de corte no fresamento de topo cônico com ferramenta de diamante (BRINKSMEIER e SCHMÜTZ, 1998).

Novas tarefas no projeto de máquinas-ferramenta e tecnologia de processo são óbvias em usinagem multieixos. Embora as unidades de controle para máquinas multieixos estejam disponíveis comercialmente, as máquinas de ultraprecisão com cinco eixos NC comandados e cursos de deslocamento de poucas centenas de milímetros ainda têm que ser desenvolvidas para manufatura de moldes de injeção. Para um ajuste mais fácil da ferramenta, seriam necessários dispositivos de medição que mostrem as posições laterais e angulares da ferramenta (BRINKSMEIER e SCHMÜTZ, 1998).

Elementos ópticos começaram a ser produzidos através de torneamento de ultraprecisão. Microestruturas, redes de difração, conjuntos de micro lentes/espelhos podem ser obtido por intermédio de relevos gravados na superfície de um material transparente ou reflexivo (KUMON et al., 2002).

Algumas funções ópticas podem ser “geradas” em uma superfície utilizando-se da usinagem de ultraprecisão. A Figura 2.9, apresenta alguns exemplos de microestruturas geradas com ferramentas rotativas de diamante.

a) Modelos de microranhuradas fabricadas com ferramentas de diamante (SORNSUWIT, 2000)

b) Padrão de calibração moldado por injeção em formato de CD com diferentes perfis de ondas senoidais (BRINKSMEIER e PREUSS e GESSENHARTER, 2001)

c) Microestrutura de uma lente de Fresnel feita através de difração usada para radiação interferométrica de luz branca (BRINKSMEIER e PREUSS, 2000)

d) Perfil de ranhura de uma rede de difração usada para radiação infravermelha (BRINKSMEIER e PREUSS, 2000)

Figura 2.9 – Exemplos de microestruturas fabricadas através de usinagem de ultraprecisão.

A Figura 2.10, apresenta exemplos de espelhos (a) e lentes (b) fabricadas através do torneamento com ferramenta de diamante com materiais não ferrosos e materiais tipicamente frágeis.

a) Espelhos metálicos planos, esféricos e anesféricos e b) Lentes anesféricas produzidas em cristais semicondutores

Figura 2.10 – Exemplos de componentes ópticos fabricados através do torneamento com ferramenta de diamante.

Todavia, o custo envolvido na fabricação desses produtos é relativamente elevado fazendo com que se busquem alternativas para serem produzidos em lotes grandes. Isto tem sido amplamente discutido em termos de novas aplicações e integração com outros processos, a fim de minimizar custos. A viabilização da fabricação de microestruturas e microelementos ópticos estão intimamente relacionados à fabricação de moldes para replicagem (KUMON et al, 2002).

O processo de moldagem por microinjeção, por sua vez, também está sendo investigado utilizando microestruturas fabricadas através de usinagem de ultraprecisão (MICHAELI et al, 2002). Esta tecnologia permite a reprodução de microestruturas em plástico, cerâmica e metal. Estas microestruturas são aplicadas como componentes em micro-ótica, dispositivos ou em cirurgias com invasão mínima. Para se minimizar custos e alcançar alta eficiência econômica, a produção de micro inserto é uma alternativa para reduzir custos de montagem (PIOTTER et al, 2000).

Outra preocupação que surge com este tipo de tecnologia refere-se à qualidade das microestruturas reproduzidas. Microlentes moldadas por injeção apresentam uma qualidade inferior àquelas fabricadas convencionalmente, principalmente devido ao processo de fabricação por injeção. Para melhorar a qualidade de microcomponentes produzidos por replicação é importante conhecer a qualidade dos respectivos moldes. Assim, não é importante apenas obter informações sobre a qualidade da topografia da superfície, mas também do efeito óptico dos moldes em relação ao desempenho que a

topografia replicada da superfície possa apresentar (SCHNEIDER et al, 1999 e HÜBNER et al, 2002).

O conhecimento da cadeia produtiva para obtenção de produtos com qualidade e fidelidade funcional passa por detalhes que ainda merecem investigação e desenvolvimento (WECK et al, 2002 e CHENG et al, 2002).

Apesar de, no Brasil, esta tecnologia encontrar um campo restrito de centros de pesquisa, sua importância tem-se revelado muito abrangente.

2.6 – Geração de Microestruturas

Um dos métodos mais comuns utilizados hoje em dia para a geração de microlentes, é a utilização de um servo (*fast tool servo*). Neste processo, a posição da ferramenta de diamante é controlada de acordo com o posicionamento angular da peça durante a usinagem. Desde que a ferramenta de diamante é usualmente montada em uma carcaça de atuadores piezelétricos, a frequência de resposta de um dispositivo pode ser extremamente alta comparada a um dispositivo mecânico em um torno de ultraprecisão. Uma aproximação usada é baseada no *feedback* do controle de um dispositivo mecânico na usinagem de ultraprecisão, e por esta razão é referido como um processo *Slow Tool Servo* (STS) (YI e LI, 2005). Para uma maior compreensão, pode-se pesquisar o artigo de Carlos Umberto Burato com o título: Usinagem de ultraprecisão realizada com um porta-ferramenta acionado por atuador piezelétrico (2005).

A manufatura de ranhuras Fresnel concêntricas com alturas microscópicas de degraus é um exemplo típico para torneamento no eixo de microestruturas. Os perfis das ranhuras podem ser retos ou curvos. As aplicações típicas para lentes Fresnel são as telas de retro-projetores, telas de projeção de TVs e elementos ópticos difrativos (figura 2.11).

Figura 2.11 – Molde para uma lente bifocal intracocular com ranhura Fresnel hiperbólicas (esquerda) e lente de retopojetor com ranhuras Fresnel retas (direita) (BRINKSMEIER e PREUSS, 2000).

As próprias peças de ultraprecisão também podem ser de tamanho microscópico, a exemplo do que se faz na manufatura de alvos de ondas de choque para pesquisa de fusão. As lâminas de alvo são feitas de ouro ou alumínio. Os seus perfis incluem degraus e rampas definidos. Uma imagem SEM de uma lâmina de alvo de alumínio com um diâmetro de $640\ \mu\text{m}$ é mostrada na figura 2.12.

Figura 2.12 – Imagem SEM de uma lâmina de alvo de alumínio com um degrau duplo de $7,5\ \mu\text{m}$ (esquerda) e imagem AFM de um degrau simples de $1,5\ \mu\text{m}$ sobre uma lâmina de alvo (direita) (BRINKSMEIER e SCHMÜTZ, 1998).

Para manufaturar os alvos de alumínio, Brimksmeier e Schmütz (1998) relatam sobre um mandril plano com rebaixos concêntricos que foi torneado com diamante em um raio fora de centro. Um volume bem definido de adesivo foi colocado dentro das ranhuras e um disco de alumínio torneado com diamante foi colocado no mandril. A

estrutura de degraus requerida foi torneada com diamante em um padrão de anel concêntrico usando uma ferramenta de diamante com um raio de ponta de $5\ \mu\text{m}$. Finalmente, os alvos individuais foram cortados com uma fresa miniatura e o adesivo foi dissolvido em um banho com acetona (BRINKSMEIER e SCHMÜTZ, 1998).

Na geração de microestruturas, a deformação plástica é freqüentemente identificada como um problema principal (MASUZAWA e TÖNSHOFF, 1997). Desde que Shamoto e Moriwaki, (1994) demonstraram a redução das forças de processo pela aplicação de vibração a uma ferramenta de corte, Brimksmeier e Schmütz, (1998) propõem empregar processos auxiliados por vibração ultra-sônica, para reduzir a deformação plástica na manufatura de microestruturas.

Em vista disso, o corte com vibração está sendo atualmente investigado no corte com diamante do cobre OFHC, cobre galvânico e substratos de níquel não-eletrolítico.

2.7 – Replicagem

Polímeros ópticos prometem uma solução para baratear sistemas ópticos caros. Com isso, os processos de replicagem e produção devem ser sondados para o desenvolvimento de uma compreensão maior das capacidades e suas limitações.

A tecnologia de replicagem está tendo um papel cada vez mais importante na produção de microsistemas ópticos e elementos micro-ópticos. Prensagem a quente, Moldagem por injeção e Cura de Fotopolímeros através de Ultravioleta, são as principais técnicas investigadas. Como principal vantagem pode se citar a produção maciça de microestruturas ópticas e nanométricas a um baixo custo (GALE et al., 2005).

A tecnologia de replicagem é capaz de atingir resoluções extremamente altas (características bem abaixo de 100 nm). Desta maneira, esta é uma tecnologia ideal para a produção de componentes e moldes para micro sistemas ópticos.

Os passos do processo envolvido são basicamente os mesmos para todas as abordagens e envolve a fabricação de uma microestrutura (relevo), a formação de um molde adequado para este relevo e a produção de réplicas em polímeros ou em outros materiais para este molde. Exemplos comuns podem ser os CDs (molde por injeção) e hologramas de segurança em cartões de crédito (prensagem a quente) (GALE et al., 2005).

A tecnologia de replicagem é atrativa primeiramente por três razões:

- 1- Definição: a tecnologia de replicação pode reproduzir características de microestruturas de alta resolução. Por exemplo: é relativamente fácil estampar a quente em lâminas poliméricas microestruturadas com largura abaixo de 100 *nm*.
- 2- Flexibilidade do perfil: ambas as microestruturas de relevo binário ou contínua podem ser replicadas a partir de um molde. O molde fabricado torna-se mais difícil com a complexidade da microestrutura incrementada, mas a réplica subsequente é basicamente independente desta.
- 3- Baixo Custo: a fabricação de um molde com grande fidelidade (microestrutura e nanoestrutura) pode ser relativamente caro, mas o processo de replicagem resulta em baixo custo por réplica, tornando-se um processo comercialmente competitivo.

2.8 – Métodos de Produção Óptico

Atualmente os métodos de produção óptica incluem a utilização de vidros e polímeros. A escolha do método de produção depende da aplicação: quantidade produzida, forma óptica e estabilidade (Gill, 2002).

Métodos de produção óptica utilizando vidro

Por muitos anos, o vidro tem sido o material favorecido para sistemas ópticos. O vidro é resistente ao risco, tem um coeficiente de expansão térmica baixa, e exibe uma boa uniformidade das propriedades. Entretanto o vidro é pesado, frágil e difícil de produzir em grandes volumes com forma das bordas afiadas (ópticas difrativas, lentes de fresnel, por exemplo) na zona óptica. Os métodos mais comuns de produção óptica com vidro são: Lapidação (*Grinding*), Litografia/Ataque Químico (*Lithography/Etching*) e Moldagem por Injeção (*Injection Moulding*) (Gill, 2002).

Métodos de produção óptica utilizando polímeros

Baixa precisão óptica tem sido replicada em polímeros por muitos anos. As vantagens dos polímeros incluem seu peso leve, resistência, baixo custo e a habilidade de ter as superfícies projetadas localizadas e montadas com as partes da óptica (Gill, 2002).

Os métodos preliminares de produção de polímeros ópticos são: Cura de Fotopolímeros através de Ultravioleta (*Ultraviolet Cure Photopolymers*), Fundição em Epoxy (*Epoxy Casting*), Moldagem por Compressão (*Compression Molding*), Prensagem por Rolo (*Roll Embossing*), Litografia (*Lithography*) e Moldagem por Injeção (*Injection Molding*) (Gill, 2002).

- **Cura de Fotopolímeros através de Ultravioleta (*Ultraviolet Cure Photopolymers*).**

Polímeros ópticos são produzidos através de radiação ultravioleta induzida através de elementos de ligação do monômero chamado fotopolímeros.

O monômero é derramado em um molde e coberto com vidro ou alguma outra substância que é transparente a luz UV. A radiação UV causa no monômero uma ligação transversal, dando forma a uma lente rígida ou semi-rígida. Este método é capaz de produzir características com relações de aspecto elevadas (profundidade dividido pela largura) e permite a opção de ter substância química adesiva promovendo a aderência do polímero no vidro e aos outros materiais. O processo UV tem algumas limitações críticas, entretanto, um lado do molde deve ser transparente à radiação UV. A maioria dos materiais transparentes aplicáveis são frágeis ou difíceis de se fazer em máquinas. Adicionalmente, remover a peça do molde é frequentemente difícil, especialmente se o polímero é aderido a um lado do molde. A cura leva tempo e o molde é ocupado durante este tempo. Para conseguir a produção de volumes elevados, muitos moldes devem ser usados (Gill, 2002).

- **Fundição em Epoxy (*Epoxy Casting*)**

Fundição em Epoxy (*Epoxy Casting*) é um processo similar a Cura de Fotopolímeros através de Ultravioleta, exceto que o elemento de ligação do processo seja induzido por reação química de “endurecimento” com um adesivo.

A reação química é um processo exotérmico em que o calor produzido pode causar inexactidão nas dimensões ópticas e pode também induzir tensão. A maioria das colas epoxy não tem alta transmissividade para ser usada em sistemas ópticos refrativos, e assim devem ser usadas no sistema óptico reflexivo somente (Gill, 2002).

- **Moldagem por Compressão (*Compression Molding*)**

Micro-óptica reflexiva-difrativa é freqüentemente replicadas em moldagem por compressão na forma, por exemplo, de C.D. (compactos discos) e D.V.D. (discos de vídeo digital). No molde de compressão, uma folha ou um pó do polímero é colocado entre duas placas molde aquecidas. A força e o calor são aplicados, então as placas fazem com que comprima lentamente o polímero e fornecem-no às características do molde enquanto derrete. Uma vez que as características foram preenchidas, o molde deve ser refrigerado abaixo da temperatura de transição vítrea (T_g), fazendo com que o polímero seja ejetado do molde com sucesso. Este processo é lento, com certas vezes de ciclo, devido à necessidade de aquecer o polímero acima da temperatura vítrea. Uma das vantagens do molde de compressão é também uma de suas limitações maiores. Refrigerar as placas-molde da temperatura de derretimento do polímero a sua temperatura vítrea é um processo lento devido à massa térmica das placas do molde. Esta velocidade lenta pode limitar a velocidade de produção do processo, mas permite também que a peça refrigere lentamente, limitando as tensões induzidas na peça (Gill, 2002).

