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

MANUFATURA DE MICROELEMENTOS ÓPTICOS DIFRATIVOS

JOÃO PAULO COLAFEMINA

Mestre em Engenharia Mecânica

Engenheiro Mecânico

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

Orientador: Prof. Assoc. Renato Goulart Jasinevicius

São Carlos

- 2010 -

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

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

Colafemina, João Paulo
C683m Manufatura de microelementos ópticos difrativos / João
Paulo Colafemina ; orientador Renato Goulart Jasinevicius. --
São Carlos, 2010.

Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica e Área de Concentração em Manufatura) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Manufatura. 2. Projetos de lentes CAD. 3. Micro
elementos ópticos difrativos (μ EODS). 4. Microforjamento. 5.
Microfresagem. 6. Microtorneamento com ferramenta de
diamante. 7. Microinjeção. 8. Termomoldagem. 9. Integridade
superficial. 10. Simulação por elementos finitos CAE na
moldagem por injeção. 11. Metrologia óptica dimensional e
paraxial. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro Mecânico JOÃO PAULO COLAFEMINA.

Tese defendida e julgada em 17/12/2010 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Associado **RENATO GOULART JASINEVICIUS** - (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

Prof. Associado **REGINALDO TEIXEIRA COELHO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

Prof. Associado **LUIZ GONÇALVES NETO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado

Prof. Dr. **ALESSANDRO ROGER RODRIGUES**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP/campus de Ilha Solteira) Aprovado

Prof. Dr. **GIUSEPPE ANTONIO CIRINO**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar) APROVADO

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedicatória

*Aos meus pais e familiares, com amor, admiração e gratidão
pelo apoio durante a longa jornada
de elaboração deste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Assoc. Renato Goulart Jasinevicius, que nos anos de convivência me inspirou como grande fonte de conhecimento contribuindo para meu crescimento científico e profissional devido à sua orientação, amizade, confiança e oportunidade.

Ao Prof. Assoc. Jaime Gilberto Duduch pela atenção, colaboração, amizade, sugestões e discussões sobre o trabalho durante o curso de doutoramento e mestrado.

Ao Prof. Dr. Giuseppe Cirino pela sua contribuição no trabalho dos EODs.

À Prof. Dra. Luciana Montanari pela amizade, orientação e cooperação nos projetos.

Ao Prof. Dr. Euclides Marega pelo empréstimo do molde.

À Escola de Engenharia de São Carlos EESC – USP pela oportunidade de me oferecer o curso de doutorado em engenharia mecânica e como consequência me inserir em um grupo de profissionais seletos com conhecimento inestimável nesta área.

À equipe técnica do Laboratório NUMA, Prof. Assoc. Reginaldo Teixeira Coelho que me recebeu de portas abertas para a realização dos ensaios de microforjamento e microfresamento acompanhando e discutindo os resultados. Aos técnicos: Ariel, Adolfo e Aquiles pela ajuda e perseverança para que se concretizassem os resultados e ao colega de pós-graduação Ricardo Arai.

Aos técnicos do LAMAFE (Oficina Mecânica) José Carlos (Zé), Botelho, Mauro, que executaram a usinagem e sugeriram várias etapas do projeto.

Ao IQSC em especial ao funcionário Márcio, pelos ensaios de MEV.

Ao meu irmão Marcelo Gerald Colafemina por suas contribuições técnicas.

Ao diretor do CDCC professor Dr. Antonio Aprígio da Silva Curvelo por viabilizar os ensaios de microinjeção.

Ao Prof. Titular Sérgio Carlos Zílio e ao Me Eng° Wilson Seluque Ferreira pelas análises realizadas no banco óptico.

Aos amigos do Grupo do Laboratório de Engenharia de Precisão que me acompanharam desde o início de meus estudos nesta instituição no início de 2003, Helder, Carlos Burato, Alan, Lucas, Sherfis, Paulo, Fabiano, Laércio Júnior, Renê, Everton, Matheus, Denver, André da Motta e José Antônio pelas ajudas constantes e o ótimo ambiente de trabalho proporcionado.

À minha Mãe pela dedicação, força, carinho e amor com que sempre me acolheu.

Ao meu Pai e irmãos pelo incentivo e apoio necessário. Em especial ao meu pai, pelo grande amparo e estímulo oferecidos em prol de meus estudos.

À minha namorada e futura esposa Renata Caldeira Costa Piccirilo, pelo amor, respeito, iniciativa, assistência em todos os momentos inclusive na revisão do trabalho, companheirismo e exemplo de personalidade assertiva.

A todos grandes e velhos amigos do peito de Ribeirão Preto que sempre serão lembrados, André, Breno, Kelber, Marcos Terra, Rodolfo, Gabriel e Rodrigo, pelas grandes risadas, diálogos sobre o cotidiano e apoio nos momentos mais difíceis.

A todos os grandes amigos que fiz em São Carlos, Geraldo, Kelen, Luciane, Alessandro Roger, Paulo Barbiere, Demian, André Mirandola além de outros não citados, pelos ótimos momentos proporcionados e que estarão em minhas lembranças para o resto da minha vida.

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

Ao pessoal da pós-graduação, principalmente Beth e Ana Paula pela grande ajuda oferecida nesses anos.

A todos os colegas de trabalho e alunos do IFSP campus Sertãozinho em especial aos professores Geraldo Magela de Souza, José Oliver Figueiredo, Antônio Luís Zorzetto e a diretora Carmen Monteiro Fernandes.

Aos meus orientados de iniciação científica Marcel Henrique Militão Dib e Julian Baldo Delomo.

À FAPESP, CAPES e CNPq e IFSP pelo apoio financeiro dado a este projeto.

"Não há saber mais ou saber menos. Há saberes diferentes."
Paulo Freire

"Quando existe liberdade, tudo mais sobeja."
José de San Martín

"É necessário ter estudado muito para saber pouco."
Montesquieu

"Na vida não importa o que você esteja fazendo. Faça sempre o seu melhor!"
Ayrton Senna

A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.
Albert Einstein

RESUMO

COLAFEMINA, J. P. (2010) *Manufatura de Microelementos Ópticos Difrativos*. 216p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

Os elementos ópticos difrativos representam um mercado em franco crescimento, da ordem de bilhões de dólares. Seu uso ostensivo está nos microeletrônicos, sistemas de iluminação, telecomunicações, equipamentos de segurança e outros. Por isso, esta tese teve como objetivo realizar investigação pública profunda no assunto. Insertos de cobre eletrolítico foram usados por proporcionar excelente acabamento superficial quando usinados com ferramenta de diamante monocristalino obtendo valores de $R_a = 10,2 \text{ nm}$, $R_q = 13,56$ e $R_t = 363,06 \text{ }\mu\text{m}$ e para o aço inoxidável polido os resultados foram de $R_a = 7,02 \text{ nm}$, $R_q = 9,05 \text{ nm}$ e $R_t = 225,19 \text{ nm}$. As réplicas foram construídas em PMMA – DH ECL P com transmitância da luz avaliada em aproximadamente 90% em todo o espectro visível e infravermelho. Foram produzidos sete tipos de microelementos ópticos difrativos, baseados na geometria de Fresnel e nos arranjos de microlentes esféricas. Foi necessário desenvolver o código computacional denominado LF2010 para auxiliar a construção do projeto das microlentes anesféricas de Fresnel e calcular sua modulação de fase. Quatro processos determinísticos na fabricação dos μEODs foram usados: torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante, microforjamento, microfresamento e a combinação dos dois últimos. O método estocástico de polimento foi usado para gerar acabamento óptico e compará-lo ao torneamento com SPDT. As análises metrológicas qualitativas e dimensionais foram conduzidas com o uso do MEV e da perfilometria óptica. No torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante foi comprovada a presença do fenômeno conhecido como “*stick slip*” nos degraus da zona de Fresnel, corrigidos alterando-se o projeto. Para os arranjos de empacotamento completo os valores da rugosidade foram mais elevados em função da interatividade das lentes adjacentes do conjunto com $\phi=100\%$, chegando até mesmo a causar microfraturas na estrutura das microlentes. Após sucessivos processos de calibragem, foram manufaturadas as réplicas pelas técnicas de termomoldagem e moldagem por injeção. Os resultados de replicação das microlentes mostraram que a razão de aspecto e a relação superfície/volume influenciaram significativamente na fidelidade de replicação das microlentes, sendo constatado que as lentes de Fresnel com altura variável possuem maior volume em relação às de altura constante e,

consequentemente, melhor fidelidade na replicação. Na termomoldagem, as variações nas dimensões das cristas foram de nanômetros e a fidelidade no processo foi de aproximadamente 100% para todas as zonas de Fresnel. Nesta técnica, porém, os tempos de ciclos são até 40 vezes maiores que os da moldagem por injeção. As investigações paraxiais de FTM para a microlente de Fresnel com altura variável convexa foram de 85,2 % para 25 lp/mm, 67,5% para 50 lp/mm e 71,2% para 75 lp/mm. A simulação por elementos finitos foi usada para auxiliar nos estudos conferindo a sensibilidade do método de cálculo numérico do simulador nas escalas macroscópicas e microscópicas. No final, investigado o desgaste da aresta de corte da ferramenta, verificou-se o desgaste de flanco e a formação da APC, constituída de partículas do cavaco de cobre com formação lamelar. Conclui-se que é possível reproduzir diversos tipos de μ EODs com métodos de produção em massa da moldagem por injeção tomando-se cuidado com as variáveis do processo, geometria da peça e propriedades físicas e químicas do material a ser replicado.

Palavras Chave: Manufatura, Projetos de lentes CAD, Micro elementos ópticos difrativos (μ EODs), microforjamento, microfresagem, microtorneamento com ferramenta de diamante, microinjeção, termomoldagem, integridade superficial, simulação por elementos finitos CAE na moldagem por injeção, metrologia óptica dimensional e paraxial.

ABSTRACT

COLAFEMINA, J. P. (2010) *Manufacturing of diffractive optical microelements*. 216p. Thesis (PhD) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

Diffractive optical elements represent a fast growing market, in order of billions dollars. Its use is employed in microelectronics, illumination systems, telecommunications, security devices, and others. For this reason, this thesis aimed to make depth public research in the subject. Electrolytic copper inserts were used for providing excellent surface finish when machined with monocrystalline diamond tool getting values of $R_a = 10,2 \text{ nm}$, $R_q = 13,56 \text{ nm}$ e $R_t = 363,06 \text{ }\mu\text{m}$, for the polished stainless steel the results were $R_a = 7,02 \text{ nm}$, $R_q = 9,05 \text{ nm}$ e $R_t = 225,19 \text{ nm}$. The replicas were built in PMMA – DH ECL P with light transmittance approximately 90% for visible and infrared spectrum. Seven types of diffractive optical microelements were produced, based in Fresnel geometry and spherical microlens array. For this, it was necessary to develop the computer code called LF2010 to support the construction design of aspheric Fresnel microlenses and calculate its phase transformation function. Four deterministic manufacturing processes of μDOEs were used: ultraprecision diamond turning, microforging, micromilling and the combination of the two last. Stochastic method of polishing was used to obtain mirror surface roughness and compare to SPDT. The qualitative analysis and dimensional metrology were conducted using MEV and optical profiling system respectively. In ultraprecision diamond turning has proved the presence of the phenomenon known as “stick slip” on the steps of Fresnel zone that was corrected by changing the design. For complete packaging arrays the roughness values were higher due the interaction of adjacent lenses of set with $\phi=100\%$ have even cause microfractures in the structure of microlenses. After successive calibration procedures in the manufacture of copper inserts, replicas were fabricated by techniques of hot emboss and injection molding. The results of microlenses replication showed that the aspect ratio and surface/volume ratio affected the fidelity replication of microlenses, and had been noted that the Fresnel lenses with variable height have higher volume in relation to constant height and consequently better fidelity in replication. Hot emboss process show little variations in the dimensions of the crests, in order of few nanometers, resulting a fidelity approximately 100% for all zones of Fresnel, however the cycle's technique are up to 40 times higher than injection molding. The paraxial FTM

analysis shows 85,2 % for 25 lp/mm, 67,5% for 50 lp/mm and 71,2% for 75 lp/mm to convex Fresnel microlens with variable height. Finite element analysis was used to aid in the studies giving the sensitivity of numerical method adopted in terms of macroscale and microscale. In the end, the wear of edge cutting tool was investigated and found wear flank and formation of built up edge that was made up of chip particles of copper, which were formed continuously with segmented structure lamellar. Hence, after numerous studies and analysis we can conclude that it is possible to construct μ DOEs by means of mass production methods of injection molding taking care of process variables, part geometry and physical and chemical properties of material being replicated.

Key words: Manufacturing, lenses Design (CAD), diffractive optical microelements (DOE), microforging, micromilling, diamond tool microturning, microinjection, hot emboss, surface integrity, finite element analysis (FEA), optical e paraxial metrology.

Lista de Figuras

FIGURA 1. 1 – Augustin Fresnel (1788-1827).....	1
FIGURA 2. 1 – (a) Arranjo de empacotamento quadrado ($\phi = 78,5\%$) produzido pelo método de ataque iônico reativo em fotoresiste. (b) Arranjo de empacotamento hexagonal ($\phi = 91\%$) produzido pelo método de ataque iônico reativo em fotoresiste. (c) Arranjo de empacotamento completo ($\phi = 100\%$) produzido pelo método de feixe de raio laser (OTTEVAERE et. al. 2006).	15
FIGURA 2. 2 – Arranjos de microlentes retirados da tela de um celular comercial.	17
FIGURA 2. 3 – Lentes da tela de um celular comercial (a) Imagem 3D e (b) perfil das lentes.	17
FIGURA 2. 4 – Perfil da lente comercial com filtro de esfericidade mostrando a rugosidade.	18
FIGURA 2. 5 - Olho de uma formiga mostrando o arranjo de lentes com empacotamento completo (imagem fornecida por Dr. Márcio de Paula).	18
FIGURA 2. 6 – Desenho esquemático de Fresnel esférico (YAN et al., 2005).	20
FIGURA 2. 7 - Aberração Esférica (Smith, 2000).	21
FIGURA 2. 8 – Comparação do perfil esférico com o perfil anesférico.	21
FIGURA 2. 9 - Lentes plásticas moldadas por injeção, com zonas Fresnel, para lanternas de carros (BRINKSMEIER e PREUSS, 1997).	22
FIGURA 3. 1 – Fluxograma da Fabricação de Microlentes (OTTEVAERE et. al. , 2006)	32
FIGURA 3. 2 - Figura da superfície da amostra de Latão, com uma amplificação de 200x, mostrando as duas fases do material.	36
FIGURA 3. 3 - Imagem da superfície de uma liga Al-Mg, onde é possível observar a transferência do perfil da ferramenta sobre a peça.	38
FIGURA 3. 4 - Fotomicrografia da superfície usinada da liga Al 7075, aumento de 100x.	39

FIGURA 3. 5 – Imagem da parte inferior dos cavacos da liga Al 7075 analisados no MEV, imagem com aumento de 400 x.	39
FIGURA 3. 6 – (a) Amostra de cobre eletrolítico. (b) Fresa com ponta arredondada tipo “ball nose” para retirada de material. (c) Esfera de aço no qual é introduzido o carregamento na superfície até que ocorra deformação gerando o acabamento final da cavidade. (d) Molde usado na injeção dos arranjos de lentes. (FOREST, SAEZ, HUNTER, 2007).	42
FIGURA 3. 7 - (a) Medida de fidelidade com policarbonato na replicação dos entalhes em V do molde por meio de perfilômetro óptico 3D. (b) Preenchimento de 63% dos entalhes (c) Preenchimento de 88% dos entalhes (d) Preenchimento de 98% dos entalhes (MURAKAMI; KOTAKI; HAMADA, 2008).	44
FIGURA 3. 8 – Comparação da fidelidade dos microprismas (a) termomoldados e (b) injetados (DAVIS, 2002).....	46
FIGURA 3. 9 – Desenho esquemático de uma máquina injetora (SORS, BARDÓCZ, RADNÓTI, 19--).	49
FIGURA 3. 10 – Representação esquemática da injeção para moldagem com duas cavidades (BÄUMER, 2005).	52
FIGURA 3. 11 - Pressão e Temperatura para a moldagem por injeção (BÄUMER, 2005). ...	55
FIGURA 3. 12 – Secção da película congelada (<i>Frozen skin</i>) analisada no micrótomo com filtros polarizados: (a) Taxa de injeção de 5 mm/s e (b) Taxa de injeção de 50mm/s (LEO E CUVELLIEZ, 1996).	59
FIGURA 3. 13 – Viscosidade em função da temperatura para diversos termoplásticos (BRYDSON, 1995).	64
FIGURA 3. 14 – Viscosidade do acrílico em função da taxa de cisalhamento para várias temperaturas (Mold Flow insight®).	66
FIGURA 3. 15 – Perfil da velocidade e da frente de fluxo do escoamento do material fundido (GRIFFITHS et. al., 2008).	72