- **Prensagem por Rolo (*Roll Embossing*)**

Prensagem por Rolo (*Roll Embossing*) é uma extensão do processo de compressão que promove a tecnologia de produção em massa. Em prensagem por rolo,

um grande cilindro, freqüentemente cobre, tem sido usinado com as características desejadas. Enquanto uma película do polímero passa sobre o rolo girando, as características são pressionadas na película que imprime estas características. Esta tecnologia é usada para fazer muitos itens que requerem grandes áreas e características ópticas reflexivas e transmissíveis, tais como sinais de entrada e tela lisa de TV. O processo é excelente para produzir grandes arranjos de sistema óptico, mais é pouco prático para produzir o sistema óptico individual, para o uso em conectores ópticos de fibra ou em circuitos integrados em eletrônica (Gill, 2002).

- **Litografia (*Lithography*)**

A Litografia (*Lithography*) foi desenvolvida para uso na indústria de circuitos integrados. A litografia é usada de duas maneiras diferentes na produção de sistemas ópticos poliméricos. O primeiro método usa litografia para criar diretamente um polímero óptico em uma carcaça. O segundo método cria uma estampa molde que é usada para replicações ópticas em um processo de prensagem a quente ou molde de injeção. Ambos os processos começam da mesma maneira com um polímero, freqüentemente acrílico (GILL, 2002).

Na litografia, a radiação que passa através dos entalhes localizados freqüentemente a um tamanho muito pequeno, reduzindo-se a uma lente, enquanto que em liga, a natureza altamente paralela da radiação é usada para criar pequenas estruturas profundas. Nas posições onde a radiação é incidente há resistência a degrada. Esta resistência (degradação) é removida, então se usa uma substância química corrosiva que deixa uma replicação padrão na mascara (Gill, 2002).

A complexidade da etapa de litografia depende do tipo de elemento óptico difrativo (EOD) que se está construindo. Para microrelevos com apenas dois níveis de fase é necessário apenas uma máscara de exposição e o processo é relativamente simples. Para o caso onde se quer discretizar um microrelevo em mais dois níveis de fase, deve-se garantir um alinhamento o mais preciso possível (CIRINO, 2002).

- **Moldagem por injeção (*Injection Molding*)**

Nesta técnica injeta-se um material plástico fundido numa câmara sob temperatura controlada, onde está o microrelevo que se quer replicar. O polímero é esfriado e solidifica-se, quando é então separado do molde (PASCO e EVEREST, 1978). A maioria de produtos de consumo, tais como lentes de Fresnel para projetores e câmeras e discos compactos (CDs) para a reprodução de áudio, são fabricados a partir de moldagem por injeção. Ela é apropriada tanto para estruturas com relevos relativamente rasos ($<1\ \mu m$) quanto para estruturas com alta razão de aspecto (profundidade $\gg 1\ \mu m$) (BRENNER et al, 1993). Tais réplicas têm custo mais elevado em relação às fabricadas por prensagem a quente, porém esta tecnologia tem potencial para produzir microrelevos de melhor qualidade em substratos (de PMMA e policarbonato) espessos (maiores que 1 mm de espessura) (CIRINO, 2002)

Neste processo, o polímero é derretido por um parafuso da extrusão e então injetado em alta velocidade e alta precisão em um molde. O molde de injeção tem a vantagem de volumes muito elevados de produção e da habilidade de incluir as características da montagem e do alinhamento da óptica, aliviando a necessidade de pós-processo, selecionar e montar. Os tempos de ciclo variam de alguns segundos a alguns minutos, entretanto esta velocidade tem um preço devido à larga escala da temperatura e da pressão experimentada pelo polímero em um curto tempo. Enquanto o polímero é injetado no molde, ele está refrigerado perto das paredes do molde e começa a aumentar a viscosidade. O polímero encolhe-se afastando-se das paredes do molde e é forçado, então, para trás. Este processo pode causar tensões. Adicionalmente, o encolhimento impede que o polímero tenha exatamente as mesmas dimensões que o molde (Gill, 2002).

Compreende-se, entretanto, que se os parâmetros do processo estiverem corretos, estas tensões podem ser minimizadas e a peça pode ser produzida com as dimensões muito similares àquelas do molde, entretanto esta correlação entre os parâmetros do processo e as dimensões finais da parte não é muito bem entendida. O molde de injeção é visto ainda como parte da ciência e parte da arte, confiando pesadamente na experiência do técnico do molde (Gill, 2002).

Cirino (2002) coloca outras técnicas como:

- **Eletrodeposição**

A resolução e fidelidade do processo de eletrodeposição são muito maiores que a resolução e fidelidade do processo de replicagem em si, de forma que todo erro entre o microrelevo original e o microrelevo replicado provém do processo de replicagem. A vasta maioria das matrizes de microestruturas é eletrodepositada em níquel, devido ao baixo nível de estresse da camada metálica eletrodepositada. Caso a superfície do original não seja condutora, é necessário a deposição de um filme metálico na superfície do original, com espessura típica de 50 nm. Esta deposição pode ser feita via evaporação, ou *sputtering*, em geral de ouro. Este substrato condutor é então eletrodepositado com níquel, o qual, após a separação do original, compõe a matriz metálica para a replicagem de EOD. Espessuras típicas para a matriz metálica encontram-se entre 50 e 100 μm . Uma técnica importante aplicável na replicagem de EODs é a recombinação de pequenas matrizes individuais num filme polimérico de maior área, via prensagem a quente. Em seguida, faz-se uma segunda eletrodeposição sobre o filme polimérico. Este procedimento bastante eficaz possibilita a replicagem de múltiplos dispositivos em apenas uma etapa de gravação (CIRINO, 2002).

- **Prensagem a quente**

Esta técnica é bastante atrativa, pois a partir de um equipamento relativamente simples, é capaz de replicar estruturas com bastante fidelidade, em áreas de até 10 x 10 cm^2 . Esta técnica consiste em submeter o polímero (tipicamente um filme de policarbonato) a uma temperatura consideravelmente acima da Tg (tipicamente mais que 50°C acima), e sob pressão. O equipamento pode ser do tipo estampa ou do tipo cilindro rolante. É largamente empregada em estruturas holográficas para segurança. A prensagem por estampa fornece excelente resolução para estruturas com dimensões horizontais submicrométricas de baixa razão de aspecto. Prensas com cilindros rotativos são mais rápidas e baratas, porém menos adequadas para estruturas profundas ($> 1 \mu\text{m}$). Estruturas com alta razão de aspecto podem ser obtidas, porém com etapas de cura mais adequadas, aumentando o tempo e custo do processo de replicagem (HERZIG apud CIRINO, 2002).

- **Aplicação por centrifugação e cura**

Esta técnica consiste na aplicação de uma resina (PMMA ou policarbonato, por exemplo) num substrato rígido com o microrelevo, tais como níquel, alumínio ou silício. Em seguida o sistema é submetido a ciclos térmicos de modo que a temperatura da resina polimérica atinja a temperatura de transição vítrea, Tg. Em seguida o sistema é esfriado até a temperatura ambiente quando é feita a separação do molde e da réplica. A centrifugação e cura são particularmente atrativas para fabricar microestruturas de alta razão de aspecto e elementos híbridos. Uma desvantagem é o tempo gasto no ciclo térmico (várias horas), o qual se torna proibitivo para certas aplicações. No entanto com novas tecnologias de cura de resinas através de exposição ao UV, este processo é bastante rápido.

As técnicas de replicagem de maior volume de produção é a prensagem por rolo e a moldagem por injeção é a capacidade de replicar, numa peça única, partes mecânicas de sustentação e as partes “ópticamente ativas”. Desta forma, o custo final do produto é consideravelmente diminuído (CIRINO, 2002).

- **Corrosão por plasma**

Juntamente com a litografia, a corrosão por plasma é certamente uma etapa-chave para uma fabricação bem sucedida de EODs. Em particular, a taxa e a uniformidade de corrosão devem ser muito bem controladas, de forma que a altura do relevo obtido seja exatamente aquela que proporciona o atraso de fase desejado.

Na corrosão por plasma, o material é removido de um substrato através de uma combinação de bombardeamento iônico e mecanismos de reação química.

Os equipamentos de corrosão são categorizados de acordo com o nível de energia de bombardeamento iônico, densidade de íons presentes na descarga, a forma de acoplamento de energia ao plasma (capacitiva ou indutiva), se o plasma é gerado remota ou juntamente ao substrato a ser processado, pressão de trabalho, etc. Existem inúmeras configurações de reatores utilizados na corrosão por plasma (COOK, 1987; DOWNEY e BOTTOMS, 1981 apud CIRINO, 2002). Cada equipamento exhibe características próprias de acordo com as exigências de cada processo.

2.9 – Replicagem de Elementos Ópticos

Blough et al (1997) desenvolve técnicas de usinagem que usam o potencial de maquinário preciso de torneamento com ponta única de diamante para gerar superfícies molde de metal forte apropriadas para replicagem de superfícies difrativas visíveis e quase infra-vermelhas. Utilizando várias técnicas de replicação, eles podem manufaturar eficientemente uma variedade de diferentes configurações de componentes ópticos para promover ótimo desempenho e alta eficiência de difração.

Replicação fornece a habilidade de produzir economicamente múltiplos elementos difrativos com mínimo custo de ferramenta. O primeiro passo num processo de replicação é gerar uma superfície molde de alta fidelidade num material de substrato adequado.

Elementos Ópticos Difrativos (EODs) podem ser fabricados empregando-se a tecnologia de processamento de circuitos integrados (CIs) e microestruturas, a partir de um projeto óptico conveniente, o qual irá gerar as máscaras de fotolitografia (ou os padrões a serem escritos através de técnicas de litografia por feixe de elétrons, por exemplo). Os materiais tipicamente usados são: a sílica fundida, silício, arseneto de gálio, além de polímeros de diversos tipos como a resina fotossensível Novolak, PMMA e policarbonato (CIRINO, 2002).

Os EODs podem ser replicados através de técnicas como prensagem a quente, injeção, ou centrifugação e cura. Neste processo de replicagem, um modelo de alta qualidade é fabricado por técnicas de micro usinagem, o qual posteriormente é empregado como molde numa linha de produção em escala. Desta forma, o custo do equipamento com EODs em seu interior torna-se menor, aumentando a competitividade deste produto no mercado.

Considerando os processos de fabricação disponíveis listados por Blough et al (1997), a superfície molde pode ser fabricada em materiais incluindo fotoresinas, sílica fundida e metais torneados com diamante. Apesar de haver vários artigos em processo de replicação poucos, se algum identifica claramente o processo todo. Isso é devido à sensível natureza desses processos, e tipicamente o núcleo de competência da companhia, ao qual deve ser protegido.

O típico processo de replicagem de elementos ópticos difrativos inclui vários passos. O primeiro passo é gerar um submolde, que tem o perfil oposto da superfície molde. Os passos de fabricação subseqüentes geram mais submoldes, cujos perfis de

superfície, alternam entre serem idênticos e opostos à superfície molde. A vida de um submolde é geralmente limitada por defeitos que ocorrem progressivamente durante a separação das replicas. A camada de material replicado é usualmente termo-tratada com epoxy ou tratada com fotopolímeros ultravioleta (UV). O índice de refração do material replicado precisa ser conhecido no projeto de comprimento de onda para otimizar a eficiência de difração, BLOUGH et al (1997).

2.10 – Processos de Fabricação de Elementos Ópticos Difrativos

As tecnologias de replicagem tais como injeção e moldagem são bastante atrativas para o mercado de óptica difrativa e micro-óptica, pois são capazes de diminuir substancialmente o custo final de EODs (ou de produtos com EODs embutidos). Devido ao fato da maior parte da pesquisa sobre esta tecnologia ter sido feita por companhias privadas, a literatura é escassa e muitas vezes mantida em segredo industrial.

Estas tecnologias de replicagem possibilitam transferências de microrelevos com alta fidelidade (erro da ordem de alguns nanômetros), permitindo fabricação de microrelevos complexos sobre uma grande área (vários cm^2), a baixo custo e alto volume de produção (Gale, 1997).

Exemplos de microrelevos de alta resolução rotineiramente construídos empregando-se a técnica de prensagem a quente, são redes de difração para aplicação em espectroscopia de emissão, estruturas holográficas para aplicação em sistemas de segurança e fabricação de discos compactos de áudio (CDs) e de vídeo (DVD) (ASAEDA e PALERMO et al, 1995).

Os materiais comumente utilizados para a produção de réplica são polímeros termoplásticos tais como o policarbonato (PC), o policloreto de vinila (PVC), polimetilmetacrilato (PMMA), resinas fotossensíveis do tipo Novolak e resinas curadas por radiação UV (NOA 61, por exemplo). A tabela 2.4 mostra algumas propriedades ópticas mecânicas de polímeros empregados com maior frequência (CIRINO, 2002)

A figura 2.13 mostra esquematicamente uma visão geral do processo de replicagem de EOD. A tecnologia é aplicada para uma extensão de elementos ópticos e microestruturas ao qual pode ser realizado (GALE et al, 2005). Os elementos da estrutura podem variar de nanoestruturas difrativas a microlentes refrativas e complexas combinações de vários elementos (GALE et al, 2005).