FIGURA 3. 16 – Projeto construído em CAD de uma lente de Fresnel com a geração de malhas feita no programa Mold Flow 2010 [®]	73
FIGURA 4. 1 – Diferentes configurações interferométricas para medidas das lentes (a) plano (b) côncavo (c) convexo (BÄUMER, 2005).	81
FIGURA 4. 2 – Princípio de funcionamento do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) (HANSEN et. al., 2006).	83
FIGURA 4. 3 – Diferentes técnicas de metrologia para tamanhos específicos de altura e comprimentos laterais (HANSEN et. al., 2006).	85
FIGURA 4. 4 - Comparação da transmitância da luz entre o PMMA, PC e COP (BÄUMER, 2005).	87
FIGURA 4. 5 – (a) FTM em função da frequência espacial de linhas pares /mm (b) Padrão de bandas: originais, após passar por um filme fotográfico, após passar por uma lente e após passar pela lente e o filme fotográfico (KOREN, 2007).	89
FIGURA 4. 6 – Modulação versus frequência espacial para duas lentes (HECHT, 1974).	89
FIGURA 4. 7 – Entrada harmônica e resultado da saída (HECHT, 1974).	90
FIGURA 4. 8 – Interferograma (a) lente nominal (b) lente com aberração de coma (BÄUMER, 2005).	92
FIGURA 4. 9 – Projeção da luz com coma (SMITH, 2000).	92
FIGURA 5. 1 – EDX do cobre eletrolítico usado na construção dos insertos.	95
FIGURA 5. 2 – (a) Inserto fixo usinado e polido de acordo com o projeto no APÊNDICE A (b) Montagem no porta moldes.	96
FIGURA 5. 3 – Superfície polida e espelhada do inserto fixo caracterizado no perfilômetro óptico. (a) Valores e perfil de rugosidade (b) Espectro da superfície em 3D.	97
FIGURA 5. 4 – Molde móvel ou porta-inserto construído em aço SAE 420.	97
FIGURA 5. 5 – Centro de usinagem vertical 3 eixos.	98

FIGURA 5. 6 – (a) Fresa “end ball nose” com 2 mm de diâmetro da Sandvik® (b) Aumento de 100x mostrando o detalhe da ponta arredondada (c) Aumento de 2500 x mostrando a porosidade do metal duro	99
FIGURA 5. 7 – (a) Rolamento de Esfera de aço com $\phi = 3/16$ ” (b) Punção montado.....	100
FIGURA 5. 8 – Caracterização da esfera de rolamento do punção (a) Imagem 3D e (b) Análise da rugosidade com filtro de esfericidade e inclinação.	101
FIGURA 5. 9 – Projeto dos arranjos de microlentes esféricas.....	101
FIGURA 5. 10 – Etapas do processo de fabricação dos arranjos de microlentes esféricas (a) Fixação da peça (b) Dispositivo para microreferenciamento do punção e da fresa (c) Referenciamento da fresa (d) Resultado da peça microfresada (e) referenciamento do punção (e) Resultado da peça microforjada	105
FIGURA 5. 11 – Interface do programa LF2010 que projeta lentes convencionais, de Fresnel e calcula as respectivas funções de transmitância.	106
FIGURA 5. 12 – Projeto das lentes de Fresnel de fase normalizado obtidas pelo LF2010 (a) Altura constante (b) Altura variável.....	108
FIGURA 5. 13 - Torno de ultraprecisão gerador de superfícies anesféricas ASG-2500, da RANK PNEUMO® (atualmente Precitech Components®)	109
FIGURA 5. 14 – (a) Ferramenta de meio raio - raio mão esquerda (b) Detalhe da cunha de corte da ferramenta (c) Detalhe da geometria da aresta de corte.....	111
FIGURA 5. 15 – Ferramenta Difer® usada no faceamento de cobre em diversas ampliações (a) cunha de corte (b) aresta de corte	112
FIGURA 5. 16 – (a) Projeto da ferramenta torneamento padrão de ultraprecisão da Rank Pneumo: 51mm (2”) com 63x. (b) Cunha da Ferramenta de corte. (b) Detalhe da geometria da aresta de corte com 10000x de ampliação	113
FIGURA 5. 17 – Projeto dos moldes das lentes de Fresnel	114
FIGURA 5. 18 – Lente de Fresnel durante o processo de microusinagem com ferramenta de diamante	114

FIGURA 5. 19 – Prensa usada nos ensaios de termomoldagem	115
FIGURA 5. 20 – Lente de Fresnel termomoldada (a) Lente moldada com o coalescimento completo (b) Lente com o coalescimento do material incompleto (c) Detalhe de uma trinca entre as zonas de Fresnel, formada devido à falta de coalescimento do material, ampliação 200x.....	116
FIGURA 5. 21 – Injetora ROMI® PRIMAX 100R	117
FIGURA 5. 22 – Porta moldes da Polimold® montado na injetora.....	117
FIGURA 5. 23 – Complexidade do modelo analisado pelo Mold Flow 2010®.....	118
FIGURA 5. 24 – Simulações para obter os parâmetros de (a) Temperatura de fusão do acrílico de 246,1 (b) Temperatura de resfriamento do molde de 81°C	119
FIGURA 5. 25 – Ensaio para verificar a mínima pressão de preenchimento da macrocavidade (a) 10 BAR (b) 50 BAR (c) 100 BAR (d) 200 BAR (e) 300 BAR (f) 400 BAR	120
FIGURA 5. 26 – Resultados simulados para verificar a sensibilidade e exatidão do MOLD FLOW® na pressão mínima de preenchimento e perfil de velocidade da macrocavidade (a) 10 BAR (b) 50 BAR (c) 100 BAR (d) 200 BAR (e) 300 BAR (f) 400 BAR	120
FIGURA 5. 27 – Perfilômetro óptico NT 1100 da Veeco®	122
FIGURA 5. 28 – Microscópio eletrônico de varredura da Carl Zeiss® modelo LEO OPEN X	123
FIGURA 5. 29 – Banco óptico da Trioptics®	124
FIGURA 6. 1 – Efeito dos diversos tipos de empacotamento (a) e (b) geometria da frente de onda (c) Empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ e diâmetro de abertura de 2 mm. (d) Empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ e diâmetro de abertura de 1 mm. (e) Empacotamento completo $\phi = 100\%$ e diâmetro de abertura de 2 mm. (f) Empacotamento completo $\phi = 100\%$ e diâmetro de abertura de 1 mm.	127
FIGURA 6. 2 - Microlente microfresada (a) imagem 3D (b) perfil (c) rugosidade analisada com filtro de esfericidade	128

FIGURA 6. 3 - (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 78,5\%$ e abertura de 2mm, ampliação de 33x. (b) Imagem do molde mostrando apenas uma microlente do arranjo, ampliação de 100x. (c) Detalhe mostrando as marcas originadas da técnica de microfresamento, ampliação de 200x. (d) Reprodução em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 35x (e) Imagem de uma microlente do arranjo replicada, ampliação 100x (f) Defeitos replicados nas microlentes provocados pelo microfresamento, ampliação 1000x. 130

FIGURA 6. 4 - (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 100\%$ e abertura de 2mm, ampliação de 33x (b) Imagem do molde mostrando apenas uma microlente do arranjo, ampliação de 100x (c) Detalhe indicando as microtrincas geradas pelo grande recalque causado pelo microforjamento e marcas deixadas pelas rebarbas do microfresamento, ampliação 250x (d) Reprodução em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 35x (e) Imagem de uma microlente do arranjo replicada, ampliação 100x (f) Replicação das trincas causadas pelo grande recalque do microforjamento, ampliação 1000x 132

FIGURA 6. 5 - (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 78,5\%$ e abertura de 1 mm, ampliação de 50x (b) Imagem do molde mostrando apenas uma microlente do arranjo, ampliação de 200x (c) Imagem mostrando os defeitos provocados pelo microfresamento, ampliação de 1000x (d) Reprodução em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 50x (e) Imagem de uma microlente do arranjo replicada, ampliação 200x (f) Replicação dos defeitos causados pelas rebarbas do microfresamento, ampliação 1000x 134

FIGURA 6. 6 – Análise no perfilômetro óptico do molde com arranjo de empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ e abertura circular de 1 mm (a) Imagem 3D (b) Perfil (c) Interferograma. (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação 135

FIGURA 6. 7 - Arranjo com empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ analisado no perfilômetro óptico da lente de PMMA injetada com e abertura circular de 1 mm (a) Imagem 3D (b) Perfil (c) Interferograma. (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação..... 137

FIGURA 6. 8 - (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 100\%$ e abertura de 1 mm, ampliação de 32x (b) Imagem do molde mostrando apenas uma

microlente do arranjo, ampliação de 200x (c) Detalhe indicando as marcas deixadas pelas rebarbas do microfresamento recalçadas, ampliação 1000x (d) Reprodução em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 35x (e) Imagem de uma microlente do arranjo replicada, ampliação 200x (f) Replicação das rebarbas causadas pela operação de microfresamento, ampliação 1000x..... 138

FIGURA 6. 9 - Arranjo de empacotamento completo $\phi = 100\%$ analisado no perfilômetro óptico o molde de cobre com abertura quadrada de 1 mm (a) Imagem 3D (b) Perfil. (c) Interferograma (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação..... 140

FIGURA 6. 10 - Arranjo de empacotamento completo $\phi = 100\%$ analisado no perfilômetro óptico da lente de PMMA injetada com abertura quadrada de 1 mm (a) Imagem 3D (b) Perfil (c) Interferograma (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação 141

FIGURA 6. 11 - (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 78,5\%$ e abertura de 2 mm, ampliação de 50x (b) Imagem do molde mostrando apenas uma microlente do arranjo, ampliação de 100x (c) Réplica em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 50x (d) Imagem de uma microlente do arranjo replicada, ampliação 100x..... 143

FIGURA 6. 12 – Arranjo de empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ analisado no perfilômetro óptico o molde de cobre com abertura quadrada de 1 mm (a) Imagem 3D (b) Perfil (c) Interferograma (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação..... 144

FIGURA 6. 13 – (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 100\%$ e abertura de 2mm, ampliação de 50x (b) Imagem do molde mostrando apenas uma microlente do arranjo, ampliação de 100x (c) Detalhe indicando as microtrincas geradas pelo grande recalque causado pelo microforjamento, ampliação 250x (d) Reprodução em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 35x (e) Imagem destacando uma microlente do arranjo replicada, ampliação 100x (f) Replicação das trincas causadas pelo grande recalque do microforjamento, ampliação 1000x 146

FIGURA 6. 14 - Arranjo de empacotamento completo $\phi = 100\%$ analisado no perfilômetro óptico da lente de PMMA injetada com abertura quadrada de 2 mm (a) Imagem 3D (b) Perfil (c) Interferograma. (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação 147

FIGURA 6. 15 - (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 78,5\%$ e abertura de 1 mm, ampliação de 50x (b) Imagem do molde mostrando apenas uma microlente do arranjo, ampliação de 200x (c) Reprodução em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 50x (e) Imagem de uma microlente do arranjo replicada, ampliação 200x 148

FIGURA 6. 16 - Arranjo com empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ analisado no perfilômetro óptico do molde de cobre com abertura circular de 1 mm (a) Imagem 3D (b) Perfil (c) Interferograma (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação 149

FIGURA 6. 17 – (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 100\%$ e abertura de 1 mm, ampliação de 33x (b) Imagem do molde mostrando apenas uma microlente do arranjo, ampliação de 200x (c) Reprodução em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 35x (d) Imagem de uma microlente do arranjo replicada, ampliação 200x 150

FIGURA 6. 18 - Arranjo de empacotamento completo $\phi = 100\%$ analisado no perfilômetro óptico da lente de PMMA injetada com abertura quadrada de 1 mm. (a) Imagem 3D (b) Perfil (c) Interferograma (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação 151

FIGURA 6. 19 – (a) Molde côncavo da lente de Fresnel com altura constante em cobre eletrolítico usado na termomoldagem (b) Lente de Fresnel convexa de PMMA com altura constante de 10 μm reproduzida por meio da moldagem por prensagem a quente (c) Molde côncavo da lente de Fresnel em cobre eletrolítico usada na moldagem por microinjeção (d) Réplica da lente de Fresnel convexa de PMMA injetada com altura constante de 10 μm 154

FIGURA 6. 20 – Vetores em Z, X e R (resultante) (a) Deslocamento (b) Avanço 155

FIGURA 6. 21 – (a) Microscopia eletrônica de varredura do molde côncavo da lente de Fresnel com altura constante de 10 μm (b) Defeito causado pela falta de centralização da ferramenta de corte de diamante. (c) Degraus da zona de Fresnel mostrando a aresta bem definida e a ocorrência do fenômeno conhecido como “stick slip”. (d) Microlente termomoldada de Fresnel convexa com 30 zonas. (e) Defeito causado pela operação de faceamento reproduzido na microlente. (f) Aresta do degrau da zona de Fresnel bem definida e reprodução do fenômeno de “stick-slip”. (g) Microlente injetada de Fresnel convexa com 30

zonas. (h) Defeito reproduzido no eixo óptico da lente. (i) Degrau da zona de Fresnel com perfil arredondado decorrente da baixa fidelidade na replicação. 157

FIGURA 6. 22 – (a) Perfil do defeito causado pela falta de centralização da ferramenta de corte (b) Imagem 3D da protuberância 158

FIGURA 6. 23 – Perfil (a) Molde exibindo a altura da 1^a para 2^a zona (b) Molde exibindo a altura da 30^a zona (c) Réplica termomoldada exibindo a altura da 1^a para 2^a zona (d) Réplica termomoldada exibindo a altura da 30^a zona (e) Réplica injetada na condição n. 1 exibindo a altura da 1^a para 2^a zona. (f) Réplica injetada exibindo a altura da 30^a zona..... 159

FIGURA 6. 24 – Gráfico de fidelidade das zonas de Fresnel com altura constante de 10 µm na região A, comparando os processos de termomoldagem e injeção 161

FIGURA 6. 25 - Gráfico de fidelidade das zonas de Fresnel com altura constante de 10 µm na região B, comparando os processos de termomoldagem e injeção..... 161

FIGURA 6. 26 – Espectro das primeiras e últimas zonas exibindo as franjas interferométricas do (a) Molde côncavo (b) Réplica convexa termomoldada. (c) Réplica convexa injetada.... 162

FIGURA 6. 27 - (a) Microscopia eletrônica de varredura do molde côncavo da lente de Fresnel com altura variável e largura constante de 250 µm (b) Degraus da zona de Fresnel mostrando a aresta bem definida (c) Protuberância causada pela má centralização da ferramenta com formato cilíndrico. (d) Microlente injetada de Fresnel convexa com 40 zonas. (e) Degrau da zona de Fresnel com aresta bem definida. (f) Protuberância replicada(g) Microlente termomoldada de Fresnel convexa com 40 zonas. (h) Aresta do degrau da zona de Fresnel bem definida (i) Ausência da protuberância, ferramenta calibrada. 165

FIGURA 6. 28 - Perfil (a) Molde exibindo a altura da 1^a zona. (b) Molde exibindo a altura da 40^a zona. (c) Réplica termomoldada exibindo a altura da 1^a zona. (d) Réplica termomoldada exibindo a altura da 30^a zona. (e) Réplica injetada exibindo na condição n. 1 a altura da 1^a zona. (f) Réplica injetada exibindo a altura da 40^a zona. 166

FIGURA 6. 29 - Gráfico de fidelidade das zonas de Fresnel convexa com altura variável e largura constante de 250 µm na região A, comparando os processos de termomoldagem e injeção. 168

FIGURA 6. 30 - Gráfico de fidelidade das zonas de Fresnel convexa com altura variável e largura constante de 250 μm na região B, comparando os processos de termomoldagem e injeção	168
FIGURA 6. 31 - Espectro das primeiras e últimas zonas exibindo as franjas interferométricas do (a) Molde côncavo (b) Réplica convexa termomoldada. (c) Réplica convexa injetada....	170
FIGURA 6. 32 - (a) Microscopia eletrônica de varredura do molde convexo da lente de Fresnel com altura variável e largura constante de 250 μm (b) Degraus da zona de Fresnel mostrando a aresta bem definida (c) Marcas da ferramenta em função do avanço de corte de 2,5 $\mu\text{m}/\text{rev}$. (d) Microlente injetada de Fresnel côncava com 40 zonas. (e) Degrau da zona de Fresnel com aresta razoavelmente definida (f) Protuberância no centro da lente replicada ..	171
FIGURA 6. 33 - Perfil (a) Molde convexo exibindo a altura da 1 ^a zona (b) Molde exibindo a altura da 40 ^a zona (c) Réplica injetada exibindo na condição n. 1 a altura da 1 ^a zona (d) Réplica injetada exibindo a altura da 40 ^a zona	172
FIGURA 6. 34 - Gráfico de fidelidade das zonas de Fresnel côncavas com altura variável e largura constante de 250 μm na região A, do processo de injeção	174
FIGURA 6. 35 - Gráfico de fidelidade das zonas de Fresnel côncavas com altura variável e largura constante de 250 μm na região A, do processo de injeção	174
FIGURA 6. 36 - Espectro das primeiras e últimas zonas exibindo as franjas interferométricas do (a) Molde convexo (b) Réplica côncava injetada	175
FIGURA 6. 37 – Função de transmitância calculada no LF2010 da microlente de Fresnel com altura constante de 10 μm	177
FIGURA 6. 38 - Função de transmitância calculada no LF2010 da microlente de Fresnel com altura variável	178
FIGURA 6. 39 – Transmitância medida no espectrofotômetro do PMMA DH ECL – P usado nos ensaios	180
FIGURA 6. 40 – Tempo de preenchimento máximo.....	181
FIGURA 6. 41 – Tempo de ciclo.....	182