O molde-multiplicado (*shim*) é geralmente uma cópia, em metal, do EOD original, fabricado a partir de processos VLSI. O material no qual o EOD original é fabricado pode ser fotorresiste, sílica fundida, silício ou virtualmente qualquer material conveniente que proporcione a resolução desejada na transferência dos padrões da microestrutura tal como filme fino a:C-H

Tabela 2.4 – Propriedades ópticas e mecânicas de polímeros empregados com maior frequência na replicagem de elementos ópticos difrativos (EOD).

Material	Replicagem	Índice de refração (n) 633 nm	Faixa de transmitância típica (nm)	Transição vítrea (°C)	Fabricante
PC	Moldagem por injeção Prensagem a quente	1,58	380 – 1600	145	Rohm, GE, Bayer
PMMA	Moldagem por injeção Prensagem a quente Deposição e cura	1,49	400 – 1100	94 – 108	Rohm, Degussa
PVC	Moldagem por injeção Prensagem a quente por rolo	1,54	400 – 2200	75 – 105	Hoechst, BF Goodrich
NOA 61	Deposição e cura UV	1,56	350 – 2000	-	Norland Prod Inc

Fonte – (HERZIG apud CIRINO, 2002).

Cada elemento de matriz multiplicada é fabricada a partir do original através de técnica de eletrodeposição, geralmente feita a partir de níquel, a qual servirá como matriz efetiva para a replicagem. Esta seqüência é feita várias vezes de forma a obter-se um molde metálico, com várias réplicas alinhadas (*shim*), mais conveniente para produção em larga escala. Há três principais técnicas de replicagem: i) prensagem a quente, ii) aplicação por centrifugação e cura, iii) moldagem por injeção, vide figura 2.13.

Figura 2.13 – Visão geral dos processos de replicagem. O microrelevo original é copiado através de eletrodeposição em Ni até que se obtenha um “shim”. A replicagem é feita por moldagem a quente, aplicação de resina ou por injeção (GALE et al, 2005).

Depois da deposição por feixe de elétrons, a produção em massa das réplicas segue, então, usando uma das três tecnologias principais de replicagem (GALE et al, 2005).

- Prensagem a quente – tipicamente em lâminas poliméricas;
- Deposição e cura – replicação em polímero com secagem UV ou sol-gel;
- Moldagem por injeção – de componentes ou microsistemas completos em materiais poliméricos.

Materiais para prensagem a quente em microestruturas ópticas incluem polímeros como também policarbonatos ao qual podem ser estampados com chapa ou moldagem por injeção para produzir elementos ópticos de alta qualidade. A prensagem a quente de lâminas de polímeros, ou mesmo a lâmina metalizada do polímero é bem estabilizada e usada extensamente para produção em massa para o mercado de empacotamento e acondicionamento para elementos ópticos difrativos (EODs) e avançada certeza da característica. Tipicamente microestruturas replicadas por prensagem por rolo têm largura de linha abaixo de 500 nm e relevo de profundidade acima de 1 μm (GALE et al, 2005).

A replicagem em polímeros a partir do molde metálico deve ser um processo de alta resolução. Estruturas de aproximadamente 200 nm de altura de degrau podem ser resolvidas pela técnica de prensagem a quente num filme de policarbonato (GALE, 1997). De fato, a fidelidade na replicagem de tais estruturas é fortemente dependente da razão de aspecto da mesma: estruturas com razão de aspecto 1:1 são facilmente obtidas; estruturas 1:10 são muito difíceis de obter, enquanto que estruturas 1:5 podem ser replicadas otimizando-se o processo (CIRINO, 2002).

A seguir é apresentada a fabricação de matrizes de microlentes, utilizando técnicas de replicagem em materiais moldáveis e de baixo custo (polímeros como o PMMA ou o policarbonato), a partir de um micromolde em silício.

2.11 – Moldes de Microlentes de Baixo Custo Fabricadas em Polímeros, a partir de Micromoldes

O desenvolvimento de dispositivos ópticos fabricados a partir de técnicas de produção em escala é um fator importante para a absorção destes produtos pelo mercado de consumo.

No presente caso de moldes de microlentes, a principal aplicação destes tipos de dispositivos é a divisão de um feixe de luz laser em grande ângulo (NETO et al, 2001).

A máscara fotolitográfica utilizada na confecção do micromolde em silício consiste numa estrutura repetitiva de linhas e espaços, com dimensões de 90 e 10 μm respectivamente. O polímero utilizado nas réplicas das microlentes foi o polimetilmetacrilato (PMMA), através da técnica de aplicação por rotação centrífuga seguida de uma etapa de cura adequada (CIRINO, 2002).

Da mesma forma que os dispositivos fabricados em polímero, deve-se fazer uma caracterização óptica preliminar do PMMA, de forma a se determinar em qual faixa de comprimento de onda este dispositivo pode operar. A figura 2.14 mostra uma curva de transmitância de resina PMMA, obtida via espectrofotometria UV-Vis-NIR. Após sua preparação, o polímero foi depositado, a espessura do filme depositado foi da ordem de $100\ \mu\text{m}$). Observa-se que esta resina pode ser empregada na fabricação de dispositivos ópticos que operam em toda a faixa do espectro visível, até cerca $2500\ \text{nm}$, correspondente próximo ao infravermelho (CIRINO, 2002).

Os parâmetros analisados na fabricação tanto do molde em silício quanto da réplica em PMMA, durante estes experimentos foram i) a secção transversal resultante; ii) a rugosidade superficial induzida pelo processo de corrosão do molde; iii) a profundidade máxima alcançada durante a corrosão do molde; iv) a uniformidade das estruturas obtidas e v) a distribuição luminosa gerada pela réplica (CIRINO, 2002).

Figura 2.14 – Curva de transmissão da resina PMMA, obtida via espectrofotometria UV-Vis-NIR. Possibilidade de operação em toda a faixa do espectro visível, até cerca $2500\ \text{nm}$ (CIRINO, 2002).

Uma vez fabricado o molde em silício através de sua microusinagem, pode-se executar o processo de replicagem. A replicagem através de deposição e subsequente etapa de cura de polímero é bastante conhecida, pois é uma forma econômica de

produzir elementos ópticos. Inicialmente o polímero (Evalcite PMMA 2041, 20% em peso) deve ser diluído numa solução de uma parte de metil isobutil cetona e uma parte de xileno. Em seguida, o polímero é aplicado sobre o molde em silício através de centrifugação: 100 rpm, durante 10 segundos (CIRINO, 2002).

A etapa crítica deste processo é a pós-cura: deve-se elevar a temperatura lenta e gradativamente de forma que o solvente seja evaporado do polímero sem deixar bolhas ou rachaduras no interior do mesmo. A temperatura é elevada até que se atinja uma temperatura levemente acima da temperatura de transição vítrea do PMMA ($t_g = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$), quando este deve “fluir”, preenchendo os espaços do micro relevo existente no silício, gerando uma réplica fiel ao molde. O ciclo de cura consiste em quatro etapas de “rampas térmicas”: inicialmente a temperatura da amostra deve permanecer em 25°C durante 20 minutos; a seguir a temperatura é elevada até 40°C , a uma taxa de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, quando esta taxa é dobrada e a temperatura da amostra atinge $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. A terceira “rampa térmica” ($0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$) eleva a temperatura da amostra até $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Finalmente a quarta térmica ($0,75\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$) eleva a temperatura da amostra até $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, quando a chapa quente foi desligada e a amostra resfria-se espontaneamente até a temperatura ambiente (CIRINO, 2002).

Uma vez esfriada a amostra, o molde e a réplica são separados através de um jato de nitrogênio (CIRINO, 2002).

2.12 – Prensagem a Quente de Microestruturas e Canaletas para Microfluido

Fabricação de microsistemas usando substrato de plástico tornou-se mais prevalente em recentes literaturas com força direcionada ao desenvolvimento de baratos dispositivos analíticos. Prensagem a quente é um método de microfabricação polimérica que tem a promessa significativa nesta área porque os dispositivos poliméricos idênticos podem ser produzidos usando um molde para estampar repetidamente uma imagem. A maior desvantagem da prensagem a quente em um ajuste de pesquisa é o tempo e a despesa necessárias para produzir um molde capaz de suportar a temperatura e a tensão do processo de prensagem (KOERNER, et al 2005).

Moldes de epoxy são relativamente baratos, rápidos de produzir (confeccionar) e duráveis, suficientemente para múltiplos ciclos de prensagem ($n > 50$) (KOERNER et al, 2005).

As “ferramentas”, estampa de epoxy, podem ser micromoldadas de um molde tanto positiva ou negativa e é compatível com um número de materiais incluindo SU-8 resistente em silicone, PDMS ou vidro. A baixa viscosidade para a pré-curagem epoxy permite a reprodução de microestruturas com dimensões abaixo de $1 \mu m$ e permite a transferência destas pequenas estruturas para PMMA pela prensagem a quente sem perda de detalhes. O processo de fabricação de prensagem pode ser executado em menos de 4 horas. Quando o processo é combinado com as capacidades prototipagem do dispositivo de micro fabricação SU-8/silicone o processo todo de fabricação de microchips pode ser completado em 24 - 48 horas (KOERNER et al, 2005).

A primeira geração de dispositivos microfluidos foi construído de vidro principalmente devido aos procedimentos da fabricação pedidos pela indústria microeletrônica. Os dispositivos de vidro, entretanto são relativamente caros por causa da fotolitografia e pelo ataque químico requerido pelo procedimento da produção de cada microdispositivo. Em adição, o processo de fabricação não serve para rápidas modificações de projeto de dispositivo. Materiais poliméricos são vistos como a alternativa promissora ao vidro convencional porque causam a diversidade dos materiais disponíveis, ao qual provém uma larga escala de propriedades superficiais/materiais e dos vários métodos de avaliação disponíveis para a fabricação de dispositivos incluindo ataque químico, prensagem, moldagem por injeção, termoformagem e remoção por laser (KOERNER et al, 2005).

Microfabricação em materiais poliméricos usando prensagem a quente tem recolhido muito interesse devido a sua habilidade de imprimir estruturas em materiais poliméricos usando uma pré-forma mestre ou ferramenta. O material é aquecido a sua temperatura de transição vítrea (T_g) seguida pela impressão com um molde microusinado utilizando variável (KN) de força de prensagem (KOERNER et al, 2005).

A chave para este processo é o desenvolvimento de um molde robusto e uma replica em que ambos possam suportar múltiplos ciclos de temperatura, como também, as forças significantes de prensagem (KOERNER et al, 2005).

Eletrodecomposição com níquel produz um molde durável, mais caro, devido aos processos de manufatura complexos requeridos, e porque resultados diretos, não permitem modificações de projeto rápido do dispositivo. Os processos maciços de

fotolitografia (por exemplo, SU-8) como também as fotolitografias combinadas com o processo de *Koh etching* e *wafers* de silicone, permitem uma produção e uma modificação mais rápida do molde gravado. Entretanto estes moldes têm uma vida limitada (<5 ciclos em alguns casos) no caso de prensagem, devido a rachar e a entortar a altas tensões e temperatura de ciclos no processo de prensagem (KOERNER et al, 2005).

Superfícies largas e planas de PMMA foram gravadas a quente com um molde de epoxy usando um sistema de prensagem a quente da HEX01 (Jenoptik Microtechinik, Jena, Germany). Em uma experiência o molde de epoxy e o substrato pré-usinado de PMMA, foram montados em placas de aquecimento onde se grava em relevo e uma macro predefinição que controlasse a temperatura, pressão e tempo de gravação. O substrato de PMMA e o molde de epoxy (ferramenta) foram aquecidas a 45°C, a câmara foi fechada a uma força de contato de 250 N foi aplicada por 30s, a câmara foi retirada e a temperatura foi trazida para 115°C (Tg para PMMA é 105°C) e a força de 2500N foi aplicada por 5 min. Seguindo, a temperatura da “ferramenta” e do substrato são abaixadas para 45°C e a câmara é trazida a pressão atmosférica. (KOERNER et al, 2005).

A força de gravação foi então removida e o chip de PMMA é desmoldado da matriz de epoxy manualmente. A gravação do chip de PMMA foi cortado no tamanho e então limpo em um banho de etanol por 5 minutos no ultrasom (KOERNER et al, 2005).

A prensagem a quente foi mostrada como sendo um procedimento eficaz para rapidamente produzir cópias múltiplas de dispositivos microfluidos nos materiais poliméricos. O método é simples, e, envolve essencialmente, prensagem dos microdispositivos perto da temperatura de transição do vidro para o polímero usado. Este é um método atrativo de fabricação, porque os múltiplos microdispositivos podem ser fabricados de um dispositivo mestre resultando em um baixo custo de fabricação. Em adição, diferentes propriedades superficiais/material podem ser obtidas pela simples prensagem num tipo diferente de material ou polímero, embora prensagem a quente seja muito eficiente para a microfabricação repetida, limitou-se a potencialidade para modificações rápidas no processo da microfabricação, devido ao tempo e a despesa necessários para se produzir uma matriz. Moldes de níquel são duráveis, mas o tempo que consome para produzir é caro, enquanto as matrizes feitas de silicone ou de SU-8 podem ser produzidas mais rapidamente, e são mais baratas, mas tem uma limitada vida

na prensagem devido a sua natureza frágil. A utilização de uma estampa epoxy moldada de um molde SU-8 fornece um método barato para a modificação rápida e a produção de um molde durável e de baixo custo. Koerner utiliza um epoxy de alta temperatura, usado para ser endurecido, sendo significativo mesmo nas temperaturas elevadas (180°C) permitindo a gravação de um número comum de substratos utilizados com temperaturas de transição vítrea abaixo de 180°C. Além disso, o epoxy tem uma baixa viscosidade inicial misturada (2500 cps) e baixo encolhimento (1,42%) e é requerida para replicar detalhes finos durante a moldagem e fabricação de steps (KOERNER et al, 2005).