FIGURA 6. 42 – Confiança de preenchimento (a) Condição n. 1 (b) condição n. 6.....	183
FIGURA 6. 43 – Previsão da qualidade de preenchimento da peça (a) Condição n. 1 (b) condição n. 6.....	184
FIGURA 6. 44 – Queda de pressão durante o preenchimento	185
FIGURA 6. 45 – Temperatura na frente de escoamento.....	186
FIGURA 6. 46 – Temperatura do substrato no final do preenchimento.....	187
FIGURA 6. 47 – Variação do tempo de resfriamento	188
FIGURA 6. 48 – Pressão de injeção durante o ciclo de moldagem: (a) condição n. 1, (b) condição n. 6.....	189
FIGURA 6. 49 – Força de fechamento do molde: (a) condição n. 1, (b) condição n. 6	190
FIGURA 6. 50 – Retração volumétrica (%) (a) Condição n. 1, (b) Condição n. 6	191
FIGURA 6. 51 – Rechupe na haste da peça.....	192
FIGURA 6. 52 – Orientação das cadeias moleculares: (a) Camada superficial “ <i>skin</i> ”, (b) No substrato ou núcleo	192
FIGURA 6. 53 (a) Lente reproduzindo o efeito de alinhamento das cadeias poliméricas na camada superficial (b) Avaliação no MEV das linhas de fluxo e o respectivo alinhamento das cadeias poliméricas, revelando o aparecimento de microvórtices no escoamento da camada superficial (c) Microvórtices ampliados.....	193
FIGURA 6. 54 – (a) PMMA extrudado. (b) Avaliação no MEV da espessura da camada superficial	194
FIGURA 6. 55 – Linhas de soldagem analisadas no: (a) Software CAE (b) Resultado experimental avaliado no projetor de perfil (c) e Perfilômetro óptico.....	195
FIGURA 6. 56 - Ferramenta de Torneamento Padrão Rank Pneumo (a) Aresta desgastada (b) Desgaste de flanco e aresta postiça de corte (APC).....	196

FIGURA 6. 57 – Ferramenta de corte da Contour®: ferramenta de meio raio - raio mão esquerda (a) (b) Adesão do cavaco formando a aresta postiça de corte (c) avarias da aresta de corte..... 197

FIGURA 6. 58 – (a) Cavaco em forma de fita de cobre eletrolítico usinado com ferramenta de diamante $f = 2,5 \mu\text{m/rev}$ e $a_p = 3 \mu\text{m}$ (b) Parte superior do cavaco exibindo a estrutura lamelar em forma de lamelas justapostas (c) Parte inferior do cavaco exibindo a deformação plástica imposta pela ferramenta de corte de diamante 199

Lista de Tabelas

TABELA 2. 1 - Características do Poli (metacrilato de metila) (Crawford, 1987; Mano, 1991; Mark, 2007; Bäumer 2005).	31
TABELA 2. 2- Tolerâncias de componentes para diversos produtos fabricados utilizando processos de usinagem (McKEOWN, 1987).....	41
TABELA 4. 1 - Tolerâncias e especificações para peças ópticas moldadas por injeção (BÄUMER, 2005).77TABELA 4. 2 – Microtopografia superficial dos instrumentos e seu uso em micro e nano metrologia (HANSEN et. al., 2006).....	84
TABELA 4. 3 – FTM de lentes comerciais e encontradas na literuatura.	91
TABELA 5. 1 – Propriedades Físicas (AMERICAN SOCIETY FOR METALS ASM, 1998).	97
TABELA 5. 2 - Propriedades Mecânicas (AMERICAN SOCIETY FOR METALS ASM, 1998).	98
TABELA 5. 3 – Composição do aço VND (%).	100
TABELA 5. 4 – Cálculo da profundidade dos arranjos de microlentes esféricas.	103
TABELA 5. 5 – Valores reais de profundidade usados para construir os insertos de arranjos de microlentes esféricas.	104
TABELA 5. 6 – Profundidade real usado para insertos apenas fresados.....	104
TABELA 5. 7 – Parâmetros paraxiais das lentes de Fresnel.....	107
TABELA 5. 8 – Parâmetros de injeção usados na replicação dos μ EODs.	121
TABELA 6. 1 – Rugosidade do molde de cobre eletrolítico e das réplicas da lente de altura constante convexa de PMMA termomoldada e injetada.....	163
TABELA 6. 2 - Rugosidade do molde de cobre eletrolítico e das réplicas da lente de altura variável convexa de PMMA termomoldada e injetada.	170

TABELA 6. 3 - Rugosidade do molde de cobre eletrolítico e das réplicas da microlente de altura variável côncava de PMMA injetada. 175

TABELA 6. 4 - FTM da para a microlente de Fresnel convexa com altura variável injetada. 179

Siglas, Abreviações e Símbolos

η – Viscosidade [Pa.s ou Mpa.s] ou índice de refração

ϕ = Diâmetro nominal da lente ou empacotamento dos arranjos esféricos [mm]

AN – Abertura numérica [mm]

CAE – Engenharia auxiliada por computador

CDs – Compact disc ou discos compactos

CNC – Controle numérico computadorizado

CROWN - Vidro óptico tipo soda lime (vidro de vidraças, feito a base de óxido de silício com a adição de óxido de sódio (soda - Na₂O) e óxido de cálcio (lime - CaO)) de baixo índice de refração do perfil)

DVD – *Digital video disc* ou disco de vídeo digital

EOD – Elemento óptico difrativo

FLINT - Vidro óptico denso de alto índice de refração

FTM ou MTF – Função de transferência de modulação

FTO – Função da transferência óptica

IEF - Índice de Escoamento do Fundido

IV - Infravermelho

MEMS – Microssistemas Eletromecânicos

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

mm – Milímetro (10^{-3} m)

nm – Nanômetro (10^{-9} m)

PC – Policarbonato

PCD – Diamante policristalino

PMMA - Poli (metacrilato de metila) ou acrílico

PS – Poliestireno

Ra – Rugosidade Média (Rugosidade da média aritmética das alturas) [μ m ou nm]

RMS ou Rq – Rugosidade média quadrática [μ m ou nm]

Rt – Rugosidade de Pico a vale do perfil [μ m ou nm]

Sa – Rugosidade superficial média [μ m ou nm]

SPDT – *Single point Diamond turning* ou ferramentas de ponta única de diamante

St – Rugosidade superficial de Pico a vale [μ m ou nm]

T_g – Temperatura de transição vítrea [°C]

T_m – Temperatura de fusão cristalina [°C]

UV – Ultravioleta

VIS - Luz visível

$\dot{\gamma}$ – Taxa de cisalhamento [1/s ou Hz]

λ – Comprimento de onda da luz [nm]

μ EOD – Microelemento óptico difrativo

μ m – Micrometro (10^{-6} m)

τ – Tensão de cisalhamento [MPa]

Sumário

RESUMO	<i>i</i>
ABSTRACT	<i>iii</i>
Lista de Figuras.....	<i>v</i>
Lista de Tabelas.....	<i>xvii</i>
Siglas, Abreviações e Símbolos	<i>xix</i>
Sumário	<i>xxi</i>
Capítulo 1 – Introdução	<i>1</i>
1.1 Microelementos ópticos difrativos (μ EODs) – Aspectos Gerais.....	2
Objetivos	9
Estrutura da Tese	10
Capítulo 2 – Elementos Ópticos Difrativos (EOD).....	<i>13</i>
2.1 – Arranjos de Microlentes Esféricas	13
2.1.1 – Exemplos de aplicações.....	16
2.2 – Lentes de Fresnel	19
2.2.1 – Exemplos de aplicações.....	22
2.2.2 – Análise de ondas ópticas – Modulação de fase em lentes delgadas.....	23
Capítulo 3 - Materiais e Processos de Fabricação dos μEODs.....	<i>25</i>
3.1 - Seleção do Material Polimérico óptico para replicação dos μ EODs.....	29
3.2 - Métodos atuais de manufatura dos insertos usados na fabricação dos microelementos ópticos.....	32
3.2.1 – Considerações quanto à produção de μ EODs.....	34
3.2.2 – Fabricação do molde e inserto: seleção dos materiais e processos	34
3.2.2.1 Fabricação do inserto para a microlente de Fresnel: processos de usinagem de ultraprecisão com ferramenta de ponta de diamante monocristalino.....	36
3.2.2.2 Fabricação do inserto para os arranjos esféricos: técnicas de microfresamento e microforjamento.	42
3.3 Métodos de replicação dos elementos ópticos difrativos usando polímeros.....	43
3.3.1 - Razão de Aspecto e Fidelidade na Replicação de elementos ópticos.....	43
3.3.2 - Moldagem por prensagem a quente ou termomoldagem	45
3.3.3 - Moldagem por injeção	46

3.3.3.1 - Descrições do processo para uma máquina do tipo rosca-sem-fim ...	49
Abastecimento	49
Injeção	51
Recalque “ <i>holding pressure</i> ”	53
Resfriamento.....	53
3.3.3.2 - Principais desafios da moldagem por microinjeção.....	55
3.3.3.3 - Temperatura da fusão cristalina (T_m) na injeção	57
3.3.3.4 - Temperatura do molde.....	57
3.3.3.5 - Velocidade de injeção	58
3.3.3.6 - Retração e empenamento.....	60
3.3.3.7 - Rugosidade superficial do molde e microgeometrias	62
3.3.3.8 - Temperatura de transição vítrea (T_g).....	62
3.3.3.9 - Viscosidade e reologia do material fundido	63
3.3.3.10 - Peso molecular e grau de polimerização	66
3.3.3.11 - Cristalinidade	68
3.3.3.12 - Calor específico.....	69
3.3.3.13 - Coeficiente de transferência térmica	69
3.3.3.14 - Módulo de elasticidade.....	69
3.3.4 - Análise geral sobre os parâmetros e propriedades na microinjeção	70
3.3.5 – Simulação	70
Capítulo 4 – Metrologia	75
4.1 - Rugosidade superficial.....	77
4.2 – Metrologia típica usada na caracterização dos μ EODs.....	78
4.2.1 - Metrologia dimensional e perfilometria de contato	78
4.2.2 – Metrologia óptica	80
4.2.3 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	82
4.2.4 - Microscopia de Varredura por Sonda Mecânica (SPM)	83
4.3 - Seleção da metrologia dimensional usada nos μ EODs.....	84
4.4 – Análise e metrologia paraxial das microlentes	86
4.4.1 – Transparência e transmitância da luz	86
4.4.2 – Função Transferência de Modulação (FTM)	87
4.4.3 - Interferograma	91
Capítulo 5 - Materiais e Métodos	95

5.1 - Material para fabricação dos insertos	95
5.1.1 – Insertos de cobre	95
5.1.2 – Molde plano fixo e porta-insertos	96
5.2 - Fabricação dos arranjos de microlentes esféricas	98
5.2.1 - Máquina-ferramenta – Centro de Usinagem CNC	98
5.2.2 - Fresa de metal duro	99
5.2.3 - Punção de aço VND	100
5.2.4 - Concepção do projeto e calibragem do processo de fabricação dos arranjos de microlentes esféricas (microfresamento e microforjamento)	101
5.3 – Fabricação das lentes de Fresnel	105
5.3.1 – Projeto e concepção das microlentes de Fresnel	105
5.3.2 - Máquina-ferramenta – Torneamento de ultraprecisão	108
5.3.3 – Seleção das ferramentas de diamante	110
5.3.4 – Etapas de calibração do processo de torneamento de ultraprecisão	113
5.4 – Termomoldagem – Equipamentos e calibragem do processo	115
5.5 - Moldagem por Microinjeção	116
5.5.1 – Máquina injetora	116
5.5.2 – Porta-moldes	117
5.5.3 – Calibragem dos parâmetros técnicos da moldagem por injeção	118
5.6 - Perfilômetro óptico	122
5.7 - Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.)	123
5.8 - Análises Paraxiais	124
Capítulo 6 – Resultados e Discussões	125
6.1 – Arranjos de microlentes esféricas	126
6.1.1 – Arranjo de microlentes esféricas fresadas	127
6.1.2 – Arranjos de microlentes esféricas fresadas e conformadas	129
6.1.2.1 – Empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ abertura circular de 2 mm ...	129
6.1.2.2 – Empacotamento completo $\phi = 100\%$ abertura quadrada de 2 mm .	131
6.1.2.3 – Empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ abertura circular de 1 mm ...	133
6.1.2.4 – Empacotamento completo $\phi = 100\%$ abertura quadrada de 1 mm .	137
6.1.3 – Arranjo de microlentes esféricas conformadas	142
6.1.3.1 – Empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ abertura circular de 2 mm ...	142
6.1.3.2 – Empacotamento completo $\phi = 100\%$ abertura quadrada de 2 mm .	145

6.1.3.3 – Empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ abertura circular de 1 mm ...	147
6.1.3.4 – Empacotamento completo $\phi = 100\%$ abertura quadrada de 1 mm..	150
6.2 - Lente de Fresnel	153
6.2.1 – Lente de Fresnel convexa com altura constante	153
6.2.2 – Lente de Fresnel convexa com altura variável.....	164
6.2.3 – Lente de Fresnel côncava com altura variável.....	171
6.3 – Análises Paraxiais	177
6.3.1 – Modulação de fase para microlente de Fresnel com altura constante	177
6.3.2 – Modulação de fase para microlente de Fresnel com altura Variável	177
6.3.3 – FTM e Distância Focal	178
6.3.4 – Transmitância do PMMA - DH ECL – P	180
6.4 – Simulações.....	181
6.4.1 – Tempo de preenchimento	181
6.4.2 – Confiança de preenchimento	182
6.4.3 – Qualidade de preenchimento	183
6.4.4 – Queda de pressão	184
6.4.5 – Temperatura na frente de escoamento, do substrato e de refrigeração ..	185
6.4.6 – Pressão de injeção e força de fechamento do molde.....	188
6.4.7 – Retração no volume da peça	190
6.4.8 – Rechupe	191
6.4.9 – Camada superficial “skin”	192
6.4.10 – Linha de soldagem	194
6.5 - Desgaste da ferramenta de diamante	196
6.6 - Análise do Cavaco	198
Capítulo 7 – Conclusões.....	201
Sugestões para Trabalhos futuros.....	209
Referências.....	211
ANEXO A – Laudo técnico do Cobre Eletrolítico.....	217
APÊNDICE A – Projetos	221

Capítulo 1 – Introdução

Buffon em 1748 sugeriu a manufatura de grandes lentes com formato concêntrico e trinta anos mais tarde, tais lentes foram na verdade feitas por Abbè Rochon. Este primeiro trabalho provavelmente não era conhecido por Fresnel em 1819-1820, que primeiramente pensou na ideia de fazer tais lentes para faróis. Quando terminou sua primeira lente em 1822, houve grande sucesso resultando na manufatura de muitas instalações de faróis nas costas francesas. Desse modo, o nome de “Fresnel” ficou associado a lentes desse tipo (MILLER; McLEOD; SHERWOOD, 1951).

O trabalho de Augustin Jean Fresnel (FIGURA 1. 1) (1788-1827) sobre a difração de ondas apresentado para a Academia de Ciências da França em 1818 foi de suma importância para a aceitação da teoria ondulatória da luz. Após esta data foram realizadas e explicadas com sucesso uma série de observações relacionadas com os fenômenos de interferência e difração das ondas luminosas, e conseqüentemente começaram a ser produzidos dispositivos, componentes e equipamentos ópticos buscando aplicações tecnológicas (HECHT, 1974).

FIGURA 1. 1 – Augustin Fresnel (1788-1827).

Os diversos tipos de lentes prismáticas agora são erroneamente chamados de “Lentes de Fresnel”. Essas lentes possuem vantagens significativas em diversas aplicações. Embora muitas lentes de vidro tenham sido vendidas, a sua manufatura apresenta várias dificuldades. Entre estas, a alta tensão superficial evita que o vidro seja conformado em moldes com detalhes muito pequenos e os padrões requeridos atualmente não permitem a fabricação por métodos convencionais, tais como a retifica ou o polimento (MILLER; McLEOD; SHERWOOD, 1951).

As lentes de Fresnel podem ser usadas para reduzir a distância focal em lentes de projeção e câmeras fotográficas com o objetivo de eliminar os chamados “hot spot” usualmente observadas em tais câmeras. Uma fina lente de Fresnel pode eliminar os defeitos de “hot spot” e fazer com que a superfície da lente inteira fique luminosa. Em alguns casos o uso das lentes de Fresnel pode aumentar o brilho de uma imagem em vinte vezes (MILLER; McLEOD; SHERWOOD, 1951).

As placas de zonas de Fresnel são empregadas em telescópios astronômicos e em microscópios de raios-X. Essas lentes apresentam ainda a vantagem da possibilidade de uso tanto para focalizar um dado comprimento de onda quanto para filtrar radiação indesejada, uma vez que elas focalizam luz de diferentes comprimentos de onda em diferentes distâncias (MULLER; SILVA; FABRIS, 2005).

Outra vantagem desse tipo de lente é a sua espessura que pode ser muito fina permitindo diminuir a massa e o espaço usado, abrangendo o seu uso em diversos tipos de projetos. Em função disso, ocorre diminuição da aberração cromática e a transmissão da luz ultravioleta se torna muito melhor nesse tipo de lente em comparação com lentes convencionais (MILLER; McLEOD; SHERWOOD, 1951; YAN et al., 2005).

1.1 Microelementos ópticos difrativos (μ EODs) – Aspectos Gerais

A invenção do laser no início da década de 60 e o rápido desenvolvimento dessas tecnologias associadas iniciaram mudanças significativas nos materiais ópticos, e as pessoas do ramo óptico confrontaram rapidamente com o crescimento de novos e frequentes materiais exóticos dos quais pouco ou nenhum conhecimento existia nessa época. Algumas dificuldades surgiram, tais como o modo de trabalhar esses materiais e os ópticos tiveram que aprender rapidamente a adaptar e desenvolver métodos criativos para lidar com os novos requerimentos (KAROW, 1993).

No início dos anos 70 surgiram os materiais para operar no infravermelho direcionado à área militar, dando início à importância dos componentes infravermelhos. Nessa mesma década, foi presenciado o desenvolvimento do torneamento com ferramentas de ponta única de diamante (SPDT), o qual adicionou uma variedade de metais na crescente lista de materiais ópticos. O uso do SPDT facilitou a produção de superfícies complexas que não poderiam ser feitas com o uso dos métodos tradicionais (KAROW, 1993).

Nos anos 80 a indústria teve como ênfase criar novos materiais para o uso de fibras ópticas, optoeletrônica e o desenvolvimento de novos materiais para o uso com o laser, aumentando a versatilidade para o uso na medicina e outras aplicações comerciais (KAROW, 1993).

Atualmente, os sistemas ópticos são os principais sistemas no uso das telecomunicações e das redes de computadores. A integração dos fótons é o próximo passo para aumentar a velocidade dos computadores, de modo que a comunicação entre os barramentos (bus) de placa para placa está mudando de sistemas elétricos para sistemas ópticos, superando o problema de espaço limitado das vias de comunicação elétrica (GIL, 2002).

A miniaturização tem provado ser a chave para novos mercados no que se refere ao progresso do desenvolvimento da microeletrônica. Este processo auxilia a economizar material, energia, portabilidade e tempo nos processos de fabricação. Em conjunto com a produção em série e técnicas de replicação, esta tecnologia se torna uma promessa no campo da microtecnologia, que além da microeletrônica, pode ser usada nas áreas de micromecânica, microfluídica, metrologia e micro-óptica (KEMMANN, SCHAUMBURG e WEBER, 1999; BAUER et al., 1999; FOREST, SAEZ, HUNTER, 2007; RIEMER, 2008).

Os componentes elétricos estão cada vez menores, e a presença ubíqua de pequenos displays de celulares em telas de LCD mostra o uso ostensivo das microlentes.

Tornar esses sistemas fotônicos rápidos e pequenos requer ao mesmo tempo a introdução de processos massivos de produção e miniaturização. Como resultado, alta qualidade, alta precisão e baixos custos na produção de EODs são itens indispensáveis.

Devido aos motivos apresentados, nos últimos 15 anos diversos grupos de pesquisados estão focando sua atenção no desenvolvimento de técnicas de fabricação de μ EODs (OTTEVAERE et al., 2006).

A produção de microcomponentes se tornou não apenas respeitável, mas sim líder de mercado. Tay ET. AL. (2005) presumiu que o giro deste ramo de negócios em 2007 ficaria

em torno de US\$ 26,4 bilhões de dólares com potencial de crescimento anual médio de 19,1%.

Algumas outras áreas em que pode ser verificado o emprego de microssistemas ópticos são:

- **Sensores micro ópticos:** Grandes variedades de medidores ópticos estão sendo usados na escala industrial. Estes sistemas são baseados em óptica volumétrica. Microinterferômetros podem medir distâncias ou parâmetros físicos tais como temperatura e pressão (BRENNER, 1993).
- **Sistemas de leitura paralela:** Para aplicação de discos ópticos, a alta densidade de interconexão da imagem pode melhorar a taxa de transferência de dados baseando-se no uso de microlentes e microprismas, obtendo-se a leitura de centenas de pixels simultaneamente (BRENNER, 1993).
- **Eletrônica:** no mercado de microcomputadores, impressoras jato de tinta empregam o uso de sensores ópticos, além de mouses ópticos e scanners que realizam leitura de códigos de barra. A injeção de sistemas optomecânicos nestes inventos é bom exemplo de integração e miniaturização. Entretanto o crescimento mais agressivo que impulsionou esta indústria ocorreu recentemente nas câmeras digitais (*“charge coupled devices”* CCDs, *“complementary metal oxide semiconductors”* CMOSs e telas de cristal líquido) e nos celulares com câmeras (BÄUMER, 2005).
- **Iluminação:** Atualmente muitos esforços voltaram-se para a pesquisa e o desenvolvimento de novas melhorias e aplicações para os LEDs. Para usar todo o potencial deste tipo de fonte de luz é necessária a aplicação da óptica. Considerando que a iluminação possui grande volume de negócio, os LEDs prometem uma revolução, pois geram pouco calor quando comparados com as lâmpadas de bulbo e a união de elementos ópticos moldados em conjunto com os LEDs seria a solução ideal para este tipo de aplicação (BÄUMER, 2005). Alguns sistemas de iluminação usam lâminas guadoras de luz (LGL) para decoração ou iluminação de veículos. Várias camadas de filmes prismáticos, difrativos e difusos compõem esses sistemas. A fonte de luz é direcionada em um lado ou ambos da LGL e guiada internamente por meio da refração interna até os raios refletirem e refratarem nos micro padrões de arranjos criados na peça (LIN, ISAYEV, MEHRANPOUR, 2008).

- **Medicina:** Existem grandes campos de aplicação na indústria médica. Em diversas áreas, as tecnologias de sensores ópticos são muito usadas. Biosensores e biotecnologia são os maiores exemplos nessas aplicações sendo o medidor de hemoglobina o dispositivo mais comum que faz uso desta tecnologia (BÄUMER, 2005). Forest, C. R. (2007) fabricou com o uso de microlentes espectrofotômetro para diagnóstico de mutações genéticas humanas em seu trabalho de doutorado. A engenharia óptica precisa unir estes dispositivos de forma a criar, por exemplo, medidas exatas, com sensibilidade por meio do uso de métodos não invasivos.
- **Indústria automotiva:** na indústria automotiva pode-se citar o uso de iluminação com LED e também em câmeras que mostram a traseira do veículo no uso da marcha ré. Entretanto, há diversos campos de aplicação da micro-óptica no ramo automotivo inclusive nos sensores de chuva que atualmente são amplamente empregados (BÄUMER, 2005).
- **Segurança e Biometria:** este é um mercado emergente que é usado para a segurança e identificação pessoal. Na identificação do corpo de uma pessoa tem ganhado um novo interesse. Os exemplos mais comuns são detectores de digitais e escâner de retina. Em termos de custo benefício, a moldagem por injeção se torna boa combinação neste mercado (BÄUMER, 2005).

Cada uma dessas aplicações requer o uso da manufatura de precisão óptica em larga escala. Conforme a demanda por microeletrônica aumenta, a demanda por microlentes crescerá, surgindo à necessidade de produções maiores com custos menores (BÄUMER, 2005).

Lentes refrativas, difrativas e refletivas podem ser construídas para obter estruturas de elementos ópticos (RIEMER, 2008).

Muitas aplicações requerem o aumento de resolução com o aumento da miniaturização demandando que as lentes ópticas sejam mais sofisticadas, muitas vezes combinando óptica difrativa e refrativa em apenas um elemento, ou seja, o elemento será híbrido (GIL, 2002).

Novos processos e novas aplicações para tecnologias conhecidas tais como moldagem por injeção e termomoldagem a vácuo tem ampliado a capacidade de replicação dos elementos ópticos, e conseqüentemente abrindo novos mercados que não seriam viáveis sem os baixos custos e a durabilidade desses materiais (SOHN; DOW, 1999).

Experimentos são necessários para mostrar a correlação entre os fatores ou variáveis dos processos e os efeitos dos resultados na replicação das características ópticas.

O grande desafio deste trabalho é desenvolver métodos que reproduzam precisamente os componentes ópticos em grandes volumes com custos baixos e alta fidelidade de replicação. A reprodução de componentes ópticos é realizada regularmente na indústria, mas há pouco conhecimento publicado do processo, e devido a isso, o campo de pesquisa cooperativa não adquire vantagem na criação de novos métodos de produção que irão satisfazer os requerimentos de miniaturização óptica, produzindo melhor qualidade com custos menores que os atuais.

Este problema é citado desde 1976 por WEISSMAN (1976) e BLOUGH et al. (1997). Tais autores afirmam que, embora existam vários artigos de processo de replicação, poucos claramente descrevem o processo inteiramente. Isto ocorre em razão das patentes desses processos, que é um meio de subsistência das companhias. Os próprios autores não descreveram o processo explicitamente em seus artigos.

Bäumer (2005) retrata essa falta de publicação das empresas quanto ao processo. Segundo o autor, o processo de fabricação é o núcleo do conhecimento e é o principal meio de subsistência das empresas. Consequentemente há dificuldade de se obter informações dos processos de moldagem por injeção.

A produção convencional de lentes de precisão é um método complicado devido aos processos que envolvem a produção por meio da remoção de material com o uso da retificação a partir de um pedaço de vidro bruto, subsequente lapidação e polimento para obter o componente óptico terminado. Estes processos, ante a simplicidade de sua geometria são aplicáveis na manufatura de vidros esféricos. Entretanto, a retificação e o polimento são métodos inapropriados e antieconômicos para a fabricação de superfícies com formatos livres. Comparando com a fabricação do vidro, a moldagem por prensagem a quente ou moldagem por injeção dos polímeros produzem formatos ópticos complexos, tais como: lentes anesféricas, lentes difrativas (como as lentes de Fresnel) e os arranjos esféricos com entradas circulares ou quadradas, quando os moldes são bem projetados e fabricados.

Embora a moldagem por injeção esteja cada vez mais presente na indústria para muitas aplicações, os requerimentos para a qualidade de imagem não possuem ainda grande demanda, pois apenas a funcionalidade foi a maior preocupação para consumidores e as indústrias manufatureiras quanto à produção de componentes ópticos de precisão nos últimos tempos (HUANG, 2008).

Atualmente, os novos produtos estão demandando melhor qualidade, exigindo novos desafios nas técnicas de replicação dos elementos ópticos.

Melhorar a fidelidade nos processos de replicação ainda é um grande desafio. Mesmo nas melhores injetoras ópticas, os erros de forma continuam sendo grandes (CD's possuem erros de forma em torno de 50 μm) (SOHN; DOW, 1999).

SLOCUM, WILLOUGHBY & WERKMEISTER (2005), mencionam que, embora existam máquinas e técnicas que podem produzir características na escala micrométrica, ainda há muita dificuldade e capacidade de se produzir na escala nanométrica.

Os processos que utilizam os polímeros ainda não são bem aceitos na indústria de fabricação de óptica de precisão, devido às diversas dificuldades que impedem o uso dessas tecnologias. As aberrações ópticas são causadas pelos desvios geométricos, rugosidade superficial e defeitos no substrato advindos dos processos de fabricação dos plásticos e das propriedades mecânicas e físicas desses materiais.

Partindo-se do pressuposto de que qualquer defeito em uma lente pode fazer com que o feixe de luz não forme foco bem definido seu uso se torna impróprio para uma qualidade de imagem. Consequentemente, o desempenho do componente óptico depende diretamente do processo de fabricação que precisa ser cuidadosamente determinado de modo a obter os requisitos ópticos.

Para avançar no campo de pesquisa pública, uma investigação inicial dos processos de replicação deve ser feito e relatado.

A replicação de microlentes apresenta vários desafios que não são abrangidos na escala comercial atual, da produção de tais componentes.

BAUER et al. (1999) dizem que o problema central é a transferência precisa do molde para estruturas micrométricas na produção em massa. Os métodos usando ferramentas, processos, assim como o material devem ser adaptados de forma a preencher os requerimentos necessários de transferência das estruturas precisas em dimensões da ordem de tamanho de uma cadeia polimérica. Também são mencionados que muitos fatores físicos responsáveis pelo comportamento das micropartes ainda não são completamente entendidos.

O fato de que essas micropeças possuem superfícies muito grandes em comparação com o volume faz com que o fenômeno da camada superficial proporcione a maior função no desempenho da peça em relação ao substrato. Então, não é possível esboçar conclusões concretas do comportamento do substrato para as propriedades dessas micropeças. Esta parte seria para o campo de pesquisa básica.

Para avaliar o comportamento mencionado, resultados de simulação numérica realizados no programa Mold Flow[®] 2010 mostraram os diferentes comportamentos entre a

estrutura molecular das cadeias carbônicas no substrato com a estrutura molecular na camada superficial “*skin*” que serão retratados no capítulo de resultados e discussão.

Com o objetivo de se utilizar melhor os polímeros ópticos, o completo entendimento é necessário para processos de replicação de grandes volumes. O entendimento deve incluir a capacidade do processo considerando o tamanho e o formato das microcaracterísticas que serão reproduzidas e os efeitos das variáveis que influenciam no processo de replicação indicando quais variáveis possuem fatores que são fundamentais. Compreender melhor quais são as características que podem ser reproduzidas de forma exata irá levar rapidamente às novas aplicações de práticas de projetos, diante da viabilidade de produzir lentes ópticas precisas com baixo preço e baixo peso que serão usadas nas aplicações difrativas, refrativas e combinadas.

Objetivos

Esta tese tem por objetivo desenvolver projetos, simular e criar métodos e processos de fabricação determinísticos e não determinísticos, selecionando os diversos materiais existentes para ferramentas, moldes e lentes, e os devidos equipamentos de metrologia, no intuito de investigar as técnicas de manufatura de maior relevância na fabricação em massa de microelementos ópticos difrativos usando o processo de replicação da moldagem por injeção e da moldagem por prensagem a quente (ou termomoldagem) para a comparação dos estudos quanto à caracterização da geometria, fidelidade e qualidade óptica.

Estrutura da Tese

Ao todo, sete tipos de microelementos ópticos difrativos foram produzidos nesta tese sendo estes: lente de Fresnel plano-convexa com altura constante, lente de Fresnel plano-convexa com altura variável, lente de Fresnel plano-côncava com altura variável, duas dimensões de arranjos esféricos com entrada circular e duas dimensões de arranjos esféricos com entrada quadrada.

Sua estrutura é demonstrada em capítulos, incluindo este introdutório, onde é abordada uma visão geral de micro e macro elementos óptico difrativos, suas aplicações e importância na atualidade.

O segundo capítulo mostra o estudo aprofundado do estado da arte dos microelementos óptico difrativos construídos nesta tese e suas principais aplicações.

O capítulo 3 se refere aos materiais e processos determinísticos usados na fabricação dos microelementos ópticos difrativos poliméricos. Foram selecionados e estudados cinco tipos diferentes de processos de fabricação dos moldes, sendo que para os arranjos esféricos foram: as técnicas de microforjamento, microfresamento com fresa de ponta esférica e combinação de ambos os processos, já para a construção dos moldes de Fresnel foi necessário o completo estudo e entendimento da técnica de torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante e para os insertos planos de aço inoxidável foi usado a técnica de polimento com pasta de diamante.

Nos processos de replicação dos microelementos ópticos difrativos foram analisados dois métodos: Prensagem a quente também conhecida por termomoldagem e moldagem por injeção, sendo que no último caso foi usado como ferramenta de apoio, o software de simulação de injeção de elementos finitos CAE Molde Flow[®] da Autodesk.

São relacionados também, os efeitos dos parâmetros das técnicas de replicação, tais como: a temperatura de injeção da fusão cristalina, temperatura do molde, pressão de injeção, pressão de recalque, velocidade de injeção, retração e empenamento, rugosidade superficial do molde e geometria das micropeças correlacionando com a influência das propriedades físicas dos materiais poliméricos ópticos, tais como: temperatura de transição vítrea, viscosidade e reologia, peso molecular e grau de polimerização, cristalinidade, calor específico, coeficiente de transferência de calor e módulo de elasticidade. O entendimento dessas características serve para compreender melhor o comportamento do plástico durante o preenchimento das microcavidades do molde.

O capítulo 4 retrata os métodos de verificação metrológicos necessários para caracterizar a qualidade dos μ EODs nas escalas macro, micro e nano, dando enfoque para medidas geométricas e integridade superficial expondo os tipos de aparelhos e ensaios necessários para realizar a caracterização, e para os ensaios paraxiais é mostrado os tipos de avaliações usadas para obter a qualidade da lente sendo destacado a função de transferência de modulação (FTM, em inglês MTF), ensaios de transmitância e distância focal .