O molde de epoxy é preparado simplesmente derramando o epoxy no molde da réplica de PDMS e, então, segue a manufatura recomendada para curar o epoxy. Após ter refrigerado e ter removido o molde epoxy do molde de PDMS pode-se usar para gravar microestruturas em PMMA por um procedimento padrão (figura 2.16). Microfotografia das estruturas anular (o menor diâmetro do anel $950\text{ }\mu\text{m}$ com uma espessura de $25\text{ }\mu\text{m}$) são mostradas em cada um dos moldes e dos estágios gravados (figura 2.15) (KOERNER et al, 2005).

Inspeção visual e microscópica das estruturas do teste mostram que o processo permite excelente replicação do molde (SU-8). Deve-se também notar que a desmoldagem do molde de epoxy do PMMA é realizada sem a necessidade dos agentes liberadores de superfície (KOERNER et al, 2005).

Figura 2.15 – Esquema representando o processo de produção de um clone epoxy de um molde SU-8 positiva imagem, ao qual pode então ser usado como uma ferramenta estampa para prensar PMMA. As imagens inseridas são microfotografias de uma microestrutura com diferentes estágios de fabricação. O diâmetro do menor círculo é $950\ \mu\text{m}$ e o anel tem $25\ \mu\text{m}$ de largura (KOERNER et al, 2005).

Figura 2.16 – Esquema representando a força e temperatura usadas para prensar estruturas em PMMA com um molde de epoxy. A linha cheia representa a temperatura em função do tempo e a linha tracejada é a aplicação da força. A escala de tempo não é linear e não reflete o mesmo, onde um parâmetro instrumental foi mudado (KOERNER, et al, 2005).

Para examinar a capacidade do molde fabricado e do processo de gravação, pequenas características foram moldadas e gravadas. São dados na figura 2.17 microfotografias escaniadas de microscópio eletrônico (SEM) de uma matriz de epoxy, e o PMMA imagem negativa. Estas microfotografias SEM (figura 2.17) alcançam seguidos 10 ciclos de gravação, mostrando que a estampa é muito durável e apropriada para a fabricação de microestruturas gravadas com baixo número de cópias. Não é visível empenamento ou deterioramento no molde, observado para menos de 50 réplicas. Para determinar o ponto ao qual o molde de epoxy falha, sujeitou-se um molde à pressão máxima e (20 KN) temperatura (200 °C acima do limite de 180°C recomendado pelo fabricante) admitida pelo instrumento. Sob estas circunstâncias algumas visíveis entortadas do epoxy foram observadas depois de 5 replicações resultantes, tendo por resultado, características gravadas distorcidas. Entretanto se o molde danificar, uma recolocação pode ser fabricada do molde original com poucas horas e despesa (KOERNER et al, 2005).

Figura 2.17 – A) Microfotografias de SEM (2500 X) dos pontos da imagem positiva através do microscópio de força atômica TGT1, e o resultado do prensamento em PMMA, cria uma imagem negativa correspondente (B). Os pontos do molde original estão a $3\ \mu m$ de distância com uma altura de 300-500 nm. A imagem mostrada em (A) foi feita depois de 10 ciclos completos de prensagem (KOERNER et al, 2005).

Koerner et al (2005) mostram assim, que o processo de gravação combinado com um procedimento apropriado, tal como a modificação de superfície seguida pelo calor/pressão é excelente para a produção dos dispositivos microfluidos em PMMA, figura 2.18 (KOERNER et al, 2005).

Figura 2.18 – Microfotografia SEM da região de um injetor de um dispositivo microfluído gravado em PMMA usando epoxy. As dimensões da canaleta têm $50\ \mu m$ de largura e $20\ \mu m$ de profundidade (KOERNER et al, 2005).

CAPÍTULO 3

3 – Materiais e Métodos

3.1 – Considerações Gerais

O objetivo deste trabalho é de investigar a capacidade do processo de microusinagem com ferramenta de diamante monocristalino para geração de microestruturas (*features*) em metais não ferrosos, a saber, cobre eletrolítico, bem como investigar a reprodução dessas *features* em amostras de PMMA, após a moldagem (prensagem a quente). A princípio, a avaliação da influência das condições de usinagem para o torneamento com ferramenta de diamante monocristalino de cobre eletrolítico foi realizada.

3.2 – Caracterização do Material Usado nos Ensaios de Usinagem

3.2.1 – Cobre Eletrolítico - Metalografia e Medição de Dureza

O uso de cobre eletrolítico foi feito como material para geração das microcaracterísticas devido ao fato de se tratar de um material bastante compatível com o diamante da ferramenta, isto é, por ser de fácil usinagem; por apresentar baixa resistência ao escoamento; ter relativamente baixa reatividade química com o carbono do diamante e permitir análise do estado da superfície gerada.

Outro fator importante é a elevada condutividade elétrica e térmica, boa resistência à corrosão e facilidade de fabricação, aliada à elevadas resistências mecânica

e à fadiga, uma vez que precisamos de uma matriz com essas características para a replicagem em PMMA, através da prensagem a quente.

Para os testes de usinabilidade foi usada uma amostra de cobre eletrolítico com dimensões de 10x10x5 mm. A amostra, inicialmente, foi caracterizada metalograficamente para determinação de sua microestrutura.

Para isso, foi embutida, lixada, polida e atacada quimicamente para a revelação de grãos. A sequência para o lixamento usou-se lixas 320, 400, 600, 1200.

Para o polimento usou-se diamante com tamanho de grãos $0,25\ \mu\text{m}$ e para a revelação de grãos (ataque químico) do cobre eletrolítico foi usado latão de cobre que é uma substância composta por: 2g de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 8ml de H_2SO_4 , 4ml de $\text{NaCl}(\text{sol.})$ e 100ml de H_2O . A amostra ficou imersa nesta substância por 5 segundos. A Figura 3.1 mostra uma imagem feita através de microscopia óptica da superfície de cobre atacada quimicamente para revelar sua microestrutura. A microestrutura mostra grãos com tamanho médio da ordem de algumas dezenas a centenas de micrometros.

Figura 3.1 – Amostra de cobre eletrolítico atacada quimicamente para revelação de grãos.

Após este processo, mediu-se a sua microdureza na face atacada quimicamente usando um micro durometro Leica VMHT MOT (Laboratório de Materiais da Escola de

Engenharia de São Carlos – USP). Para estimar a microdureza cargas de 300 a 5g foram aplicadas. Esse procedimento permite que a obtenção de valores médios de microdureza sem a influência de encruamento decorrente de processos de usinagem para preparação de amostras. Foram feitas três fileiras com cada carga, sendo que cada fileira tem 30 endentações. A Figura 3.2 apresenta uma imagem feita através de microscopia óptica das endentações produzidas na amostra de cobre: lixada, polida e atacada quimicamente. A tabela 3.1 apresenta os resultados médios obtidos para cada carga. Esse valor médio corresponde a média dos valores medidos da microdureza.

Tabela 3.1 – Dados das endentações obtidas na amostra de cobre eletrolítico através do microdurômetro Leica VMHT MOT.

<i>Carga (g)</i>	<i>D₁ (μm)</i>	<i>D₂ (μm)</i>	Dureza (HV)
300	73,5	74,4	102
200	61,1	61,3	99,1
100	44,5	46,1	90,3
50	33,1	32,2	87,0
25	22,7	24,2	84,5
15	17,5	17,9	88,5
10	13,9	14,8	89,9
5	10,4	10,3	86,1

Figura 3.2 – Amostra de Cobre eletrolítico com microestruturas (endentações).

3.2.2 - Polimetilmetacrilato

O PMMA, (Figura 3.3), foi escolhido por ser usado em dois terços de todos os componentes ópticos, boa estabilidade óptica, fácil usinabilidade, dureza e resistência a intempéries (Bauer, Muller e Petzold, 2000), além do alto desempenho, como: fácil moldagem no processo de prensagem a quente e baixo custo. Visto que sua baixa condutividade térmica reduz a dissipação de calor, a água, por exemplo, poderá ser aplicada, quando usinado.

Figura 3.3 – Foto de uma amostra de polimetilmetacrilato (PMMA).

O polimetilmetacrilato tem a propriedade de transmitir a luz, e excelentes combinações de propriedades estruturais e térmicas. Sua transparência é semelhante a de vidros ópticos. Comumente conhecido como acrílico, é o polímero óptico mais usado, devido ao seu índice de refração e valores de dispersão bastante similares ao vidro óptico, em especial ao BK7 (OPTICAL COATING LABORATORY, Inc., 2002). A transmitância do acrílico é da ordem de 92%, sendo que alguns possuem alta transmitância em UV. Seu índice de refração (n) situa-se entre 1,491 e 1,496 (KOGLER, 1999). Em função disso, este material apresenta condições adequadas 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).

As superfícies das amostras de cobre, bem como as das replicas de PMMA prensadas a quente, foram fotografadas, antes da realização das medições, para obtenção de uma análise da topografia; podendo-se assim, verificar se há alguma irregularidade quanto à presença de crateras, trincas, etc. Para tanto se utilizou o perfilômetro óptico, CCI 3000.

A Figura 3.4 apresenta imagens feitas através de perfilometria mecânica de uma superfície de PMMA polida com pasta de diamante com tamanho médio de grãos de $1\mu\text{m}$. A imagem mostra um mapeamento topográfico da superfície delimitado por padrões de cores. A Figura 3.4b mostra um perfil linear da superfície. Pode-se observar que os riscos randomicamente orientados decorrentes do processo de polimento (Figura 3.4 a) atingem valores da ordem de pouco mais de 50 nanômetros. Os valores de rugosidade refletem muito bem essas pequenas irregularidades na superfície, 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 St foi de 183 nanômetros e o de As 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 3.4 – Imagens feitas através de perfilometria óptica da superfície polida com diamante. Valores de profundidades dos riscos deixados pelo processo atingem profundidades de até 50 nanômetros.

3.3 – Ferramenta de Corte

A ferramenta usada é de diamante monocristalino, produzida pela empresa Contour Fine Tooling (dos Estados Unidos). Para a primeira amostra de cobre torneado utilizamos a ferramenta CO45LG, para as demais amostra de cobre torneado foi usada outra ferramenta CO30LG. As geometrias das duas ferramentas são apresentadas na tabela 3.2. A Figura 3.5 apresenta um desenho esquemático das ferramentas de diamante indicando sua geometria. A máquina confere à ferramenta um controle ultrapreciso de posicionamento e elevada rigidez, que são requisitos necessários ao torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis.

Tabela 3.2 – Características geométricas da ferramenta de diamante monocristalino.

Propriedades	CO45LG	CO30LG
Ângulo de saída γ	0°	0°
Ângulo de folga α	12°	12°
Raio da ponta (Rp)	1,143 mm	0,763 mm

Fonte: Catálogo Contour Fine Tooling.

Figura 3.5 – Ferramenta de diamante monocristalino (PORTO et al., 2004).

A ferramenta de diamante possui uma aresta de corte polida com raios inferiores a algumas dezenas de nanômetros. A figura 3.6 a, mostra uma imagem tridimensional feita através de microscopia força atômica de uma aresta de diamante. Pode-se observar que esta apresenta-se livre de defeito e extremamente afiada (raio $< 100 \text{ nm}$). A figura 3.6 b, apresenta as ferramentas utilizadas para fabricação de superfícies ópticas anisféricas.

Figura 3.6 – a)Imagem tridimensional de uma aresta de ferramenta diamante obtida através de microscopia de força atômica; b) imagem de ferramentas de diamante.

3.4 – Máquina-Ferramenta para Usinagem

A máquina-ferramenta utilizada para a realização das características na peça de cobre foi a Geradora de superfícies Anesféricas (*Asferical Surface Generator*) ASG 2500 da fabricação Rank-Pneumo, como mostra a Figura 3.7, a qual está disponível no laboratório de usinagem de ultraprecisão da Escola de Engenharia de São Carlos.

Figura 3.7 – Geradora de Superfícies Anesféricas RANKO PNEUMO ASG 2500 e Controle Numérico ALLEN-BRADLEY CNC 8200.

Esta máquina é projetada tanto para torneamento quanto para retificação de ultraprecisão. A base da máquina tem uma dimensão de 1066 mm x 762 mm, é usinada em ferro fundido e tratado termicamente para ficar livre de tensões residuais. Elimina as vibrações externas através de isoladores pneumáticos passivos, montados cinematicamente em uma estrutura soldada de aço. Os mancais do eixo-árvore são aerostáticos, o que dá a máquina precisão de giro, rigidez axial e radial compatíveis com o nível de precisão a que o equipamento se propõe. A máquina utiliza um CNC (Controle Numérico Computadorizado) da Allen-Bradley, modelo 8200, para controlar o deslocamento dos eixos da máquina (X e Z), com incrementos de 0,00001 mm (10 nm). Estes eixos são perpendiculares entre si e definem o plano no qual é gerada a peça. Também são suportados por guias hidrostáticas e suas posições são monitoradas por transdutores interferométricos a laser, da Hewlett-Packard, com retro-alimentação ao controlador. As peças a serem usinadas são fixadas à placa por meio de vácuo (cerca de -70 kPa). A máquina também possui um sistema de isolamento que permite controlar a temperatura do ambiente de trabalho em 20°C com uma variação 0,1°C e ainda, controlar partículas de até 1 μm por meio de um filtro de ar. O fluido refrigerante utilizado foi ALKALISOL 900, direcionado para a região do corte através de uma névoa pressurizada.

3.5 – Prensagem a Quente

As amostras de polimetilmetacrilato (PMMA) usadas neste trabalho foram pré-usinadas em torno convencional para a correção de eventuais erros de planicidade e paralelismo. Todas as amostras passaram por um processo de lixamento e polimento, usou-se lixas na sequência de 320, 400, 600, 1200, e para o polimento usou-se pasta de diamante com grãos 1 μm com acabamento mostrado na Figura 3.4.