O capítulo 5 apresenta a metodologia experimental expondo as montagens executadas para os ensaios, os procedimentos experimentais de calibragem para cada processo e os materiais selecionados de ferramentas, para a fabricação dos moldes e das réplicas que serão usados na investigação do processo.

O capítulo 6 descreve os resultados e discussões obtidas nos ensaios experimentais, analisando a fidelidade de replicação no escoamento das microcavidades, comparando com os resultados obtidos por meio das simulações numéricas para verificar a sensibilidade e exatidão deste método. As simulações são importantes devido à complexidade da construção do molde que impossibilita ajustes rápidos em falhas decorrentes de erros no projeto. Outros principais parâmetros também foram avaliados neste capítulo por meio de análise qualitativa da Microscopia Eletrônica de Varredura MEV e por meio das análises quantitativas obtidas no perfilômetro óptico para investigar as dimensões geométricas, rugosidade superficial e fidelidade de replicação. Avaliações paraxiais da lente foram feitas para analisar a transmitância do material usado, medida da função de transferência de modulação (FTM), cálculo da modulação de fase e distância focal.

O capítulo 7 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

No final são apresentadas as referências bibliográficas.

Capítulo 2 – Elementos Ópticos Difrativos (EOD)

Bäumer (2005) define sistemas opto mecânicos como sendo “a ciência, engenharia, e a arte de manter apropriadamente as formas e posições de elementos funcionais de um sistema óptico de forma que o desempenho e os requerimentos mínimos sejam satisfeitos”.

2.1 – Arranjos de Microlentes Esféricas

Os arranjos de microlentes esféricas podem ser usados com o propósito de direcionar feixes colimando-os ou focando-os (ex. em combinação com arranjos de diodo a laser, detectores ou fibras), para iluminação (ex. sistemas de displays, sistemas de projeção, sinaleiros, carros, LEDs), sensores (lousas interativas, segurança) e para propósitos de formação de imagem (ex. fotocopiadoras).

Existem instrumentos que requerem o arranjo de milhares de microlentes com alto índice de abertura numérica (AN).

De acordo com Smith (2000), a abertura numérica é definida pela equação 2.1:

$$AN = n \cdot \sin\theta \quad (2.1)$$

Onde n é o índice de refração e θ é a metade do ângulo da iluminação cônica.

Sendo que:

$$f\# = \frac{1}{2AN} \text{ ou } AN = \frac{d}{2f} \quad (2.2)$$

onde $f\#$ é o f number ou razão focal, d é o diâmetro de abertura da lente e f é o foco da lente.

Para o cálculo da distância focal nas lentes esféricas, segundo os fabricantes mundiais de lentes, tem-se a equação 2.3:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.3)$$

Para lentes planas esféricas o R tende ao infinito, portanto, rearranjando a equação 2.3 para obter o foco resultar-se-á na eq. 2.4:

$$f = \frac{R}{(n-1)} \quad (2.4)$$

O montante de luz que atinge uma imagem no espaço de um sistema óptico não depende apenas da claridade do objeto, mas também das dimensões dos elementos ópticos. O diafragma é uma abertura normalmente circular, com tela opaca. As partes opacas da tela evitam que alguns raios com aberrações cheguem até a imagem (BORN, WOLF, 1999).

Uma abertura grande do diafragma irá intersectar um cone grande de raios luminosos. Se negligenciarmos as perdas luminosas (reflexão, absorção, etc) a energia de entrada irá se espalhar transversalmente na região correspondente da imagem. Então, a energia por unidade de área e por unidade de tempo, i. e., a densidade do fluxo ou irradiação, será inversamente proporcional à área da imagem (HECHT, 1974).

Na óptica, o *f-number* de um sistema óptico expressa o diâmetro da entrada da luz ou do diafragma em termos do comprimento efetivo focal das lentes (BORN, WOLF, 1999; HECHT, 1974).

O f- number $f\#$ frequentemente com a notação de N é dado por:

$$f/\# = N = \frac{f}{D} \quad (2.5)$$

Onde f é a distância focal da lente e D o diâmetro de entrada da luz. Por convenção $f\#$ é considerado como um simples símbolo, e os valores específicos $f\#$ são descritos trocando o sinal do símbolo por valores específicos. Por exemplo, se uma distância focal é 2 vezes maior

que o diâmetro de entrada (por exemplo: uma lente com 25mm de abertura e 50 mm de distância focal), o f-number será $f/2$ ou $N=2$. Variando-se o f-number varia-se a quantidade de luz que entra por meio das lentes. Quanto maior o f/# menor será a luz por unidade de área que irá atingir o plano da imagem e consequentemente a imagem será pouco exposta, resultando em uma imagem com interferência e poucos detalhes de sombreado. De forma contrária, se o f/# for pequeno a imagem será muito exposta resultando em excesso de clareamento da imagem e foco em apenas um objeto da imagem (HECHT, 1974).

Outro fator importante na construção de arranjos de microlentes é o índice de empacotamento (ϕ), que é a soma das áreas das lentes dividida pela área total do arranjo da lente. Alguns arranjos podem possuir empacotamento quadrado ($\phi = \pi/4=78,5\%$), hexagonal ($\phi = 91\%$) ou arranjos completos ($\phi = 100\%$). Na FIGURA 2. 1 (a) temos o exemplo de uma peça com arranjo de empacotamento quadrado produzida por meio da técnica de ataque iônico reativo. A FIGURA 2. 1 (b) mostra o arranjo de empacotamento hexagonal ($\phi = 91\%$) produzido pelo método de ataque iônico reativo em fotoreste. Já na FIGURA 2. 1 (c) tem-se o arranjo de empacotamento completo ($\phi = 100\%$) produzido pelo método de feixe de raio laser.

FIGURA 2. 1 – (a) Arranjo de empacotamento quadrado ($\phi = 78,5\%$) produzido pelo método de ataque iônico reativo em fotoreste. (b) Arranjo de empacotamento hexagonal ($\phi = 91\%$) produzido pelo método de ataque iônico reativo em fotoreste. (c) Arranjo de empacotamento completo ($\phi = 100\%$) produzido pelo método de feixe de raio laser (OTTEVAERE et. al. 2006).

Estes métodos possuem custos muito elevados (nível científico), ou seja, várias etapas são necessárias para concluir a fabricação, e limitações quanto às dimensões que serão produzidas, ou seja, para se produzir lentes com alta qualidade, apenas uma pequena faixa dimensional com geometria apenas esférica pode ser manufaturada por tais técnicas (OTTEVAERE et. al. 2006).

Ottevaere et. al. (2006) apontam alguns fatores negativos quanto ao uso dos fotorezistas. Um problema indicado seria a limitação quanto à aplicação desse tipo de material, pois a falta de estabilidade térmica, mecânica e sua capacidade de absorção de água são problemas que impedem seu uso de forma extensiva.

Ottevaere et. al. (2006) concluíram que, embora existam várias técnicas disponíveis na atualidade para se fabricar microlentes, apenas alguns métodos podem ser usados em alta qualidade de imagem, o que ainda não é a regra, como é o caso da impressão com microjato (similar às impressoras jato de tinta). Outras técnicas, tais como ataque reativo iônico e gravação a laser são apropriados para a fabricação de microlentes usadas para aplicações de coleta de luz. Analisando qualitativamente o acabamento superficial produzido pelo método de gravação a laser na FIGURA 2. 1 (c) pode-se dizer que a qualidade obtida é baixa e sua geometria não é bem definida. O número focal para este arranjo é de $f\# = 4,7$, cujo valor é parecido com os arranjos desenvolvidos nesta tese.

Já as técnicas de litografia profunda com prótons e corte a laser requerem melhorias, ou seja, a calibração do processo ou algum tipo de acabamento após o procedimento antes de serem usadas em produtos comerciais.

2.1.1 – Exemplos de aplicações

Para se ter uma ideia de aplicações industriais contemporâneas dos arranjos esféricos, os displays de LCD para celulares e TV abrangem os exemplos mais comuns. A FIGURA 2. 2 (a) mostra a microestrutura de um suporte usado como base para o display de LCD em celulares comerciais com tela monocromática. A técnica de produção não é conhecida. Percebe-se que a superfície é composta por seções de microlentes esféricas, igualmente espaçadas (1 diâmetro de espaço entre elas), e o fator de empacotamento medido para este arranjo foi baixo ($\phi = \pi/16 \cong 20\%$). Outro aspecto importante é o acabamento final desta peça na parte esférica, pois na FIGURA 2. 2 (b) ressalta-se o aparecimento de muitos defeitos e descontinuidades oriundos do seu processo de fabricação embora não seja conhecido.

(a) 140 x

(b) 1300 x

FIGURA 2. 2 – Arranjos de microlentes retirados da tela de um celular comercial.

Para quantizar a qualidade da superfície do arranjo da tela do celular usou-se o perfilômetro óptico sem contato. Na FIGURA 2. 3 temos a análise das lentes deste celular expondo a imagem tridimensional do conjunto na imagem (a) e o seu perfil na figura (b).

(a)

(b)

FIGURA 2. 3 – Lentes da tela de um celular comercial (a) Imagem 3D e (b) perfil das lentes.

Foi constatado que a rugosidade do topo da lente com a aplicação do filtro de esfericidade e planicidade ficou muito alto, com valores de $R_a = 1,42 \mu\text{m}$, $R_q = 1,68 \mu\text{m}$ e $R_t = 7,06 \mu\text{m}$ (FIGURA 2. 4).

FIGURA 2. 4 – Perfil da lente comercial com filtro de esfericidade mostrando a rugosidade.

Na natureza, têm-se também exemplos de aplicação de arranjos de microlentes esféricas usadas desde os tempos primitivos. A FIGURA 2. 5 revela a imagem obtida no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do olho de uma formiga ampliado 1500 vezes, mostrando na ocasião, a aplicação do empacotamento completo, disposto em torno de uma geometria com formato semiesférico ($\phi = 100\%$). O diâmetro de abertura de cada microlente é em torno de 20 μm .

FIGURA 2. 5 - Olho de uma formiga mostrando o arranjo de lentes com empacotamento completo (imagem fornecida por Dr. Márcio de Paula).

Nesta tese, será proposto um método de fabricação mecânica para a manufatura de microlentes para diversos tipos de empacotamento, com custos mais baixos que os demonstrados no tópico atual, alta reprodutibilidade, alta repetibilidade e grande desempenho (livre de aberrações), que será visto no capítulo 3.

2.2 – Lentes de Fresnel

Há muitos séculos, foi concebido que o contorno da superfície de refração de uma lente convencional definia sua propriedade focal, e o substrato do material entre as superfícies de refração não possuíam nenhum efeito (somente para a perda por absorção da luz) nas propriedades ópticas da lente.

Para gerar a lente de Fresnel, o substrato do material é reduzido por meio da extração de cilindros anelares coaxiais (lente com foco positivo geralmente chamado plano convexa). Cada superfície óptica gerada é chamada de ranhuras ou sulcos “*grooves*” ou zonas de Fresnel. A inclinação superficial de cada sulco é a porção correspondente à superfície original esférica ou anesférica, trasladada em direção a um plano da lente (FRESNEL TECHNOLOGIES, 2003).

Próximos ao centro, os sulcos possuem aspecto aproximadamente plano à superfície, enquanto mais longe do centro, estas ranhuras possuirão aspectos extremamente inclinados, especialmente para lentes com baixo $f/\#$ (Fresnel Technologies, 2003).

Este tipo de lente preserva as características ópticas de uma lente plano-côncava e plano-convexa, porém sua espessura será muito menor, e conseqüentemente, a absorção da luz diminuirá (YAN et al., 2005).

Se as zonas de Fresnel forem muito estreitas, a superfície de cada anel poderá ser aproximada a um cone (com a secção transversal reta) e não esférica (arcos na secção transversal) para facilitar a produção.

Entretanto, para sistemas ópticos precisos, as lentes de Fresnel deverão possuir nas zonas de Fresnel secção transversal com formato de arco (YAN et al., 2005).

YAN et al. (2005), em seus estudos produziram lentes de Fresnel em material semicondutor com formato esférico, conforme FIGURA 2. 6.

FIGURA 2. 6 – Desenho esquemático de Fresnel esférico (YAN et al., 2005).

Entretanto, lentes com superfícies esféricas produzem lentes com aberração esférica longitudinal, que ocorre quando diferentes seções anelares do componente óptico fazem que a luz foque em diferentes posições ao longo do eixo óptico.

A FIGURA 2. 7 mostra a aberração esférica. A luz que passa por meio do raio 1 foca no ponto “a” enquanto a luz que passa no raio 2 e 3 foca nos pontos “b” e “c” respectivamente formando a imagem no plano paraxial ao invés de formá-la em apenas um ponto. Esta aberração é própria de todas as lentes esféricas e é a razão do uso de lentes hiperbólicas ou anesféricas. Se não for prático usar lentes hiperbólicas, é possível usar apenas o centro da seção para lentes que possuem raio relativamente grande. Quando isto for feito, a diferença da espessura da lente e o ângulo de incidência do raio de entrada não variará significativamente através da lente, então a aberração será reduzida (SMITH, 2000).

FIGURA 2. 7 - Aberração Esférica (Smith, 2000).

Para evitar que este fenômeno aconteça, todas as lentes de Fresnel produzidas nesta tese possuem superfícies com formato anesférico. Na FIGURA 2. 8 tem-se a comparação entre o perfil esférico (parte externa) com o perfil anesférico (parte interna degradê).

FIGURA 2. 8 – Comparação do perfil esférico com o perfil anesférico.

O uso da tecnologia de torneamento com ferramenta de diamante permite com facilidade fabricar superfícies parabólicas ou anesféricas, o que corrigirá as aberrações esféricas tornando essas lentes superiores a lentes convexas tradicionais, caracterizando-as como “livres de aberração esférica”. Além disso, o uso deste tipo de técnica permite construir zonas de Fresnel estreitas com formato esférico ou anesférico não sendo necessário nenhum tipo de aproximação cônica conforme citado anteriormente.

A combinação de uma superfície anesférica (na qual é eliminada a aberração longitudinal) com uma lente fina (que reduz substancialmente a absorção da luz no material) permite que sua fabricação tenha grande abertura. De fato, grande parte das lentes de Fresnel possuem aberturas largas (baixo valor de $f/\#$) (Fresnel Technologies, 2003).

2.2.1 – Exemplos de aplicações

Podem ser mencionados como exemplos de aplicação da lente de Fresnel:

- **Iluminação:** de veículos automotivos conforme mostrado na FIGURA 2. 9. Uma lente de lanterna traseira típica de um carro que contém prismas de 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 ferramenta de diamante em um molde (BRINKSMEIER e PREUSS, 1997).

FIGURA 2. 9 - Lentes plásticas moldadas por injeção, com zonas Fresnel, para lanternas de carros (BRINKSMEIER e PREUSS, 1997).

- **Lente Colimadora:** produz feixe de luz colimado a partir de um ponto de origem. Pode ser dito que é uma aplicação perfeita para lente de Fresnel. Neste caso a distribuição espacial de luz a partir de uma origem tende a favorecer o centro da lente, para que a transmitância da lente seja próxima a 90%. Os melhores resultados ópticos são obtidos quando os lados dos sulcos da lente estão externos.
- **Lente Coletora:** Focar um feixe de luz colimado em um ponto é outro exemplo de uso popular da lente de Fresnel. Novamente, os lados das ranhuras devem ser virados para o lado infinito do conjugado para que se obtenha a melhor configuração óptica.
- **Lente condensadora:** esta aplicação usualmente demanda uma lente projetada para um conjugado no infinito. É usada para focar a fonte de luz de dentro da

projeção das lentes. Típicos exemplos incluem condensadores de projetores de lentes, microscópio eletrônico de varredura, projetores de slide, etc. O projetista óptico chama as lentes condensadoras de lentes que são impraticavelmente rápidas, ou seja, o diâmetro é duas vezes maior que sua distância focal ($<f/0,5$) (FRESNEL TECHNOLOGIES, 2003).

- **Lente de aumento:** lentes anesféricas são ideais para aumentar diversos pontos de luz. Quando usadas conjugadas, não ocorre distorção da imagem (uma grade retangular permanece retangular após o aumento). Se as lentes forem grandes o suficiente para que o objeto seja visto com ambos os olhos, a visão é estereoscópica. Lentes de aumento são usadas para formar uma imagem maior do que o tamanho real do objeto na retina do olho.
- **Imagem:** geralmente esta lente não é recomendada para formação de imagem na região visível do espectro, mas existem algumas exceções importantes: telêmetro a laser, e imagem para grandes detectores sensores piroelétricos ou pilha térmica.
- **Aplicações infravermelho:** a radiação infravermelha emitida por seres humanos e outros animais de sangue quente tem se tornado a maior aplicação na área das lentes de Fresnel, também usadas em segurança ou sensores de iluminação. Esta aplicação requer que as lentes transparentes transmitam comprimentos de onda da ordem de 8 μm a 14 μm que é a região de maior contraste entre os animais de corpo quente.
- **Coletora de energia solar:** as lentes de Fresnel são frequentemente usadas como concentradoras para pilhas fotovoltaicas ou arranjos de células para dispositivos de energia solar.

2.2.2 – Análise de ondas ópticas – Modulação de fase em lentes delgadas

Uma lente é composta de material denso, usualmente vidro com índice de refração de aproximadamente 1,5, em que a propagação da velocidade de um distúrbio óptico é menor que a velocidade do ar. Uma lente é dita fina se o raio que entra nas coordenadas (x,y) em uma face existe aproximadamente na mesma coordenada da face oposta, ex., se ocorre uma translação negligente de um raio na lente. Portanto, uma lente delgada simplesmente atrasa a

frente de onda de um montante, proporcional a sua espessura em cada ponto (GOODMAN, 1996).

Portanto, para os cálculos desenvolvidos para obter a função da modulação de fase da luz de cada lente produzida no domínio paraxial deste trabalho, foi usada a relação 2.6, que obedece a equação retirada do livro de Goodman, (1996):

$$t_l(x, y) = \exp \left[\frac{-jk(x^2 + y^2)}{2f} \right] \quad (2.6)$$

Onde t é a função da espessura da lente delgada, f é o foco da lente, $-j$ é a unidade imaginária sendo igual à raiz quadrada de -1 , k é uma constante definida por $2\pi/\lambda$, sendo λ o comprimento de onda da luz, x e y a variação do raio no plano cartesiano da lente.

Esta equação servirá como a representação básica dos efeitos para lentes finas em um distúrbio incidente. Ela negligencia a extensão finita das lentes (GOODMAN, 1996).

Portanto, nesta tese, para efeitos de estudo serão construídos três perfis diferentes de Fresnel: Fresnel plano-convexa com altura variável, Fresnel plano-côncava com altura variável e Fresnel plano-convexa com altura constante.

Para esta avaliação foi gerado o código computacional denominado LF2010, que permite dimensionar geometricamente lentes convencionais anesféricas, lentes de Fresnel anesféricas com altura variável e constante, calculando seu foco, diâmetro de abertura e o cálculo da modulação de fase para cada lente.

Capítulo 3 - Materiais e Processos de Fabricação dos μ EODs

Para produção de μ EODs, como regra geral, pode-se dizer que o tipo de aplicação determinará o material das lentes, assim como a técnica de fabricação a ser usada. A escolha do método depende dos requerimentos da aplicação em relação a diversos fatores tais como: a quantidade de produção, exatidão de forma óptica e estabilidade em meio ambiente. Nesta revisão será avaliado cada processo de replicação e demonstradas suas capacidades e deficiências.

Riemer (2008), considera primordial o desenvolvimento de processos determinísticos na fabricação de microelementos ópticos.

O primeiro passo para determinar o projeto e a fabricação de cada μ EOD é a escolha do material da lente: vidro, plástico ou material semicondutor. Dependendo da aplicação, as lentes deverão atender as necessidades mecânicas, ópticas, químicas e térmicas combinadas em apenas um elemento.

Tradicionalmente, o vidro é o material mais usado na confecção de elementos ópticos de precisão (SILVA, 2002).

Durante muitos anos o vidro tem sido o material preferido nas aplicações ópticas. O vidro possui resistência à abrasão, baixo coeficiente de expansão térmica e exibe uma boa uniformidade de suas propriedades. Entretanto, o vidro é quebrável, denso e difícil de ser produzido em grandes quantidades, sobretudo fabricar lentes com arestas de características pronunciadas na zona óptica (por exemplo, elementos ópticos difrativos (EOD)). Os métodos mais comuns de produção de vidros ópticos são: retificação, litografia/ataque químico e injeção de vidros em moldes (GIL, 2002).

O método que prevalece na manufatura óptica de vidros é a retificação, no qual podem ser produzidas partes esféricas e anesféricas. Entretanto, é difícil de produzir arestas com características pronunciadas por este método, que são frequentemente exigidas nos μ EODs. Isto ocorre porque o máximo diâmetro do rebolo deve ser muito menor que o diâmetro final do elemento óptico. Quando o elemento óptico é pequeno o rebolo deve ser tão pequeno, que para um avanço viável, a produção de lentes se torna inexecutável (GIL, 2002).

Quando a técnica de fabricação por microlitografia é usada em vidros, um degrau pode ser aproximado para um perfil com relevo superficial linear ou polinomial. O empecilho para atingir alta eficiência nas redes de difração com esta técnica é que diversas máscaras devem ser alinhadas de forma precisa durante as várias etapas do processo de fabricação (BLOUGH, et al.1997).

Alguns vidros ópticos são injetados em moldes, entretanto, este procedimento requer uso de moldes de carbetto de silício para proporcionar a resistência ao desgaste necessário, porém, este processo não é capaz de preencher arestas extremamente pequenas e afiadas na cavidade dos moldes devido à característica da viscosidade do vidro (GIL, 2002).

Todavia, todos esses métodos de produção de vidro requerem um estágio final de polimento. Então, enquanto os métodos de manufatura do vidro estão bem desenvolvidos e entendidos, esses possuem uma série de limitações na produção em escala de microlentes ópticas. Portanto, devido aos problemas apresentados, o uso deste material foi abolido.

Em função disso, a substituição do plástico por vidro já vem sendo feita há muito tempo. Os materiais plásticos são perfeitamente capazes de aceitar polimento e contornos precisos dos moldes de injeção (MILLER; McLEOD; SHERWOOD, 1951).

Enquanto o projetista de vidros ópticos possui uma variedade grande nos materiais usados para lentes com formato esférico, o projetista na moldagem por injeção possui poucos materiais, porém grandes possibilidades de construir diversas formas. Por tal motivo o uso de lentes anesféricas nesses materiais é maior, inclusive pode-se combinar e implementar dispositivos de montagem e fixação mecânica reduzindo o número de peças de um sistema optomecânico, tais como anéis, espaçadores e flanges ou implementar dispositivos elétricos, portanto, podendo-se criar equipamentos monolíticos (BÄUMER, 2005).

Os plásticos criaram novo conceito no projeto dos produtos, viabilizando a produção de formas complexas e em escalas microscópicas, o qual, não seria possível ser feito com o vidro. Por exemplo, dispositivos ópticos, tais como, placas que guiam a luz ou lentes em forma de folhas para as telas de LCD possuem características em microescala da placa

moldada delgada para controlar a luz visível ou o laser de acordo com o projeto (MURAKAMI; KOTAKI; HAMADA, 2008).

Outro potencial fator determinante na escolha do material polimérico seria o custo e peso baixo (a densidade do vidro é de duas a cinco vezes maiores que a do plástico). Neste caso, os polímeros seriam a melhor escolha em relação aos materiais vítreos.

SILVA (2002) e Bäumer (2005) descrevem algumas vantagens que os plásticos ópticos proporcionam:

- **Baixo custo relativo de manufatura e alta produtividade:** o processo de moldagem por injeção é ideal para a produção em larga escala de peças. Usando moldes com múltiplas cavidades pode-se combinar os custos de fabricação e vida útil do molde a uma produção que torne o processo muito atraente do ponto de vista econômico, principalmente quando se compara aos custos de fabricação de lentes de vidro polido;
- **Montagem compacta dos sistemas ópticos (peças monolíticas):** o processo de injeção permite agregar em uma única peça furos, fendas, flanges, elementos de posicionamento e centralização que permitem a montagem de sistemas ópticos extremamente compactos e integrados inclusive com sistemas elétricos impressos numa mesma peça;
- **Diversas possibilidades de projetos de forma:** como exemplo pode-se citar a confecção de lentes anesféricas. Praticamente todo equipamento de desbaste e polimento de lentes em vidro emprega mecanismos que utilizam movimentos mecânicos para contorno de superfícies esféricas. O complexo processo para produção de uma superfície anesférica em uma cavidade do inserto para moldagem é necessário somente uma vez, para que milhares de lentes plásticas sejam produzidas;
- **Repetibilidade:** o processo de injeção apresenta alta repetibilidade permitindo baixas tolerâncias dimensionais;
- **Alta resistência ao estilhaçamento (shatter resistance):** devido ao comportamento elástico dos materiais plásticos;
- **Redução de Peso:** os vidros ópticos têm massa de 2,3 a 4,9 vezes maior que a dos plásticos. Para grandes elementos ópticos esta característica se torna muito relevante;

- **Transmissão da luz:** a transmitância do acrílico é maior que a maioria dos vidros ópticos ao longo do espectro visível. A transmitância dos plásticos ópticos é melhor que a maioria dos vidros no ultravioleta e nos comprimentos de onda próximos ao infravermelho. O final do espectro ultravioleta é normalmente restringido pela introdução de aditivos usados para proteger os materiais que são sensíveis a tal radiação.

O segundo passo é a escolha do processo de fabricação dos moldes que estão intrinsecamente ligados ao tipo de EODs a ser fabricada para a sua aplicação específica. Por exemplo, a produção dos moldes de lentes de Fresnel anesféricas possui técnica muito diferente de produção em relação aos moldes para arranjos de microlentes esféricas.

No processo de produção o molde é tão importante quanto à máquina de injeção. Os principais fatores que afetam o preço da moldagem por injeção são:

- Escolha do material do molde e dos insertos ópticos;
- Métodos (técnica) de fabricações dos insertos;
- Número de cavidades, volume de produção esperada e vida útil do produto;
- Tamanho da peça, complexidade, textura, acabamento superficial e exatidão necessária.

Por último, na escolha do processo de replicação, ou seja, para reproduzir réplicas com maior fidelidade possível em determinados arranjos geométricos, algumas técnicas são únicas, unindo a técnica de integração monolítica com vários componentes micro-ópticos e sistemas de alinhamento facilitando a prática da montagem.

3.1 - Seleção do Material Polimérico óptico para replicação dos μ EODs

Os materiais ópticos são substâncias sólidas transparentes ou que de outro modo são úteis na transformação, modificação ou redirecionamento da luz ultravioleta (UV), visível (VIS), ou infravermelha (IV) (KAROW, 1993).

Normalmente, microequipamentos ópticos são feitos com peças que tem massa de aproximadamente 0,001 – 1 grama. Portanto, atingir encomendas de algumas toneladas se torna muito difícil, o que seria necessário para algumas companhias químicas se interessarem em micromoldagem. Como consequência, o desenvolvimento de materiais que tem o propósito de aperfeiçoar os materiais para micromoldagem são raramente encontrados.

Os materiais poliméricos comercialmente disponíveis são relacionados com respeito à estabilidade dimensional, preenchimento e comportamento na desmoldagem (BAUER, 1999).

Muitos polímeros ópticos foram considerados para este experimento, incluindo o poliestireno (PS), o policarbonato (PC) e o polimetacrilato de metila (PMMA). Todos são muito usados na indústria óptica com destaque ao PMMA e o PC com maiores aplicações.

As principais propriedades ópticas dos materiais poliméricos são: transparência, índice de refração e dispersão (número de Abbe), birrefringência e fotoelasticidade.

O poli (metacrilato de metila) apresenta propriedades marcantes, tais como: semelhança com o vidro, alta resistência química, resistência ao impacto e resistência aos raios ultravioletas (MANO, 1991).

A seguir serão evidenciadas outras vantagens que o poli metacrilato de metila apresenta em relação aos outros polímeros ópticos quando o objetivo é a fabricação dos μ EODs:

- **Aplicação industrial:** o acrílico é o plástico óptico mais importante e o mais usado (80% das aplicações ópticas para lentes). Seu uso é evitado apenas quando os componentes são sujeitos a altas temperaturas de trabalho, aplicações que exigem resistência a solventes ou altos índices de refração (SILVA, 2002).
- **Calor específico:** o PMMA possui $c_p=1,5\text{kJ/kgK}$ e o PS possui $c_p=1,2\text{kJ/kgK}$, portanto, o acrílico permanecerá aquecido e preencherá melhor o molde durante a injeção das microcavidades (CRAWFORD, 1987);

- **Índice de retração:** seu baixo nível de retração que é de 0,2-0,6 %, para grandes faixas de temperaturas e pressão, enquanto o PS é de 0,4-0,7%. Este baixo nível de retração causa baixas tensões residuais fazendo com que não ocorra a birrefringência;
- **Transmitância:** baixo índice de refração e devido à baixíssima cristalinidade o PMMA se torna incolor e transparente possuindo o melhor índice de transmitância óptica entre os polímeros ópticos (GIL, 2002);
- **Termoplástico:** pode ser diversas vezes aquecido, moldado e resfriado.

Geralmente o PMMA é usado para melhores qualidades ópticas e o PC quando há necessidade do componente possuir resistência à fratura. Devido às razões descritas, para obter os melhores resultados, no trabalho, optou-se pelo uso do polimetacrilato de metila (PMMA).

A TABELA 2. 1 descreve as principais propriedades do Poli metacrilato de metila.

TABELA 2. 1 - Características do Poli (metacrilato de metila) (Crawford, 1987; Mano, 1991; Mark, 2007; Bäumer 2005).

Propriedades e unidades	Unidades	Nível descritivo
Químicas		
Monômeros		<p>metacrilato de metila</p>
Polímero
Peso molecular		500.000 – 1.000.000
Mecânicas		
Densidade	(g/cm ³)	1,2
Absorção de água	(%)	0,234
Retração linear no molde	(%)	0,2 – 0,6
Escoamento do material fundido	(g/10min)	17
Dureza	Rockwell M	94
Módulo de elasticidade (GPa)	(GPa)	1,8-2,8
Limite de ruptura (MPa)	(MPa)	59
Módulo de Flexão (GPa)	(GPa)	3,0
Tensão de escoamento na Flexão	(MPa)	83
Impacto IZOD	(J/cm)	0,442
Térmicas		
Temperatura de fusão (Tm)	(°C)	137
Temperatura de transição vítrea (Tg)	(°C)	108
Coeficiente de expansão térmica	(μm/m°C)	54,0-90,0
Temperatura de deflexão a 0,46 MPa	(°C)	96,6
Calor específico	(J/g°C)	1,4-1,5
Temp. de Amolecimento Vicat (°C)	(°C)	97
Máxima temperatura de trabalho	(°C)	89,4
Condutividade térmica	(W/mK)	0,199
Ópticas		
Índice de refração		1,49
Número de Abbe		58,5
Nebulosidade (<i>haze</i>)	(%)	1
Transmitância	(%)	>92

As aplicações típicas do PMMA são: lanternas de carros, lentes de retroprojetores, letreiros comerciais, luminárias, fibras ópticas, etc.

O acrílico selecionado neste trabalho para os ensaios experimentais e de simulação foi o PMMA – DH ECL P.

3.2 - Métodos atuais de manufatura dos insertos usados na fabricação dos microelementos ópticos

O fluxograma da FIGURA 3. 1 mostra genericamente, quais etapas que devem ser obedecidas para fabricar uma microlente. É mostrada a sequência lógica dos diversos estágios fundamentais que devem ser considerados começando pela física da fabricação das microlentes até o aperfeiçoamento do processo de manufatura dos μ EODs.

FIGURA 3. 1 – Fluxograma da Fabricação de Microlentes (OTTEVAERE et. al. , 2006)

Uma vez que todo o conceito físico foi entendido e materializado, a fabricação das μ EODs pode ser iniciada. Para as primeiras microlentes é necessária a caracterização do processo para que a investigação seja compreendida.

Foi observado durante a revisão da literatura que poucos autores fabricantes de microlentes se preocuparam em realizar uma completa caracterização óptica dos μ EODs. Normalmente é comum que os autores parem neste estágio de fabricação em razão da falta de instrumentos dedicados para realizar essas análises.

A fabricação de microlentes para uma ampla gama de diferentes parâmetros de processos de manufatura nos permite investigar o espaço multidimensional das características das microlentes que pode ser obtido com aquela técnica específica.

Os controles dos parâmetros precisos dos processos experimentais permitem o ajuste da calibração, que é necessária para o estudo da repetibilidade da produção de microlentes (OTTEVAERE et. al., 2006). Esta etapa foi extremamente importante na construção dos arranjos esféricos expostos no capítulo 2. A deformação elástica do sistema peça/centro de usinagem CNC dificultou o dimensionamento preciso dos μ EODs.

Após a análise da reprodutibilidade, o processo pode ser ajustado para os melhores parâmetros. O próximo passo é repetir os mesmos parâmetros calibrados. Quando o resultado das microlentes produzidas corroborar com as especificações predefinidas, a reprodutibilidade do processo de fabricação das microlentes para aquela faixa de parâmetro fica estabelecida (OTTEVAERE et. al., 2006). Este passo foi fundamental nos processos de replicação de injeção para a comparação dos estudos das diversas geometrias de μ EODs produzidas.

Em alguns casos as especificações necessárias para alta fidelidade podem não ser obtidas. Por exemplo, no caso de replicação por injeção, cantos vivos podem se tornar um grande desafio para que sua cavidade seja totalmente preenchida. Portanto, acertar os parâmetros das condições de fabricação é um trabalho muito árduo.

Os polímeros ópticos prometem uma solução para a necessidade de um custo menor, mas o processo de replicação e os métodos de produção devem ser investigados para desenvolver melhores entendimentos das capacidades e limitações de replicações em grandes volumes (GIL, 2002).