Para os testes de replicagem utilizamos uma prensa, Figura 3.8 a), do laboratório de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, onde foi colocada em seu interior a/as amostra/s de cobre eletrolítico torneado, bem como a amostra de PMMA, formando um sanduíche (Figura 3.8 b). A Figura 3.9 mostra a curva de aquecimento e resfriamento em função do tempo para o processo de prensagem a quente. A tabela 3.3, mostra os valores de pressão e temperatura produzidos durante o processo de replicagem.

Figura 3.8 – a) Prensa utilizada para a replicagem de microestruturas em PMMA – Laboratório de Materiais da Engenharia de São Carlos – USP; b) desenho esquemático da câmara onde é feita a compressão das amostras.

Figura 3.9 – Curva de aquecimento e resfriamento para o ciclo de moldagem a quente.

Tabela 3.3 – Testes da prensagem a quente da segunda amostra de cobre eletrolítico torneado e das amostras de PMMA, para a replicagem das microranuras.

<i>Amostra de PMMA</i>	<i>Pressão (Bar)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Tempo (s)</i>
1	0	0 - 30	0
	5	45	30
	0	45 - 115	140
	50	115	220
2	0	0 – 30	40
	5	45	50
	0	45 – 115	140
	50	115	300
3	0	0 – 30	0
	5	45	50
	0	45 – 115	140
	50	115	480
4	0	0 – 30	0
	5	45	50
	0	45 – 115	140
	50	115	900

3.6 – Rugosidade Superficial

Os parâmetros escolhidos para avaliar o acabamento superficial no presente trabalho foram:

- A rugosidade de pico-a-vale (R_t): pois a altura relativa da microtopografia é mais representativa para o acabamento e este é usado em componentes sujeitos a alta tensão, pois qualquer pico-vale de grande dimensão pode propagar uma trinca por fadiga além de que alguns picos grandes podem também ser penetrados por filmes de óleos lubrificantes aumentam o desgaste, acumulando fragmentos e danificando superfícies de deslizamento (COLAFEMINA, 2005).
- A rugosidade aritmética (R_a): pois este é um parâmetro de controle, ou seja, se o valor de R_a muda, pode-se concluir que o controle do processo mudou (ex.: avanço, velocidade de corte, desgaste da aresta de corte, lubrificante de corte, etc.), é também essencial quando se precisa de parâmetros estáveis, pois este não é influenciado por acontecimentos casuais, falsos picos ou arranhões, sendo o processo mais usado na indústria manufatureira, além de ser disponível em equipamentos simples e de baixo custo (TAYLOR HOBSON, 2000).

Para avaliação do acabamento superficial (R_a , R_t), foi usado os Modelos Talysurf CCI 3000 e o Perfilômetro Mecânico série 120L, sendo que o Talysurf CCI 3000 é da TAYLOR HOBSON PRECISION[®] e o Perfilômetro Mecânico do laboratório de Ultraprecisão da Engenharia Mecânica de São Carlos – USP.

- 1) Modelo Perfilômetro Mecânico: Para a realização das medições foi utilizado o rugosímetro (Perfilômetro Mecânico), fabricado pela Taylor - Hobson, série 120L. O instrumento mede a textura e a rugosidade superficial. Acoplado ao instrumento, há um computador, uma impressora gráfica e uma tela colorida. Os dados obtidos podem ser processados e impressos, visualizados pelo usuário através da tela colorida e salvos em um disquete.
- 2) Modelo Talysurf CCI 3000: faz medidas por meio de um avançado tipo de medida interferométrica. Utiliza-se um algoritmo de correlação para obter coerência do pico e da posição de fase de uma interferência padrão produzida por uma largura de banda selecionada por meio de uma fonte de luz. Este método produz alta resolução e alta sensibilidade de retorno da luz, tornando

esse equipamento muito versátil. Com 0,1 Å de resolução pode-se analisar espelhos, superfícies polidas ou rugosas, medir estruturas policristalinas com degraus na altura, desde que possuam refletividade de 0,3% a 100%. Portanto é possível analisar todo o tipo de material, desde vidros, metais, polímeros, fotos com revestimento e até tinta líquida pode ser medida sem nenhuma dificuldade. Este equipamento foi usado para medir parâmetros superficiais em 2D e 3D. Suas especificações estão na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Especificações técnicas do Talysurf CCI 3000.

Especificações do Sistema	
Alcance vertical (Z) 100 μm	Repetibilidade da altura do degrau 0,1 nm (25 mm degrau)
Resolução vertical (max) 0,1 Å (10pm)	Linearidade (z) 0,03% do valor da medida
Repetibilidade RMS (z) 0,03 Å(3pm)	Pixel noise (z) 0,2 nm
Velocidade de varredura vertical 7 mm/s	Refletividade da superfície 0,3% - 100%
Alcance de medida (x,y) 0,36 mm ² – 7,2 mm ²	Tamanho do componente (max) x = y = 300 mm; z = 200 mm
Número de pontos medidos 1.048.576 (1024 x 1024 pixel)	Peso do comprimento (max) 10 kg
Resolução lateral (x,y) 0,36 μm (max)	Tempo de medida 10 – 20 segundos
Condições de Instalação	
Temperatura / umidade 15 – 30 °C / 80% não condensada	Vibração Sistema pneumático anti-vibratório
Dimensões	
750 mm largura x 500 mm profundidade	

3.7 – Ensaios de Usinabilidade

Inicialmente, são descritos os ensaios feitos para avaliar o comportamento do material em função das condições de usinagem, métodos e equipamentos empregados na fabricação e caracterização física do elemento óptico (usinado e replicado).

I . Parâmetros dos ensaios

As variáveis a serem estudadas no torneamento com ferramenta de diamante da amostra de cobre são as seguintes:

- profundidade de usinagem (ap);
- avanço (f).

II. Materiais utilizados

- Cobre eletrolítico.

III. Medições e caracterizações

- Avaliar a influência de cada um desses parâmetros sobre o acabamento superficial;
- Avaliar a textura e a topografia da superfície através de um perfilômetro óptico e um microscópio de fase NOMARSKI;
- Determinar as faixas de corte onde os resultados possam ser satisfatórios para o cobre eletrolítico.

O objetivo desses ensaios preliminares é determinar possíveis influências do material e das condições de usinagem para se produzir superfícies que irão receber as microestruturas.

A Figura 3.10 mostra a montagem da peça-teste no torno para os ensaios preliminares. A amostra é inicialmente faceada para se obter um acabamento espelhado e plano. Todos os ensaios de corte foram realizados com uma ferramenta nova.

Os parâmetros de corte que foram sistematicamente variados são: a profundidade de corte, o avanço e a velocidade de corte.

Os ensaios permitiram testar 10 condições para o cobre (5 de avanço; 4 de profundidade de usinagem).

A Tabela 3.5 descreve as faixas de variação dos parâmetros de corte nos experimentos.

Figura 3.10 – A Peça-teste é inicialmente faceada antes de se iniciar os testes com a variação das condições de usinagem.

Tabela 3.5 – Condições de corte aplicadas na amostra de cobre eletrolítico para avaliação do acabamento.

Setor (de dentro para fora da peça)	Avanço f ($\mu\text{m}/\text{rev}$)	Profundidade a_p (μm)
1	25	5
2	20	5
3	15	5
4	10	5
5	5	5
6	15	10
7	15	15
8	15	20
9	15	15
10	15	10

A figura 3.11 mostra um desenho esquemático mostrando o perfil dessa peça, onde várias condições de usinagem foram realizadas.

Figura 3.11 – Desenho esquemático mostrando o perfil da face da amostra de cobre eletrolítico torneada com várias condições de corte (Tabela 3.5).

A Figura 3.12 mostra a amostra com as condições de usinagem testadas sendo medida no perfilômetro mecânico.

Figura 3.12 – Peça usinada no torno ASG 2500 medida com perfilômetro de contato. Liga de cobre eletrolítico.

3.8 – Métodos para a Geração de Microperfis

As microestruturas foram geradas através de dois processos:

- Endentação;
- Usinagem dos materiais através de torno de precisão com ferramenta de diamante de ponta única.

A endentação e usinagem são duas técnicas altamente importantes que ajudam no esclarecimento dos fenômenos envolvidos na geração dessas microcaracterísticas. A microindentação envolve mecanismos de deformação plástica e a usinagem, remoção de material. Isso implica em respostas diferentes por parte do material.

Para produzir estas microestruturas (endentações), utilizamos um microdurômetro Leica VMHT MOT, que pressiona um endentador duro (ponta de diamante piramidal, respectivamente) sobre a superfície do material, no caso cobre eletrolítico, a uma determinada taxa de penetração durante 15 segundos.

Para a usinagem, utilizamos ferramentas de diamante monocristalino com geometria definida.

A reprodução dessas microcaracterísticas é realizada por deformação a quente. Esta técnica é bastante atrativa, pois a partir de um molde e equipamentos relativamente simples, é capaz de se reproduzir microestruturas com bastante fidelidade e baixo custo. Para que se efetuasse essa replicagem utilizamos uma prensa que, além de pressão, nos fornecesse, também, calor.

As amostras de cobre aqui requeridas foram pré-torneadas em torno convencional para a correção de eventuais erros de planicidade e paralelismo, sendo também todas as amostras montadas sobre suportes de alumínio previamente faceados (Figura 3.10), e estes, fixados à placa de vácuo do torno ASG2500 (FIGURA 3.13).

Figura 3.13 – Suporte de alumínio para auxiliar a fixação da amostra na placa de vácuo para usinagem fora de centro.

A primeira amostra de cobre eletrolítico para o torneamento de face tinha 50 mm de diâmetro, sendo trabalhado nesta face torneada, degraus. Além da geração de degraus, essa amostra é a mesma usada no estudo da avaliação da rugosidade, uma vez que vários parâmetros de corte foram usados. A tabela 3.6 mostra a profundidade de cada degrau produzido nesta amostra.

Tabela 3.6 – Profundidades produzidas na amostra de cobre eletrolítico para a geração de microestruturas.

Steps	Profundidade (μm)
1	5
2	5
3	5
4	5
5	10
6	15
7	20
8	15
9	10

A segunda amostra de cobre eletrolítico para torneamento de face teve 25 mm de diâmetro e foi trabalhado microranuras (figura 3.14) com profundidades dadas pela tabela 3.7.

Figura 3.14 – Figura ilustrativa da segunda amostra de cobre eletrolítico, torneado com ferramenta de diamante.

Tabela 3.7 – Profundidade de corte da segunda amostra de cobre e a respectiva largura da ranhura deixada na peça estimada através da equação $W = (2 * rp * ap)^{1/2}$.

Profundidade de Usinagem (μm)	W (μm)
0,5	1,06
1	1,50
2	2,13
5	3,37
10	4,77

A terceira amostra de cobre eletrolítico para torneamento teve 25 mm de diâmetro e foi usinadas microestruturas. As microestruturas escolhidas para este molde foram selecionadas por apresentarem uma variedade de formas, tamanhos e relações de aspecto, as mesmas foram escolhidas após investigação da literatura sobre o assunto.

As microestruturas escolhidas para a terceira amostra foram:

1. Lente esférica (concavidade);
2. Microperfis;
3. Senoide;
4. Endentações.

Foram torneadas três características, subdividindo assim, a superfície em três setores.

Cada microestrutura foi torneada com os parâmetros escolhidos de acordo com os dados da tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Parâmetros utilizados no torneamento da terceira amostra de cobre eletrolítico.

Setor	Parâmetros de corte com ferramenta de ponta única de diamante	
	Profundidade A_p (μm)	Avanço f ($\mu m/rev$)
1 – Lente esférica (concavidade)	5	10
2 – Microperfis	5	10
3 – Senoide	5	10

As endentações foram feitas no meio dos três setores, com cargas iguais a da primeira amostra endentada, como mostra a figura 3.15.

Figura 3.15 – Desenho esquemático, onde foram feitas as endentações na amostra de cobre.

3.9 – Método para a Medição de Transmitância

Um último teste de replicagem foi feito para medir a transmitância do PMMA. Para tanto foi utilizado uma amostra de PMMA com 25 mm de diâmetro por 5 mm de espessura e duas amostras de cobre eletrolítico com 25 mm de diâmetro por 5 de espessura.

A amostra de PMMA foi polida nas duas faces com pasta de diamante com grãos de $1\text{ }\mu\text{m}$. As duas amostras de cobre eletrolítico foram torneadas com a mesma ferramenta de diamante das amostras anteriores, ($a_p = 5\text{ }\mu\text{m}$ e $f = 10\text{ }\mu\text{m}/\text{rev}$).

Após o polimento do PMMA, foi fotografada suas superfícies através de um microscópio e medida sua transmitância em um espectômetro, figura 3.16, com um comprimento de onda de luz entre 350 e 950 nm, utilizando-se 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 a direita, passa através das amostras. Este equipamento está instalado no Instituto de Física de São Carlos.

Figura 3.16 – Espectômetro instalado no Instituto de Física de São Carlos – USP.

Em seguida, a amostra de PMMA foi prensada a quente, com as amostras de cobre eletrolítico torneadas com ferramenta de diamante, figura 3.8 b.

Ao término da prensagem a quente, medimos novamente a transmitância do PMMA, agora replicado.

Capítulo 4

4 – Resultados e Discussão

Considerações Gerais

Os resultados que serão apresentados a seguir buscam atender o objetivo deste trabalho que foi de investigar a capacidade do processo de microusinagem com ferramenta de diamante monocristalino para geração de microestruturas (*features*) em metais não ferrosos, a saber, cobre eletrolítico, bem como investigar a reprodução dessas *features* em amostras de PMMA após a moldagem (prensagem a quente). Inicialmente, será apresentado um breve estudo sobre a usinabilidade de cobre eletrolítico.

4.1 – Influência das Condições de Usinagem

4.1.1 – Influência do Avanço (f)

A Tabela 4.1 mostra um comparativo entre a rugosidade superficial (R_t) estimada teoricamente, eq.(1) e o resultado da rugosidade medida em um Talysurf CCI 3000 da primeira amostra de cobre eletrolítico torneada com ferramenta de diamante.

$$\text{Rugosidade}_{\text{teórica}} = \frac{f^2}{8R_p} \quad (1)$$

em que f é o avanço da ferramenta (mm/rev) e R_p é o raio de ponta da ferramenta (mm).

Pode-se observar que o valor da rugosidade experimental é sempre maior do que o teoricamente calculado. Esta diferença deve-se a fatores como ductilidade e recuperação elástica do material. As rugosidades teóricas e experimentais encontradas serviram de base para a continuidade do trabalho, isto é, servindo de parâmetro para as próximas usinagens.

Para efeito de análise decidiu-se por apresentar os valores de St e Sz que permitem, nesse caso, avaliar o efeito da recuperação elástica promovida pela microestrutura. Os resultados de St e Sz mostram-se muito semelhantes em termos da variação. Para justificar esse comportamento optou-se por apresentar duas condições extremas de avanço para que se possa demonstrar tal efeito. As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam imagens, obtidas através de perfilometria óptica, das condições a serem comparadas, a saber: Figuras 4.1 a) e 4.1 b) referem-se, respectivamente, à topografia e ao perfil traçado perpendicularmente à direção do corte da superfície gerada com avanço de 25 $\mu\text{m}/\text{rev}$, e as Figuras 4.2 a) e 4.2 b) referem-se, respectivamente, à topografia e ao perfil traçado perpendicularmente à direção do corte da superfície gerada com avanço de 5 $\mu\text{m}/\text{rev}$. Pode-se, observar que o perfil gerado pela ferramenta na superfície, com avanços altos (Fig. 4.1 a) e 4.1 b)) marcam de maneira eficaz o passo da ferramenta correspondente a condição de avanço. No entanto, para o caso da condição onde a taxa de avanço é mínima observa-se, claramente, a microestrutura dos grãos cristalinos do cobre (Figura 4.2 a). Isso pode ser melhor evidenciado através da Figura 4.2 b) onde observa-se intervalos em torno de 90 micrometros os passos menores de avanço para essa condição de corte. Esse resultado corrobora com o que foi apresentado por Jasinevicius et al. (2003) e To, Cheung e Lee, (2001) onde os autores demonstram que para condições de avanço baixo há uma forte influência da recuperação elástica sobre a rugosidade da superfície. Isso pode ser confirmado através dos valores de St e Sz e pelo perfil mostrado na Figura 4.2 b). Esse fenômeno será mais bem abordado nas seções subseqüentes.

Tabela 4.1 – Resultados da rugosidade através dos avanços e profundidades trabalhadas na primeira amostra de cobre eletrolítico.

<i>Setor (de dentro para fora da peça)</i>	<i>Avanço $f(\mu m/rev)$</i>	<i>Profundidade $ap(\mu m)$</i>	<i>Rt(nm) Teórica</i>	<i>Rt (nm) Exp.</i>	<i>St (nm)</i>	<i>Sz (nm)</i>
1	25	5	68,96	75	106	99,9
2	20	5	44,13	55,6	102	91,7
3	15	5	24,82	30	90,1	88,5
4	10	5	11,03	13,4	80,2	80,1
5	5	5	2,75	9,02	84,9	84,8
6	15	10	24,82	34	57,8	54
7	15	15	24,82	33,25	53,6	47,8
8	15	20	24,82	35,24	48,3	42
9	15	15	24,82	42,08	66,6	52,7
10	15	10	24,82	39,58	57,7	54,7

Figura 4.1 – Referem-se, respectivamente, à topografia (a) e ao perfil (b) traçado perpendicularmente à direção do corte da superfície gerada com avanço de 25 $\mu\text{m}/\text{rev}$.

Figura 4.2 – a) e b) Microestrutura dos grãos cristalinos do cobre.

A Figura 4.3 apresenta resultados da rugosidade (R_t) da primeira amostra torneada com ferramenta de diamante, medidos através de interferometria Talysurf CCI 3000.

Figura 4.3 – Influência da taxa de avanço sobre a rugosidade superficial pico a vale. Comparação entre valor estimado teoricamente e medidos experimentalmente no Talysurf CCI 3000. Ferramenta de diamante monocristalino ($R_p = 1.14 \text{ mm}$, ângulo de saída $\gamma = 0^\circ$, ângulo de folga $\alpha = 12^\circ$), profundidade de usinagem (a_p) conforme tabela 4.1 e rotação de 1000 rpm.

MORIWAKI, T. e OKUDA, K. (1989), concluem que para grandes taxas de avanços em torneamento convencional, os valores de rugosidade experimental ficam relativamente de acordo com a teórica. Porém, enquanto a taxa de avanço é reduzida a valores menores que $5 \mu\text{m/rev}$, a rugosidade se torna maior que a teórica. Esse efeito é justificado através da recuperação elástica dos grãos. Materiais policristalinos apresentam grãos aleatoriamente orientados e, portanto suas propriedades mecânicas variam de um grão para outro.

Na figura 4.3, pode-se observar essa mesma tendência, para avanços um pouco maiores que $5 \mu\text{m/rev}$. É possível perceber, neste gráfico, a tendência de aumento na rugosidade superficial R_t com o aumento do avanço. Os valores experimentais também ficaram acima do valor teórico. Os altos valores de R_t podem ser justificados pelas figuras 4.4a e 4.4b, mostrando que na amostra de cobre eletrolítico aparecem alguns picos e vales muito acentuados, que elevam o valor médio de R_t , uma das causas é a recuperação elástica do material.

Figura 4.4a – Amostra usinada com $f = 25 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 5 \mu\text{m}/\text{rev}$. Espectro da superfície usinada e imagem tridimensional obtidos no Talysurf CCI 3000.

Através da escala de cores, podemos perceber que a variação de pico a vale chega aos 75 nm.

Figura 4.4b – Amostra usinada com $f = 20 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 5 \mu\text{m}/\text{rev}$. Espectro da superfície usinada e imagem tridimensional obtidos no Talysurf CCI 3000.

Através da escala de cores, podemos perceber que a variação de pico-a-vale chega aos 55 nm.

Deve-se ressaltar que na usinagem de metais não ferrosos (ligas de Al, Cu, etc.), sob as mesmas condições de corte, a rugosidade superficial R_t encontra-se em torno de 40 nm, respectivamente (JASINEVICIUS, 1994), concluindo assim, que os valores obtidos foram bastante satisfatórios para um primeiro estudo das condições de usinagem, e para o prosseguimento do trabalho.

A influência de aspectos como: profundidade de usinagem e da anisotropia decorrente da policristalinidade serão avaliados a seguir.

4.1.2 – *Influência da Profundidade de Usinagem (a_p)*

Baseando-se na relação proposta para estimar a rugosidade superficial teórica de uma superfície usinada com ferramenta de diamante pode-se inferir que a profundidade de usinagem não apresenta influência sobre o acabamento superficial.

A figura 4.5 mostra um gráfico com valores experimentais da primeira amostra de cobre torneada, mostrando que a variação da rugosidade superficial (R_t) não apresenta grandes variações com o aumento da profundidade de usinagem. Essa variação não pode ser claramente explicada, porém acredita-se que esteja relacionada à capacidade de encruamento desse material.

Figura 4.5 – Influência da profundidade de usinagem no acabamento superficial (R_t) medidos no Talysurf CCI 3000. Rotação 1000 rpm, avanço de $15 \mu\text{m}/\text{rev}$, ferramenta de diamante monocristalino ($R_p = 1.14 \text{ mm}$, ângulo de saída $\gamma = 0^\circ$, ângulo de folga $\alpha = 12^\circ$).

4.1.3 – Influência do Material da Peça

Na primeira amostra de cobre eletrolítico torneada encontramos diferenças nas amplitudes dos perfis da rugosidade, conforme pode ser visto nas figura 4.6a e 4.6b.

Figura 4.6a – Amostra usinada com $f = 15 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 5 \mu\text{m}/\text{rev}$. Espectro da superfície usinada e perfil da superfície obtidos no Talysurf CCI 3000.

Figura 4.4b – Amostra usinada com $f = 15 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}/\text{rev}$. Espectro da superfície usinada e perfil da superfície obtidos no Talysurf CCI 3000.

Essa diferença encontrada na primeira amostra de cobre eletrolítico torneada pode ser atribuída à deformação elastoplástica e ao processo de recuperação elástica, a qual será mais proeminente em materiais com maior resistência ao escoamento, a exemplo disso pode-se citar que essa anisotropia também pode ser observada em amostras polidas quimicamente (figura 3.1). A resposta do material em termos de rugosidade terá valores menores para materiais com dureza maior. Durante a usinagem

o material da peça irá expandir no extremo da aresta de corte ativa (Sata et. Al., 1985), como mostra a Figura 4.7. Esse fenômeno é atribuído ao efeito da anisotropia em materiais policristalinos e será melhor discutido no próximo item.

Figura 4.7 – Efeito da recuperação da deformação elástica sobre a altura pico-a-vale. A recuperação elástica será mais pronunciada no material com maior módulo elasticidade, a) rugosidade superficial teórica (altura ideal); b) rugosidade superficial após usinagem.

4.1.4 – Influência da Policristalinidade

Nos materiais policristalinos, cada cristal está aleatoriamente orientado e, por conseguinte, suas propriedades mecânicas variam de acordo com a orientação. Este fenômeno de alternância das propriedades pode afetar diversos aspectos da usinagem tais como as forças de corte, o mecanismo da formação do cavaco a partir do contorno do grão e por fim, o acabamento superficial (MORIWAKI, T. e OKUDA, K., 1989). Conseqüentemente faz se também as dimensões de usinagem serem muito menores do que o tamanho médio dos grãos. Portanto, em seções de corte reduzidas (profundidade de corte versus avanço), a ferramenta estará cortando no domínio de um único grão, (JASINEVICIUS et al, 2004).

Esse efeito da policristalinidade pode também ser observado na superfície do cavaco. A figura 4.8 mostra a superfície do cavaco com variações nas espessuras das lamelas e o contorno de grão.

Figura 4.8 – Cavaco de cobre eletrolítico

A figura 4.9a mostra este efeito no acabamento na amostra de cobre eletrolítico torneado. Pode-se observar que há uma variação na altura relativa entre os grãos. Essa variação pode ser da ordem de alguns nanômetros (dezenas). No entanto, essa diferença pode ter influência no caminho percorrido pela luz e afetar a qualidade superficial da peça.

Figura 4.9a – Amostra usinada com $f = 5 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 5 \mu\text{m}/\text{rev}$. Espectro da superfície usinada e imagem tridimensional obtidas no Talysurf CCI 3000.

A Figura 4.9b apresenta um diagrama esquemático da interação ferramenta/material onde a aresta da ferramenta aparece cortando no interior de um único grão devido às condições de corte submicrométrica. Nessas condições é possível observar que a espessura nominal de corte é inferior ao tamanho médio de grão.

b

Figura 4.9b – Diagrama esquemático mostrando o corte no interior de um único grão (MORIWAKI, T., 1995).

No diagrama, Figura 4.9b, ao cortar materiais policristalinos com um nível de precisão, o material removido é influenciado altamente pelo tamanho e pela orientação individual de cada grão. Conseqüentemente, ao contrário do corte convencional do metal, o mecanismo do corte na usinagem de precisão é influenciado significativamente pela cristalografia e pelo sistema associado do deslizamento dentro de cada um dos grãos aleatoriamente orientados.

Moriwaki, T. e Okuda, K. (1989), apresenta dois modelos concepcionais de microusinagem em cobre, para relatar a relação da rugosidade com a influência das estruturas e orientação de cada grão. Para um maior entendimento “estudo”, pode ser pesquisado este artigo.

4.2 - Resultados das Microestruturas Produzidas

4.2.1 – Endentação

O primeiro método usado para a geração de microestruturas para a replicagem a quente foi a da endentação.

A Figura 4.10 apresenta uma imagem feita em um microscópio óptico das microestruturas produzidas na amostra de cobre: lixada, polida e atacada quimicamente.

Figura 4.10 – Amostra de Cobre eletrolítico com microestruturas (endentações).

A figura 4.11, mostra a microestrutura (endentações) gerada na amostra de cobre eletrolítico e através da legenda de cores: a rugosidade, a variação de tamanho, a profundidade de grãos e o escorregamento de material (deformação ao redor da região endentada), podem ser analisados.

Figura 4.11 – Microestrutura (endentação) gerada na amostra de cobre eletrolítico com carga de 10 kgf/mm², imagens obtidas no Talysurf CCI 3000.

Através das imagens feitas pelo Talysurf CCI 3000, temos um aumento gradativo no escorregamento de material, quando as cargas de endentação são aumentadas.

4.2.2 – Torneamento

As microestruturas, no caso de degraus, produzidas na primeira amostra de cobre usinada, está de acordo com a tabela 4.1 (profundidade de corte), a figura 4.12 mostra um dos degraus produzido na amostra.

Figura 4.12 – Degrau do setor 1 para o setor 2, gerada na amostra de cobre eletrolítico, imagens obtidas no Talysurf CCI 3000.

Através das imagens dos degraus obtidos no Talysurf CCI 3000, temos a construção de um gráfico, figura 4.13, demonstrando que os valores de profundidade de usinagem estão de acordo com o previsto. Como análise, a faixa de profundidade 5 μm foi escolhida.

Figura 4.13 – Demonstração entre a profundidade dos degraus prevista (teórica) e a encontrada (experimental).

As variações encontradas no gráfico entre o teórico e o experimental pode ser atribuído à problemas de recuperação elástica no material, já comentada.

4.3 – Reprodução através de Prensagem a Quente

A figura 4.14a apresenta uma imagem da amostra usada como molde para testes de replicação de suas microcaracterísticas (steps) no PMMA, pelo método da prensagem a quente e a figura 4.14b apresenta seu perfil.