Todavia, atender a lógica descrita no fluxograma da FIGURA 3. 1 tornará mais fácil o desenvolvimento de técnicas para manufaturar μ EODs de forma precisa.

3.2.1 – Considerações quanto à produção de μ EODs

Os fatores de maior influência para se produzir μ EODs pelo processo de replicação são: tamanho, razão de aspecto e área superficial.

Dentre os 3 fatores citados acima, a característica mais importante para um processo de microfabricação é a razão de aspecto máxima que se consegue obter, o que determinará as restrições para a combinação do material/processo.

Outro fator de impacto é a aplicação de microferramentas que deverão garantir a qualidade e a topografia da superfície gerada no molde, que repercutirão na capacidade de replicação das micropeças.

A fotolitografia e o torneamento com ferramentas de diamante são os dois maiores métodos de usinagem usados na fabricação de microestruturas de Fresnel. A tecnologia de litografia é geralmente usada para se produzir microestruturas em superfícies planas para gerar duas dimensões. Variando-se a proporção durante a iluminação, é possível gerar microestruturas com três dimensões tais como Fresnel e redes de difração óptica. Porém, a profundidade da geometria produzida será um fator limitante no uso dessa técnica (YAN et al., 2005).

Para as estruturas de Fresnel com grande profundidade, a baixa taxa de remoção do material se torna um problema na eficiência do processo. Técnicas como o polimento não permitem a reprodução de geometrias complexas, além do alto custo da cadeia produtiva e a demora no tempo de fabricação. Para este tipo de aplicação o torneamento com ferramenta de diamante é mais recomendável (KLOCKE, RÜBENACH, 2000).

3.2.2 – Fabricação do molde e inserto: seleção dos materiais e processos

O papel dos materiais no desenvolvimento da tecnologia moderna é de suma importância. Quanto mais específica a aplicação de um material, maiores os requisitos de confiabilidade, segurança e alto desempenho em termos de eficiência. Além disso, os materiais têm de ser cada vez mais leves para a grande maioria das aplicações. Por fim, deve haver uma combinação de propriedades que possibilite seu uso para fins específicos.

Normalmente, os moldes são construídos com aço inoxidável, aços endurecidos ou a combinação de ambos. A qualidade dos aços para a moldagem de plásticos ópticos deve satisfazer as mesmas qualidades dos aços usados como ferramentas altamente solicitadas. A

ferramenta e os equipamentos devem suportar pressões de 900 até 1200 bar (pressão de injeção do cilindro). Outros fatores que o molde deve atender são: solicitações decorrentes da força de travamento dos moldes, corrosão derivada do refrigerante líquido usado, saída de gás do fundido, manutenção e limpeza. Materiais não-ferrosos, tais como o cobre, cobalto, berílio, cromo, zircônio e outros são usados para aumentar a condutividade térmica do molde (BÄUMER, 2005).

Matrizes fabricadas com deposição de níquel (galvanoplastia) ou ligas de níquel são muito duráveis, porém possuem um preço caro (>US\$ 3000) o que se deve à complexidade do processo de manufatura (KOENER et al., 2005).

Para microestruturas mais simples, os moldes são manufaturados diretamente por meio de usinagem micromecânica como a fresa, furo ou torneamento de latão, cobre e alumínio. Fabricar inserto de moldes (por meio da tecnologia do pó) de aço com usinagem a laser ou até mesmo metal duro permite maior vida útil, com melhor comportamento de desgaste se comparada aos com moldes feitos níquel ou latão (PIOTTER et al., 1999).

É possível também usar coberturas, como por exemplo, o TiN (nitreto de titânio) que possui objetivo de aumentar o tempo de vida útil, eliminar os filmes da superfície do molde que se aderem durante o processo e facilitar a ejeção da peça (BÄUMER, 2005).

O porta-molde pode ser construído com dois tipos de aços diferentes em sua configuração padronizada, porém outros tipos de aços podem ser utilizados de acordo com a necessidade. Neste trabalho, foi usado o porta moldes modelo 25-30 da Polimold[®] constituído em aço contendo uma quantidade média de carbono (1045), que permite usinabilidade fácil e é especialmente indicado para a estrutura dos Porta-Moldes ou moldes com cavidades em postigos.

Em função do acabamento superficial e resistência química oferecida foi usado o aço inoxidável SAE 420 nos insertos fixos e porta insertos.

Normalmente as características do molde que criam as superfícies ópticas são fabricadas separadamente como insertos. A superfície do inserto são fabricados com o formato negativo do componente (BÄUMER, 2005).

Os insertos podem ser feitos de metais, dielétricos ou semicondutores (CHOU, KRAUSS, RENSTON, 1995).

Com o intuito de aliar o aumento da resistência mecânica com a qualidade superficial gerada no cobre, primariamente, o material selecionado para a construção dos insertos móveis para arranjos de microlentes escolhido foi a liga metálica de latão de 2". Faceando e polindo sua superfície com pasta de diamante de até 1 μ m de granulometria tem-se sua imagem na

FIGURA 3. 2. Entretanto, este material foi descartado em virtude do aparecimento de uma segunda fase (manchas escuras que surgiram na microestrutura, isto é, o material era bifásico, o que poderia prejudicar a condução dos experimento na construção das microgeometrias, pois um grão poderia reagir de modo diferente do seu adjacente afetando a microdimensão desejada, acarretando péssimo acabamento superficial para estruturas ópticas).

FIGURA 3. 2 - Figura da superfície da amostra de Latão, com uma amplificação de 200x, mostrando as duas fases do material.

Portanto, de acordo com os motivos enunciados acima e os motivos que serão apresentados na próxima secção (3.2.2.1), o novo material escolhido foi o cobre eletrolítico, que possui 99,99% de pureza e proporciona excelente acabamento superficial quando usinado com ferramenta de diamante, porém sua dureza e resistência mecânica são baixas para o uso em moldes.

O cobre e suas ligas constituem um dos maiores grupos comerciais dos metais, classificado em terceiro lugar atrás apenas do aço e do alumínio em termos de consumo e produção. O cobre e suas ligas são amplamente usados por causa da sua excelente condução térmica e elétrica, alta resistência a corrosão, boa resistência a fadiga, além da facilidade de sua fabricação (AMERICAN SOCIETY FOR METALS ASM, 1998).

3.2.2.1 Fabricação do inserto para a microlente de Fresnel: processos de usinagem de ultraprecisão com ferramenta de ponta de diamante monocristalino

Para superfícies ópticas, a rugosidade (RMS) deve ser de aproximadamente 10 a 20 vezes menor que o comprimento de onda da luz ($\lambda/10$ ou $\lambda/20$). Isto significa que nos componentes ópticos de plástico que são normalmente usados próximos à luz infravermelha a rugosidade deve ser menor que 30 nm (BÄUMER, 2005; RIEMER, 2008).

As três técnicas mais comuns de fabricação por meio da gravação incluem a geração de perfis a laser, geração de feixe de elétron e torneamento com ferramenta de ponta única de diamante (SPDT) (BLOUGH, et al.1997).

A geração de perfil a laser e a gravação com feixe de elétron são praticamente similares, já que ambos usam energia focada para expor o material foto sensível. As limitações desses processos são: o tamanho finito da distribuição da energia focada, com diminuição do limite da resolução em pixel, gravação em pequenas áreas e perda da fidelidade na reprodução do perfil que ocorre por causa da dispersão na superfície do material e limitações de fotomateriais (BLOUGH, et al.1997).

O torneamento com ferramenta de ponta única de diamante é uma tecnologia desenvolvida há 30 anos e sempre esteve associado aos paradigmas do tipo “é muito caro”, “apenas para cientistas” ou “uso de laboratório”. Desde a última década esta tecnologia está mudando gradualmente para o mercado consumidor (BÄUMER, 2005).

A natureza determinística do processo, manuseio e controle, tornam-se possíveis graças ao desenvolvimento e a disponibilidade da alta tecnologia de máquina e controle, que viabiliza o torneamento de ultraprecisão abrindo extensivamente a área de aplicação na manufatura de componentes com óptica complexa e mecânica. EODs e elementos refletivos para orientação de feixes a laser, sistemas de formação de laser, mancais aerostáticos ou moldes para injeção de plásticos são apenas uma pequena extensão de peças que podem ser manufaturadas com esta tecnologia (KLOCKE, RÜBENACH, 2000).

A alta resistência aliada à alta afiação da aresta de corte do diamante monocristalino permite gerar a remoção do cavaco mesmo para pequenas espessuras extremas $\ll 1\mu\text{m}$, portanto, é perfeitamente apropriado para a produção de superfícies de qualidade óptica (KLOCKE, RÜBENACH, 2000).

O torneamento de ultraprecisão exige alguns requisitos básicos, tais como: máquinas-ferramentas com mancais aerostáticos, elevada rigidez, controle ultrapreciso 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. Assim, segundo PAUL et al. (1996), material “torneável com diamante” significa que o custo do desgaste da ferramenta é aceitável em termos do valor do componente usinado, por exemplo, lentes anisféricas de silício.

Segundo KÖNIG et al. (1991), a usinagem de ultraprecisão possui parâmetros de corte da ordem de micrômetros ou menores. Portanto, o processo de remoção de material e geração de superfícies torna-se crítico em razão da microinteração 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 consequentemente torna as dimensões de usinagem muito menores que o tamanho médio dos grãos. Logo, em seções de corte reduzidas (profundidade de corte versus avanço), a ferramenta estará cortando no domínio de um único grão.

Segundo KÖNIG et al. (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 3. 3). 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.

FIGURA 3. 3 - Imagem da superfície de uma liga Al-Mg, onde é possível observar a transferência do perfil da ferramenta sobre a peça.

A quantidade e o tamanho de partículas duras (impurezas, inclusões, etc.) em metais e ligas podem ser considerados fatores limitantes para obtenção de melhores acabamentos superficiais no torneamento de ultraprecisão.

Estas impurezas geralmente são resíduos de processos pirometalúrgicos e/ou de refino aplicados para obtenção de metais e ligas. Tais partículas possuem durezas elevadas e se encontram em uma matriz dúctil.

Existem alguns materiais, como por exemplo, ligas de alumínio contendo altas concentrações de silício que apresentam inclusões duras em sua matriz dúctil. Estas partículas são difíceis de serem cortadas (FIGURA 3. 4). Por isso, durante o corte, a ferramenta irá arrancar e arrastar essas inclusões, causando riscos que prejudicam a função da superfície usinada. Além disso, estas partículas por serem muito resistentes, podem danificar severamente a aresta de corte causando microfraturas através de um mecanismo de fadiga que, consequentemente, prejudica o acabamento superficial.

FIGURA 3. 4 - Fotomicrografia da superfície usinada da liga Al 7075, aumento de 100x.

O reflexo deste fenômeno também pode ser observado na FIGURA 3. 5 por meio da superfície do cavaco. É possível observar que na extremidade mais fina do cavaco pequenos furos demonstram que, durante o passo da ferramenta, esta não consegue retirá-los, removendo apenas o material ao seu redor.

FIGURA 3. 5 – Imagem da parte inferior dos cavacos da liga Al 7075 analisados no MEV, imagem com aumento de 400 x.

O problema de inclusões duras na matriz dúctil pode ser contornado utilizando-se ferramentas com ângulo de saída mais negativo. Em contrapartida, ferramentas com essa geometria tendem a causar maiores danos à superfície em consequência das maiores deformações introduzidas pela geometria da ferramenta, pois ângulos de saída mais negativos dificultam a remoção de material e aumentam as forças de corte.

Portanto, selecionar o material adequado é extremamente importante para que os problemas mencionados de manufatura não aconteçam.

O mecanismo de geração de superfície em microusinagem pode ser afetado por vibrações relativas, sendo estas em escala de amplitude nanométrica, assim como pela microgeometria do processo de remoção do cavaco. Além do erro relativo de movimento da usinagem, as propriedades do material (metalurgia e pureza) podem afetar muito a microestrutura da superfície usinada. Em microusinagem de policristais há imperfeições inevitáveis na rugosidade superficial, decorrentes de fatores como anisotropia, inclusões duras na matriz metálica, contornos de grão, dureza superficial, etc. (KÖNIG et al., 1991).

A usinagem de ultraprecisão pode ser usada na fabricação de insertos para moldes, integrando essa tecnologia com a maioria das máquinas injetoras tradicionais para produzir lentes com grande exatidão (SLOCUM, WILLOUGHBY, WERKMEISTER, 2005).

McKEOWN (1987) definiu uma possível classificação das usinagens convencionais, de precisão e de ultraprecisão, em termos de tolerância e variedades de produtos por processo, mostradas na TABELA 2. 2.

TABELA 2. 2- Tolerâncias de componentes para diversos produtos fabricados utilizando processos de usinagem (McKEOWN, 1987).

	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 par 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)
	500 nm	Mancais de esfera e rolo, válvulas servo-hidráulicas, mancais aerostáticos, bicos injetores para impressoras, etc.	Escalas magnéticas, osciladores de quartzo para câmera CCD, memórias magnéticas ("bubbles"), transdutores de pressão finos, cabeçotes de impressão térmicos, cabeçotes de videocassete	Lentes de precisão, escalas ópticas, espelhos poligonais para laser, espelhos de deflexão, conectores e fibra óptica (modo único)
Usinagem de Ultraprecisão	50 nm	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 "video-disc optic"
	5 nm		"Very Large Scale Integrated VLSI"	Redes de difração de ultraprecisão

A rugosidade média quadrática (R_q ou RMS) típica obtida neste tipo de usinagem é menor do que 5 nm, ou seja, esta tecnologia é perfeitamente apropriada na fabricação de insertos ópticos (BÄUMER, 2005).

O torneamento de diamante pode produzir microlentes com erros de forma em torno de 250 nm, 9 nm de rugosidade com grandes diâmetros de abertura e 100% de fidelidade de

replicação, assim como outros tamanhos, entretanto, o custo com máquinas e ferramenta ainda são altos (FOREST, SAEZ, HUNTER, 2007).

3.2.2.2 Fabricação do inserto para os arranjos esféricos: técnicas de microfresamento e microforjamento.

Como já visto, existem várias técnicas para a fabricação de arranjos de microlentes. Tais técnicas produzem um molde mestre que pode ser replicado a um baixo custo. Estes processos, com exceção do torneamento de diamante, podem criar peças perfeitas com diâmetro de abertura 15-500 μm que são limitadas pela abertura quadrada $\phi = \pi/4 = 78\%$ (visto no capítulo 2) ou aproximações de hexagonal compacta $\phi = 91\%$. Esforços para aumentar ϕ não resultam em lentes com geometria precisa em toda a abertura da lente. Atingir grandes valores de abertura numérica pode ser um desafio, pois microlentes possuem curvatura “sag” ou sagita, com tamanhos da ordem de micrômetros (FOREST, SAEZ, HUNTER, 2007).

Esta parte do trabalho visa desenvolver um método de baixo custo, flexível para a fabricação de moldes que teria o mesmo patamar de erro de forma de um torneamento com ferramenta de diamante. O novo método emprega um centro de usinagem de 3 eixos e minimiza várias etapas do processo de construção de microarranjos.

A técnica de fresamento seguida pelo forjamento é descrita por meio da FIGURA 3. 6.

FIGURA 3. 6 – (a) Amostra de cobre eletrolítico. (b) Fresa com ponta arredondada tipo “ball nose” para retirada de material. (c) Esfera de aço no qual é introduzido o carregamento na superfície até que ocorra deformação gerando o acabamento final da cavidade. (d) Molde usado na injeção dos arranjos de lentes. (FOREST, SAEZ, HUNTER, 2007).

Para fabricar o arranjo de lentes, o substrato de cobre eletrolítico é primeiramente faceado com ferramenta de diamante ou polido (FIGURA 3. 6 (a)). Posteriormente, uma fresa com ponta arredondada “ball nose” gera uma pré-cavidade com alta rugosidade para a

retirada do material (FIGURA 3. 6 (b)). O formato final e a curvatura da microlente “sag” é obtido por meio do puncionamento de uma esfera com raio da lente desejada (FIGURA 3. 6 (c)). A razão por trás deste processo é que o fresamento determina a maior parte da forma do molde, e o subsequente forjamento com uma esfera de rolamento concede boa forma e rugosidade sem deformações substanciais que poderiam afetar as lentes vizinhas de um arranjo compacto (FIGURA 3. 6 (d)). Após a fabricação do molde, a injeção pode ser executada (FOREST, SAEZ, HUNTER, 2007).

3.3 Métodos de replicação dos elementos ópticos difrativos usando polímeros

Durante muitos anos, foram produzidos elementos ópticos poliméricos com baixa precisão. O início dos processos de micromoldagem consistia na moldagem de resinas com viscosidades extremamente baixas, capazes de preencher cavidades muito pequenas. Entretanto, nos últimos anos, processos mais rápidos como prensagem a quente (termomoldagem) e moldagem por injeção foram introduzidos com sucesso na micromoldagem (BAUER et al., 1999).