Figura 4.14 – a) Amostra de cobre eletrolítico com microperfis torneado com ferramenta de diamante para a prensagem a quente no PMMA. b) Perfil da superfície torneada.

A tabela 4.2, mostra a pressão, temperatura e tempo de prensagem, feitos sobre o molde e a réplica, até se conseguir a reprodução completa das microranuras da amostra de cobre no PMMA.

Tabela 4.2 – Testes de prensagem a quente da segunda amostra de cobre eletrolítico e da réplica de PMMA.

Replica de PMMA	Pressão (Bar)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Observação feita
1	0	0 - 30	0	A peça não sofreu a replicagem completa
	5	45	30	
	0	45 - 115	140	
	50	115	220	
2	0	0 - 30	40	A peça não sofreu a replicagem completa
	5	45	50	
	0	45 - 115	140	
	50	115	300	
3	0	0 - 30	0	A peça não sofreu a replicagem completa
	5	45	50	
	0	45 - 115	140	
	50	115	480	
4	0	0 - 30	0	A peça sofreu a replicagem completa
	5	45	50	
	0	45 - 115	140	
	50	115	900	

As Figuras 4.15a até a 4.15d mostram este processo de prensagem dado pela tabela 4.2 até a peça ser replicada totalmente.

Figura 4.15a – Réplica de PMMA 1. Pode se observar através da seta e do gráfico, que não sofreu a replicagem.

Figura 4.15b – Réplica de PMMA 2. Pode se observar que o centro foi replicado, mas as extremidades, como mostra a seta e o gráfico, ainda não foram.

Figura 4.15c – Réplica de PMMA 3. Pode se observar que o centro foi replicado, e já temos uma replicagem mais significativa das bordas, mas ainda não foi replicada totalmente.

Figura 4.15d – Réplica de PMMA 4. Pode se observar que a replicagem foi completa. A seta indica uma sujeira que aderiu ao PMMA durante a montagem na prensa.

Com a replicagem completa passamos para a peça final (terceira amostra de cobre eletrolítico torneado), figura 4.16, onde temos um arranjo de microestruturas.

Figura 4.16 – Peça final para replicagem a quente no PMMA.

Ao término da prensagem a quente, a amostra de PMMA foi desmoldada do molde de cobre manualmente, figura 4.17.

Figura 4.17 – Amostra de PMMA, após a prensagem a quente.

A topografia e a rugosidade superficial tanto do molde de cobre, quanto da réplica em PMMA, foram analisados em um perfilômetro mecânico.

Todas as amostras de PMMA submetidas à avaliação de micromoldagem através da prensagem a quente, tiveram seus melhores resultados, com pressões de 50 Bar e temperaturas variando de 115°C a 120°C e tempos de replicagem de 900 segundos. Estes resultados podem ser vistos através das fotos, Figuras 4.18 até 4.22, tiradas de um microscópio óptico, podendo assim, fazer uma primeira avaliação sobre a replicagem.

Figura 4.18 – a) Peça de cobre, microcaracterística da lente esférica (concavidade), setor 1, b) Réplica da lente esférica no PMMA.

A parte quadriculada na figura 4.18, mostra pequenos detalhes no molde de cobre eletrolítico e que foram reproduzidos no PMMA.

Figura 4.19 – a) Peça de cobre, microcaracterística da lente esférica (concavidade), setor 1, b) Réplica da lente esférica no PMMA.

A parte circulada e quadriculada da figura 4.19 mostra pequenos detalhes no molde de cobre eletrolítico, como o centro do torneamento e algumas imperfeições no cobre eletrolítico que foram reproduzidas no PMMA.

Figura 4.20 – a) Peça de cobre, microcaracterística das endentações, setor 4, b) Réplica das endentações no PMMA.

A parte quadriculada na figura 4.20, mostra pequenos detalhes no molde de cobre eletrolítico, no caso a microcaracterística da endentação, bem como sua deformação por conta da carga aplicada e a geração de tensões que foram reproduzidos não só no perfil mas também na réplica de PMMA, como mostra as setas.

Figura 4.21 – a) Peça de cobre, microcaracterística da senoide, setor 3, b) Réplica da senoide no PMMA.

A parte quadriculada na figura 4.21, mostra pequenos detalhes no molde de cobre eletrolítico, no caso onde a ferramenta não torneou a peça, e que foram reproduzidos no PMMA.

Figura 4.22 – a) Peça de cobre, microcaracterística dos microperfis, setor 2, b) Réplica dos microperfis no PMMA.

As setas na figura 4.22, indicam a passagem da ferramenta no molde de cobre eletrolítico, como também sua reprodução no PMMA.

Avaliando-se a secção transversal resultante; a rugosidade; a profundidade máxima alcançada durante a prensagem; a reprodução das microestruturas e a uniformidade das mesmas, temos uma melhor resposta em termos de fidelidade.

Através das Figuras 4.23a (molde) e 4.23b (réplica), podemos avaliar o resultado da secção transversal resultante; a profundidade máxima alcançada na prensagem; a reprodução dos microperfis e a uniformidade das mesmas.

Figura 4.23a – Microperfis confeccionados na amostra de cobre, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L.

Figura 4.23b – Microperfis produzidos através da prensagem a quente na amostra de PMMA, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L.

Através das Figuras 4.24a (molde) e 4.24b (réplica), podemos avaliar o resultado da rugosidade obtida na usinagem do molde de cobre bem como na réplica de PMMA prensado a quente.

Figura 4.24a – Medição da rugosidade no molde de cobre (microperfis), foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L

Figura 4.24b – Medição da rugosidade na replica de PMMA, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L

Podemos ver claramente que a prensagem a quente reproduziu com fidelidade as características, como exemplo, a altura do centro do molde e da réplica que teve o mesmo valor de $14\text{ }\mu\text{m}$ como a rugosidade (Ra) produzida, com uma diferença de $0,0006\text{ }\mu\text{m}$ entre o molde e a réplica.

Através das Figuras 4.25a (molde) e 4.25b (réplica), podemos avaliar o resultado da secção transversal resultante; a profundidade máxima alcançada na prensagem; a reprodução da lente esférica (concavidade) e a uniformidade das mesmas.

Figura 4.25a – Lente esférica (concavidade) confeccionado na amostra de cobre, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L

Figura 4.25b – Lente esférica (concavidade) produzido através da prensagem a quente na amostra de PMMA, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L

Através das Figuras 4.26a (molde) e 4.26b (réplica), podemos avaliar o resultado da rugosidade obtida na usinagem do molde de cobre bem como na réplica de PMMA prensado a quente.

Figura 4.26a – Medição da rugosidade no molde de cobre (lente esférica, concavidade), foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L

Figura 4.26b – Medição da rugosidade na réplica de PMMA, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L

Podemos ver claramente que a prensagem a quente reproduziu com fidelidade as características, como exemplo, tendo uma pequena retração de $2\text{ }\mu\text{m}$ na altura, mais com um mesmo comprimento de $50\text{ }\mu\text{m}$ e a rugosidade (Ra) produzida, com uma diferença de $0,0096\text{ }\mu\text{m}$ entre o molde e a réplica.

Através das Figuras 4.27a (molde) e 4.27b (réplica), podemos avaliar o resultado da secção transversal resultante; a profundidade máxima alcançada na prensagem; a reprodução da senoide e a uniformidade da mesma.

Figura 4.27a – Senoide confeccionada na amostra de cobre, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L

Figura 4.27b – Senoide produzida através da prensagem a quente na amostra de PMMA, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L

Através das Figuras 4.28a (molde) e 4.28b (réplica), podemos avaliar o resultado da rugosidade obtida na usinagem do molde de cobre bem como na réplica de PMMA prensado a quente.

Figura 4.28a – Medição da rugosidade no molde de cobre (senoide), foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L

Figura 4.28b – Medição da rugosidade na réplica de PMMA, foto produzida através de um perfilômetro mecânico, Taylor - Hobson, série 120L

Podemos ver claramente que a prensagem a quente reproduziu com fidelidade as características, como exemplo, os valores similares para rugosidade (R_a) reproduzida, com uma diferença de $0,0028 \mu m$ entre o molde e a replica.

Estes resultados demonstram a viabilidade do processo de micromoldagem através de prensagem a quente de microestruturas geradas através de torneamento com ferramenta de diamante.

Um último teste de replicagem foi feito para medir a transmitância. Para tanto foi utilizado uma amostra de PMMA com 25 mm de diâmetro por 5 mm de espessura e duas amostras de cobre eletrolítico com 25 mm de diâmetro por 5 de espessura.

A amostra de PMMA foi polida nas duas faces como mostra a figura 4.29.

Figura 4.29 – Amostra de PMMA polida com pasta de diamante com grãos de $1 \mu m$.

As duas amostras de cobre eletrolítico foram torneadas com a mesma ferramenta de diamante das amostras anteriores, ($a_p = 5 \mu m$ e $f = 10 \mu m/rev$), figura 4.30.

Figura 4.30 – Cobre eletrolítico torneado com ferramenta de diamante.

Após o polimento do PMMA e o torneamento do cobre eletrolítico, medimos a transmitância do PMMA polido e, em seguida, prensamos o mesmo a quente com as amostras de cobre eletrolítico torneadas com ferramenta de diamante.

Ao término da prensagem a quente, medimos novamente a transmitância do PMMA, agora replicado. Os resultados encontrados, figura 4.31 e figura 4.32, mostram que a replicagem aumentou a transmitância do PMMA, face 1, figura 4.31 de 85% para 97% e na face 2, figura 4.32 de 82% para 92%

Figura 4.31 – Curva de transmitância do PMMA face 1, polido e replicado a quente.

Figura 4.32 – Curva de transmitância do PMMA face 2, polido e replicado a quente.

Com este último teste, a avaliação da micromoldagem através da prensagem a quente, vem reforçar sua viabilidade, uma vez que os valores para a transmitância do PMMA encontrados na literatura é de 92% para uma espessura de 3,17 mm (GRANADO, 2006).

Capítulo 5

5 – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.1 – Conclusões

A principal motivação para o presente trabalho foi iniciar atividades envolvendo a replicagem, no que se refere à introdução de material, método e avaliação da superfície para a fabricação de elementos ópticos.

O esclarecimento e alguns aspectos relativos aos processos de replicação baseados em microestruturas geradas mecanicamente pode ser considerado um assunto de amplo interesse.

Neste sentido, este trabalho, propôs se a utilizar de cobre eletrolítico como molde, uma vez que vários artigos citam o mesmo na usinagem de ultraprecisão, devido à facilidade de remoção de material e a qualidade óptica alcançada no acabamento superficial, bem como o polimetilmetacrilato (PMMA) para produzir a réplica.

Além disso, o trabalho avaliou o torneamento com diamante no cobre, pois para melhorar a qualidade de microestruturas produzidas por replicagem, é importante conhecer a qualidade dos respectivos moldes, bem como a replicada no PMMA, pois outra preocupação que surge com este tipo de tecnologia refere-se à qualidade das superfícies reproduzidas.

A influência de aspectos como das condições de usinagem (profundidade de usinagem e avanço) sobre o acabamento (rugosidade, tamanho de grãos) e a razão de aspecto (altura e largura) foram analisadas, concluindo que:

- 1) A avaliação da usinabilidade do cobre foi importante para se escolher as condições de corte para geração das microestruturas.
- 2) Observou-se que para taxas de avanço da ordem de $5 \mu m/rev$, há uma forte influência da anisotropia do material. Isso se refletiu na recuperação elástica dos grãos do material;
- 3) Os resultados de microendentação demonstraram gerar deformações deletérias a superfície, reveladas através de escoamento lateral ao redor da marca deixada pelo endentador. Isso também foi reproduzido através da prensagem a quente;
- 4) Os resultados de reprodução dos perfis gerados por torneamento, a saber: senoide, concavidade e microperfis; demonstraram a viabilidade tanto da geração de microestruturas como sua reprodução por prensagem a quente;
- 5) O processo de torneamento, adaptado aqui para geração de arranjos de microcomponentes, mostrou-se adequado e viável para serem obtidos através do torneamento. Isso mostra que o processo de torneamento apresenta potencial para geração de arranjos de microestruturas;
- 6) Como esse tipo de tecnologia é amplamente aplicado na reprodução de microcomponentes ópticos testes de transmitância foram realizados para se saber o efeito sobre um componente replicado. Para isso, uma amostra polida foi prensada na forma de sanduíche por duas amostras torneadas planas. Os resultados antes da reprodução mostravam uma transmitância da ordem de 85%, passando para valores da ordem de 92-97% após a replicagem. Isso mostra que o processo de torneamento com ferramenta de diamante agregado com a técnica de replicagem através da prensagem a quente apresenta um grande potencial na melhora da integridade superficial, conseqüentemente a transmitância.

Os resultados confirmaram que é possível reproduzir com boa fidelidade (secção transversal; profundidade, rugosidade, uniformidade da reprodução) microestruturas através da prensagem a quente. Observou-se que tanto arestas delgadas e superfícies acabadas foram reproduzidas. Espera-se desse modo, desenvolver conhecimento da

cadeia tecnológica de processos de fabricação sempre com vistas a alta qualidade (tolerâncias nanométricas) e redução de custo.

5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Propõem-se as seguintes atividades como trabalhos futuros

- 1) Aprimoramento do processo de replicagem de matriz de microlentes empregando outros polímeros (NOA61, PVC, por exemplo);
- 2) Utilização de outras técnicas de replicagem, como exemplo, microinjeção;
- 3) Investigar a vida útil de moldes utilizados para a replicagem através da prensagem a quente;
- 4) Estabelecer uma metodologia quantitativa para a caracterização óptica dos elementos fabricados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASAEDA, T. (1995). Optical disk storage is on a roll. *Photonics Spectra*, August, p.74-80.

BAO, H.; STEVENSON, M. G.; OXLEY, P. L. B. (1976). A basic mechanism for “built-up-edge” formation in machining. *Annals of the CIRP*, vol.25(1), p.53-57.

BLOUGH, C. G.; ROSSI, M.; MACK, S. K.; MICHAELS, R L. (1997). Single point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements. *Appl. Opt.*, Vol. 36 (20), p.4648-4654, July 1997.

BRENNER, K. H.; KUFNER, M.; KUFNER, S.; MOISEL, J.; SINZINGER, S.; TESTORF, M.; GOTtert, J.; MOHR, J. (1993). Application of three-dimensional micro-optical components formed by lithography, electroforming, and plastic moulding. *Applied Optics*, v32, p.6464-6469.

BRINKSMEIER, E. PREUSS, W. (2000). (Tutorial) Ultraprecision manufacturing processes. 1st euspen Topical Conference on “Fabrication and Metrology in Nanotechnology”, Copenhagen, may 28th.

BRINKSMEIER, E. PREUSS, W. GESSENHARTER, A. (2001). Manufacturing of Calibration Standards by Diamond Machining. *Proc. of 2nd EUSPEN Int.l Conf.*, Turin, Italy, May 27th-31st.

BRINKSMEIER, E.; PREUB, W. (1999). Fabricação of Precision Molds. 1st Gen. Meet. – Eur. Soc. for Prec. Eng. And Nanotechnol. Bremen–Alemanha, p.420-423, 31/05-04/06/1999.

BRINKSMEIER, E.; PREUSS, W.; SCHMÜTZ, J. (1997). A) Manufacture of microestruturas by diamond machining. *Proc. of the 9th IPES/UME 4*, Braunschweig, Germany, vol.2, p.503-507.

BRINKSMEIER, E.; SCHMÜTZ, J. (1998). Na ultraprecisão, a chave para produtos avançados. 8th International Manufacturing Engineering Congress (IMEC), Osaka (Japão), november 1998. (Tradução: Marco Aurélio Conceição, revista: Máquinas e Metais, ano 26, n.406, nov.1999).

BURATO, C. U. (2005). Usinagem de ultraprecisão realizada com um porta-ferramenta acionado por atuador piezelétrico. 3. COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Joinville, 12 a 15 de abril, ABCM, p. 1-10.

CALLISTER, W. D. (2002). Ciência e engenharia de materiais. Ed. LTC. 5^a ed. Rio de Janeiro. 589p.

CAMARGO, R. (2005). Metodologia para avaliação da capacidade de controle de superfícies técnicas em torno de ultraprecisão. 127p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

CHENG, K.; LUO, X.; WARD, R.; LIU, X. (2002). Modeling and control of the surface integrity and functionality in precision machining. Proc. of the 3rd Int. Conf. Eur. Soc. of Prec. Eng., Eindhoven – Holanda, may 26-30, p.221-224.

CHEUNG, C. F., LEE, W. B. (2000a). A theoretical and experimental investigation of surface roughness formation in ultra-precision diamond turning. International Journal of Machine Tools & Manufacture, V.40, p-979-1002.

CHEUNG, C.F; LEE, W. B. (2000b). A multi-spectrum analysis of surface roughness formation in ultra precision machining. *Precision Engineering*, v.24, p.77-87.

CIRINO, G. A. (2002). Fabricação de elementos ópticos difrativos empregando processos de microusinagem. 119p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

COLAFEMINA, J. P. (2005). Estudo da Microusinabilidade do Ti (CP) e da Liga Ti-6Al-4V no Torneamento com Ferramenta de Diamante. 132p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

COOK, J. M. (1987). “Downstream Plasma Etching and Stripping”. Solid State Technology, vol.24, n.4, p.147-151.

CORBETT, J.; McKEOWN, P. A.; PEGGS, G. N.; WHATMORE, R. (2000). Nanotechnology: international developments and emerging products. *Annals of the CIRP*, vol. 49, n.2, p.523-545.

CORREA, F. S. (2004). Desenvolvimento do processo de usinagem de ultraprecisão de espelhos ópticos em metais não ferrosos. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação; Joinville: ABCM.

DE CHIFFRE, L.; LONARDO, P.; TRUMPOLD, H.; LUCCA, D. A.; GOCH, G.; BROWN, C. A.; RAJA, J.; HANSEN, H. N. (2000). Quantitative characterization of surface texture. *Annals of the CIRP*. v.49, n.2, p.635-651.

DORNFELD, D. A.; OLIVEIRA, J. F. G.; LEE, D. VALENTE, C. M. O. (2003). Analysis of tool and workpiece interaction in diamond turning using graphical analysis of acoustic emission. *Annals of the CIRP*. v.52, n.1, p. 479-482.

DOW, T. A.; MILLER, M. H.; FALTER, P.J. (1991). Application of a fast tool servo for diamond turning of nonrotationally symmetric surfaces. *Precision Engineering*, v.13, n.4, p. 243-249.

DUDUCH, J. G (1993). Some critical aspects of machine design and performance for the machining of brittle materials, 168p., PhD Thesis, Cranfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science.

GALE, M. T. (1997). Replication techniques for diffractive optical elements. *Microelectronic Engineering* 34, p.321-339.

GALE, M. T.; GIMKIEWICZ, C.; OBI, S.; SCHNIEPER, M.; SÖCHTIG, J.; THIELE, H.; WESTENHÖFER, S. (2005). Replication technology for optical microsystems. *Optics and Lasers in Engineering* 43, p.373-386.

GILL, D. D. (2002). Precision replication of co-molded meso and micro optics through injection molding. Dissertation (Degree of Doctor of Philosophy), 202p. Carolina State University.

GRANADO, R. M. (2006). Avaliação da integridade superficial do polimetilmetacrilato (PMMA) no torneamento com ferramenta de diamante. 126p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

HÜBNER, U.; MORGENROTH, W.; MEYER, H. G.; SULZBACH, TH.; BRENDDEL, B.; MIRANDÉ, W. (2002). Determination of the AFM tip – shape with well known shape – edge calibration structures: actual state and measuring results. Proc. of the 3rd Int. Conf. Eur. Soc. of Prec. Eng., Eindhoven – Holanda, may 26-30, p.509-512.

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. Vol.40/15, n.2, p.587-594.

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

JASINEVICIUS, R. G. (1998). Influência da transição de fase sobre os limites de ductilidade observados no torneamento de ultraprecisão do silício mono cristalino. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

JASINEVICIUS, R. G.; CAMPOS, G. P.; MONTANARI, L.; TSUKAMOTO, R.; GARCIA, CAMARGO, R.; J. P; DUDUCH, J. G.; PORTO, A. J. V. (2003). Influence of mechanical and metallurgical state of the Al-Mg alloy on the surface integrity in ultraprecision machining. RBCM – Revista Brasileira de Ciências Mecânicas – Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, vol.25, n.3, p.222-228.

JASINEVICIUS, R. G.; DUDUCH, J. G.; PORTO, A. J. V.; PURQUÉRIO, B. M. (1999). Critical aspects on the behavior of material from the mechanical tool-workpiece interaction in single point diamond turning. RBCM – Revista Brasileira de Ciências Mecânicas – Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, vol.21, n.3, p. 509-518.

KOERNER, T.; BROWN, L.; XIE, R.; OLESCHUK, R. D. (2005). Epoxy resins as stamps for hot embossing of microstructures and microfluidic channels. Sensors and Actuators B 107, p.632-639.

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

KÖNIG, W.; WECK, M.; SPENRATH, N.; LUDERICH, J. (1991). Diamond machining technology. (Tutorial), 6th IPES Sem., Braunschweig, p.96.

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

KUMON, T.; TAKEUCHI, Y.; YOSHINARI, M.; KAWAI, T.; SAWADA, K. (2002). Ultraprecision compound v-shaped microgrooving and application to dental implants. Proc. of the 3rd Int. conf. EUSPEN, Eindhoven Holanda, p.313-316.

LI, H.; JIANG, X.; LI, Z. (2004). Robust estimation in gaussian filtering for engineering surface characterization. *Precision Engineering*, v.28, n.4, p. 186-193.

LUCCA, D. A.; BRINKSMEIER, E.; GOCH, G. (1998). Progress in assessing surface and subsurface integrity. *Annals of the CIRP*. v.47, n.2, p.669-693.

MASUZAWA, T.; TÖNSHOFF, H. K. (1997). Three dimensional micromachining by machine tools. Keynote Paper, Annals of the CIRP, vol.46, n.2, p.621-628.

McKEOWN, P. A. (1987). The role of precision engineering in manufacture of the future. Annals of the CIRP, vol.36, n.2, p.495-501.

MICHAELI, W.; BÖLINGER, S.; FORSTER, J. (2002). High precision optical plastics parts through innovative manufacturing technologies. Proc. of the 3rd Int. Conf. euspen, Eindhoven – Holanda, p.317-320.

MORIWAKI, T., (1995) “Experimental Analysis of Ultra-Precision Machining”. International Japan Society of Precision Engineering, vol.29, n.4, p.287-290.

MORIWAKI, T.; OKUDA, K. (1989). Machinability of cooper in ultra-precision micro diamond cutting. Annals of the CIRP, vol.38, n.1, p.115-118.

MULTIPLAST. (2004). Literatura técnica sobre polimetilmetacrilato.

NAKAYAMA, K.; TAMURA, K. (1968). Size effect in metal cutting force. Trans. ASME, J. of Eng. for Industry, p.119-126, Feb. 1968.

NETO, L. G.; ROBERTO, L. B.; VERDONCK, P.; MANSANO, R. D.; CIRINO, G. A.; STEFANI, M. A. (2001). Desing and fabrication of a hybrid diffractive optical element for multiple-line generation over a wide angle. *Applied Optics*, vol.40, n.2, p.211-218.

NGOI, B.K.A.; SREEJITH, P.S. (2001). New materials and their machinig. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.18, n.8, p.537-544.

OHMORI, G.; TAKADA, S. (1982). Primary factors affecting accuracy in ultra-precision machining by diamond tool. Bull. Japan. Soc. of Prec. Engg., vol.16, n.1, p.3-7, Mar. 1982.

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>.> Acesso em 22.mai.2004.

PALERMO, P.; KORPEL, A.; DICKINSON, G.; WATSON, W. Vídeo disc mastering and replication. Optics and Laser Technology.

PASCO, I. K.; EVEREST, J. H. (1978). Plastics optics for opto electronics. Optics and Laser Technology, vol.10, p.71-76.

PIOTTER, V.; BENZLER et al. (2000). Micro injection molding of components for microsystems. Proc. of the 2nd Gen. meet. euspen, vol.1, p.182-189, Copenhagen-Dinamarca.

PORTO, A. J. V. (1995). Diagnóstico do processo de fabricação da operação de torneamento de face de ultraprecisão em cobre e ligas de alumínio. São Carlos. 177p. Tese (Livre Docência). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PORTO, A. J. V.; SILVA, A. T.; DUDUCH, J. G.; RÚBIO, J. C. C.; MONTANARI, L.; JASINEVICIUS, R. G.; ALMEIDA, R. M.; SCHROETER, R. B. (2004). Usinagem de ultraprecisão. São Carlos: RiMa, FAPESP.

SATA, T.; LI, M.; TAKATA, S.; HIRAOKA, H.; LI, C. Q.; XING, X. Z.; XIAO, X. G. (1985). Analysis of surface roughness generation inturning operation and its applications. Annals of the CIRP, vol.34(1), p.473-476.

SATO, M.; YAMAZAKI, T.; SHIMIZIR, Y.; TAKABAYASHI, T. (1991). A study on the microcutting of aluminum single crystals. JSME International Journal series III, vol.34(4).

SCHNEIDER, L.; KUNZMANN, H.; SCHULZ, M.; THIELE, K.; WEINGÄRTNER, I.; HASCHE, K.; HANNEMANN, J. (1999). Investigation of the topography and the optical behaviour of microstructured Fresnel lenses consisting of molds and injection molds. 1st Gen. Meet. Euspen Bremen – Alemanha, p.462-465.

SHAMOTO, E.; MORIWAKI, T. (1994). Study on elliptical vibration cutting. Annals of the CIRP, vol.43, n.1, p.35-38.

SHAW, M. C. "Metal cutting principles". Oxford Univ. Press, 593p., 1984.

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

SILVA, H. A. T. (2003). Monitoramento do torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis. 205p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SORNSUWIT, N., TAKEUCHI, Y., SAWADA, K., SATA, T. (2000). Metal mold manufacturing of Fresnel Lens by use of micro grooving technology. JSME International J. Series C, Vol. 43 (1), p.164-169.

TANAKA, T.; IKAWA; TSUWA, H. (1981). Affinity of diamond for metas. Annals of the CIRP, vol.30(1), p.241-245.

TO, S.; CHEUNG, C. F.; LEE, W. B. (2001). Influence of material swelling on surface roughness in diamond turning of single crystals. Materials science and technology, v.17, p.102-108.

VON TURKOVICH, B. F.; BLACK, J. T. (1970). Micro-machining of cooper and aluminum crystals. Trans. of the ASME, J. of Eng. for Industry, vol. 92(1), p.130-134, Feb. 1970.

WECK, M.; WENZEL, C.; WINTERSCHLADEN (2002). Process chains for replication technologies of complex optic components. Proc. of the 3rd Int. Conf. Eur. Soc. of Prec. Eng., Eindhoven – Holanda, may 26-30, p.349-352.

YI, A. Y.; LI, L. (2005). Desing and fabrication of a microlens array by use of a slow tool servo. Optics Letters, vol.30, n.13, july 1, p.1707-1709.

ZHOU, M., NGOI, B. K. A. (2003). Factor affecting form accuracy in diamond turning of optical components. Jornal of Materials Processing Technology, v.138, p.586-589.