Os principais métodos de produção dos polímeros ópticos são: fotopolímeros curados com luz ultravioleta, fundição de epóxi, moldagem por prensagem a quente ou termomoldagem, litografia e injeção em moldes. O escopo deste estudo analisará especificamente os processos de prensagem a quente e a injeção em moldes que serão detalhados mais adiante.

3.3.1 - Razão de Aspecto e Fidelidade na Replicação de elementos ópticos

Os aspectos mais importantes avaliados em um processo de replicação são a razão de aspecto e a fidelidade na replicação.

A razão de aspecto pode ser definida pela razão da profundidade dividida pela largura.

Já a fidelidade na replicação é dada pela seguinte relação:

$$Fidelidade(\%) = \frac{H_m}{H_0} \quad (3.1)$$

Onde H_m é a altura da peça injetada e H_0 é a altura da cavidade do molde.

Para exemplificar a fidelidade de replicação de peças, na FIGURA 3. 7 Murakami; Kotaki; Hamada (2008) ensaiaram três polycarbonatos com pesos moleculares diferentes. Os materiais com maior peso molecular tiveram maior dificuldade em preencher as microcavidades do molde em algumas condições de injeção.

FIGURA 3. 7 - (a) Medida de fidelidade com polycarbonato na replicação dos entalhes em V do molde por meio de perfilômetro óptico 3D. (b) Preenchimento de 63% dos entalhes (c) Preenchimento de 88% dos entalhes (d) Preenchimento de 98% dos entalhes (MURAKAMI; KOTAKI; HAMADA, 2008).

Na fabricação de microcomponentes que possuem cantos vivos, quando o processo atinge 63% na razão de fidelidade, o perfil se assemelhará a um arco e não ao formato em “v”. Já para 98% de replicação, as ranhuras em “v” aparecem de forma clara, entretanto, suas pontas não se formaram com extrema agudez, ou seja, se aproximam de um formato plano. Adicionalmente, a superfície não preenchida possuía rugosidade elevada mostrando o aspecto muito enrugado.

LIN, ISAYEV, MEHRANPOUR, (2008) mostraram em seus estudos que a luminescência está diretamente ligada à fidelidade de replicação das microcavidades, ou seja, quanto maior a reprodutibilidade melhor a luminescência dos elementos ópticos difrativos. Os melhores resultados obtidos em seus estudos foram com o uso do polycarbonato de baixo peso molecular, pois a menor viscosidade possibilitou melhor preenchimento das microcaracterísticas aumentando a luminescência.

3.3.2 - Moldagem por prensagem a quente ou termomoldagem

Microlentes refletivas-difrativas são rotineiramente fabricadas por moldagem com prensagem a quente tais como os discos compactos (CD's e discos de vídeo digital (DVD) são moldados com PC e possuem características com tamanhos em torno de 1 μm (CHOU, KRAUSS, RENSTON, 1995). Na moldagem por prensagem a quente, folhas de polímero ou o seu pó são colocados entre duas placas de moldes aquecidos. A força e o calor são aplicados às placas dos moldes, comprimindo lentamente o polímero que se funde e é forçado a escoar pelas características do molde. Após o preenchimento, o molde precisa ser resfriado até a temperatura abaixo da transição vítrea do polímero (T_g), isto causará a solidificação e a retração do polímero expulsando-o do molde. Este processo é lento (com ciclos de tempo altos) em função da necessidade do polímero ser aquecido acima da temperatura de transição vítrea (GIL, 2002).

Sahli et. al. (2009), dizem que a fidelidade de replicação está fortemente ligada às condições do processo, em particular pressão e temperatura.

O processo de termomoldagem permite conformar os polímeros em faixas de temperaturas e pressões bem abaixo daquelas usadas no processo de moldagem por injeção, ou seja, na injeção as temperaturas devem ser altas a ponto de se obter baixos valores de viscosidade para que aconteça o preenchimento do molde (SAHLI et. al. 2009).

As maiores vantagens da moldagem por prensagem a quente também são as maiores limitações deste processo. O resfriamento das placas do molde desde a temperatura de fundição do polímero até abaixo da T_g é um processo muito lento devido à inércia térmica da massa das placas dos moldes. Essa pequena queda da temperatura pode limitar a velocidade de produção do processo, mas também permite que a peça se resfrie lentamente, limitando as tensões residuais introduzidas na amostra. A falta de tensões residuais produz peças com grandes áreas planas, no qual é necessária para a produção de CDs. Por outro lado a contração da peça ocorre de maneira expressiva em virtude das grandes faixas de temperaturas que ocorrem no processo, mas no caso de produção de CDs isso não é problema, pois para a óptica refletiva e difrativa usada nos CDs não há a necessidade de ser um formato particular, apenas um formato que irá refletir a luz de modos diferentes (GIL, 2002).

As placas de moldagens quentes fazem com que o polímero escoe para grandes profundidades, possibilitando obter grandes razões de aspecto e contração durante o resfriamento para permitir que sejam separadas as amostras do molde.

MILLER; McLEOD; SHERWOOD, (1951) começaram com os primeiros exemplos de impressão a quente fazendo replicações de lentes de Fresnel.

A termomoldagem permite o uso de ferramentas e processo de preenchimento mais simples, com caminhos de preenchimentos mais curtos, porém devido aos longos ciclos de tempo (da ordem de 5 a 20 minutos) em comparação com a moldagem por injeção, a termomoldagem se torna boa para protótipos ou pequenas produções em série (BAUER, 1999).

Davis (2002) em seu estudo fez uma comparação de microprismas termomoldados (FIGURA 3. 8 (a)) versus injetados (FIGURA 3. 8 (b)). Na injeção, uma frente de congelamento do fluxo ocorre no plástico conforme os sulcos são preenchidos e ao invés de suceder a formação de arestas bem definidas ou agudas, ocorre o arredondamento dos vértices. Como resultado, as peças injetadas são menos eficientes em comparação com as peças termomoldadas. Para grandes volumes de produção onde eficiência, baixa birrefringência, e precisão não são importantes este processo pode ser aceitável. Para resolver o problema, o autor descreve uma melhoria do processo usando manufatura híbrida conhecida como moldagem por injeção junto com termomoldagem resultando em alta precisão de moldagem, no qual os ciclos são próximos aos da moldagem por injeção enquanto que a fidelidade, birrefringência e precisão são próximas às da moldagem por prensagem a quente.

FIGURA 3. 8 – Comparação da fidelidade dos microprismas (a) termomoldados e (b) injetados (DAVIS, 2002).

3.3.3 - Moldagem por injeção

Aproximadamente 32% de todo o material plástico processado no mundo é transformado por meio da moldagem por injeção (C-MOLD DESIGN GUIDE, 1994). Seu crescimento se deve, em grande parte, ao desenvolvimento de novos materiais plásticos e aos avanços na tecnologia do processo de injeção.

Muitos avanços na moldagem por injeção têm sido alcançados, e conseqüentemente ocorreu avanço em outras áreas (BÄUMER, 2005):

- Desenvolvimento de máquinas injetoras;
- Ferramental para os insertos ópticos e moldes (avanço das técnicas de engenharia de precisão, especialmente no torneamento com ferramenta com ponta de diamante);
- Materiais;
- Coberturas;
- Processos.

As grandes vantagens da moldagem por microinjeção são os processos sequenciados (que se padronizaram devido ao alto conhecimento da tecnologia plástica), alto nível de automatização e períodos de ciclos pequenos.

A moldagem por injeção é o método mais usado nas operações de processamento e manufatura de materiais poliméricos de uso óptico com formato complexo e peças com paredes finas devido ao baixo custo e velocidade rápida de produção (LIN, ISAYEV, MEHRANPOUR, 2008).

Dentre os processos de moldagem disponíveis na escala de microrreplicação, a moldagem por injeção é considerada o método mais eficiente devido ao baixo tempo de ciclo, alto grau de automação, exatidão e consistência dos resultados (MURAKAMI; KOTAKI; HAMADA, 2008). Por estes motivos a moldagem por injeção é amplamente usada na fabricação de CDs, DVDs e guias de luz. Ultimamente, a tecnologia da moldagem por injeção tem sido estudada para o uso na fabricação de microlentes, microssistemas eletromecânicos (MEMS), microssensores, elementos de óptica holográfica e EODs.

Os dispositivos manufaturados por meio da moldagem por injeção estão cada vez mais necessitando exatidão de forma na replicação de características em microescala para os projetos ópticos desejados. Para produzir peças plásticas com exatidão alguns estudos devem ser considerados no que se refere às condições de moldagem (MURAKAMI; KOTAKI; HAMADA, 2008).

A moldagem por injeção é a escolha mais popular na fabricação de EODs devido principalmente à alta produção e o grande suporte que as indústrias sustentam. Entretanto, algumas desvantagens se tornam aparentes em certas aplicações. O fenômeno de birrefringência surge devido à contração não uniforme e a “camada congelada” da peça que se

forma nas paredes da cavidade do molde, indicando tensões internas que distorcem as partes durante o seu resfriamento (SOHN; DOW, 1999).

A moldagem por injeção é potencialmente eficaz no que se refere aos custos para se produzir comercialmente lentes ópticas com qualidade, desde que altos volumes do mesmo tipo de lente sejam fabricados. Em regra, o volume de peças produzidas deve exceder 10.000 unidades, para que os custos necessários com ferramental e equipamentos sejam amortizados (KAROW, 1993; SILVA, 2002).

No processo de injeção, o polímero é fundido por meio de um fuso e depois é injetado em alta velocidade e alta pressão em um molde. Este meio de fabricação tem a vantagem de produzir grande volume de peças e a capacidade de incluir elementos de montagem e alinhamento conectados a peça óptica, não sendo necessário pós-processamento para montagem. Os ciclos de tempo podem variar desde alguns segundos até um minuto. Entretanto, a velocidade alta tem consequência devida à ampla variação de temperatura sofrida pelo polímero em um curto espaço de tempo. Assim que o polímero é injetado no molde, este é resfriado próximo às paredes do molde e sua viscosidade começa aumentar. O polímero encolhe e se afasta das paredes e depois é forçado novamente contra a parede por causa do polímero que está entrando no molde. Este processo causa tensões residuais no polímero recém-resfriado (GIL, 2002).

Adicionalmente, a retração que ocorre evita que o polímero fique com as mesmas dimensões exatas do molde. Entretanto, se os parâmetros do processo estiverem corretos estas tensões podem ser minimizadas sendo possível conseguir dimensões muito próximas do molde. Esta correlação entre os parâmetros do processo e a tolerância dimensional ainda não é muito clara. A moldagem por injeção ainda é uma ciência que se baseia muito na experiência de técnicos em moldagem (GIL, 2002). Na moldagem em microescala esta falta de conhecimento ocorre mais intensamente.

Devido ao alto volume produzido na replicação por injeção, aliado à alta precisão que pode ser alcançada, esse processo foi escolhido como o foco do trabalho.

NIKOLAJEFF et al. (1997) conseguiram em seus experimentos a reprodução de redes de difração com resolução micrométrica nos processos de injeção usando técnicas de fabricação iguais as de uma produção de um CD. Em seus resultados foi possível replicar uma rede de difração com periodicidade de 20 μm e profundidade de 1 μm com empenamento da peça de apenas 1,6% do tamanho real. A estabilidade na fidelidade de replicação foi mantida durante centenas de elementos produzidos.

3.3.3.1 - Descrições do processo para uma máquina do tipo rosca-sem-fim

A moldagem por injeção tem aproximadamente 100 anos de idade. A complexidade desse método cresceu muito especialmente com a introdução de sistemas de controle que permitiram monitorar muitas variáveis do processo. Para realmente entender o processo de moldagem é necessário descartar algumas dessas variáveis e focar nas principais atividades da moldagem (SILVA, 2002).

A moldagem por injeção se divide basicamente em 4 passos (FIGURA 3. 9): abastecimento, injeção, recalque e resfriamento.

FIGURA 3. 9 – Desenho esquemático de uma máquina injetora (SORS, BARDÓCZ, RADNÓTI, 19--).

Abastecimento

Os grânulos de polímeros são normalmente cilindros extrudados com dimensões de aproximadamente 1/4" no comprimento por 1/8" no diâmetro, no qual são carregados até a tremonha ou funil. Estes grânulos alimentam o cilindro por meio da ação da gravidade passando pela garganta da tremonha (BLASS, 1995; GIL, 2002; SORS et al. 19--).

O cilindro contém em seu interior um fuso sem fim que empurra de forma apertada os grânulos contra a parede deste.

O diâmetro da raiz do fuso é constante até a secção de abastecimento dos grânulos e aumenta na parte em que o polímero se plastifica e se mantém grande até a secção de fusão e transporte. A ponta do fuso possui um formato cônico que possui muitas fendas ou furos. Ela também possui uma válvula ativa ou passiva antirretorno que evita que o polímero retorne ao longo do fuso. Os fusos podem ser de várias formas, podendo ter várias secções cônicas ou filetes com variação no passo da rosca dependendo da aplicação (BLASS, 1995; GIL, 2002).

Logo após o abastecimento dos grânulos, o fuso é rotacionado forçando os grãos a caminharem para a ponta deste. Assim que o polímero entra na secção de deformação plástica da injetora, ele é forçado contra a parede do cilindro fazendo com que a ação de cisalhamento da rotação do fuso contra o cilindro estacionário cause a sua fusão (BLASS, 1995; GIL, 2002).

Setenta e cinco por cento da fusão do polímero é realizada devido às forças de cisalhamento, enquanto os outros vinte e cinco por cento é completado por uma resistência elétrica para esquentar e manter aquecida a parte externa do cilindro (BLASS, 1995; GIL, 2002).

Quando o polímero chega à secção de transporte do plástico fundido da injetora, este continua sendo forçado em direção ao molde e, ao mesmo tempo, ele é completamente misturado com outras partes de polímero fundido de modo que isto garanta propriedades isotrópicas no fundido (BLASS, 1995; GIL, 2002).

Quando o fundido encontra a válvula antirretorno, ele a força para frente fazendo com que o polímero escoe pelas fendas na ponta do fuso na área de injeção. Quanto mais polímero é inserido na área de injeção, mais o fuso se retrai vagarosamente, transladando para trás, enquanto continua a rotacionar na área de injeção fazendo com que o fundido se junte sem aumentar a pressão (GIL, 2002).

Quando a quantidade desejada de plástico fundido é acumulada na frente do cilindro o fuso para de rotacionar.

Os fatores importantes no estágio do abastecimento são a velocidade de rotação do fuso e a temperatura do cilindro. A velocidade de rotação do fuso determina a taxa de cisalhamento do polímero, que afeta a sua viscosidade. A velocidade de rotação do fuso é determinada pela capacidade hidráulica do motor que o rotaciona.

A temperatura do cilindro pode em muitas máquinas possuir 5 diferentes configurações de lugares ao longo de seu comprimento. Para simplificar os experimentos, a

temperatura será considerada constante ao longo do cilindro. Os limites de temperatura do cilindro são determinados pelo polímero que está sendo usado na modelagem. Se o polímero for muito aquecido ele degradará, queimará e amarelará. Se a temperatura for muito baixa, a viscosidade do polímero será muito grande não sendo possível a sua injeção.

O tamanho da área da câmara injetora não é considerado uma variável do processo, pois o que é determinante para a geometria do molde é o volume total da cavidade do molde, os canais de distribuição “*runners*”, canal de alimentação “*gate*”, canal ou bucha de entrada principal “*sprue*” (BLASS, 1995; GIL, 2002).

Injeção

Após o polímero preencher na frente do cilindro, ele está pronto para ser injetado. A parte móvel do molde se une à outra parte que é fixa, por meio de um êmbolo hidráulico. As forças que unem as metades dos moldes e que causam a força de contato superficial devem ser maiores do que a pressão do polímero a ser injetado (GIL, 2002).

Um segundo êmbolo hidráulico força o cilindro contra o molde fixo com força suficiente para que o polímero não vaze na interface. O fuso é então forçado em direção à parte final do cilindro por meio de um pistão hidráulico ou um servo-motor com esferas recirculantes. Durante o ciclo de injeção o fuso não rotaciona. O polímero é forçado e passa pelo canal de entrada indo em direção à cavidade do molde.

Os canais de entrada devem possuir o menor comprimento possível (BÄUMER, 2005).

No caso de cavidade única no molde, para a produção de apenas uma peça por ciclo, o canal de entrada pode alimentar diretamente a peça (BÄUMER, 2005). Entretanto, para se produzir muitas peças por ciclos, conforme a FIGURA 3. 10, os moldes deverão possuir pequenos canais de fluência que se chamam “*runners*” ou canais de injeção ou distribuição como serão chamados nesse trabalho. Estes servem para direcionar o escoamento do polímero para que chegue à cavidade do molde (GIL, 2002).

As peças com uma cavidade normalmente são usadas para protótipos, ou onde a exatidão é necessária. Já as com múltiplas cavidades o seu uso se dá para produção em série, sendo de 2 a 4 cavidades média produção, de 8 a 16 ou até mesmo 32 cavidades para alta produção. Porém, alta produção não garante a alta exatidão e similaridade entre as peças.

Outro fator é o custo do molde que será maior se for comparado com o de simples cavidade (BÄUMER, 2005).

FIGURA 3. 10 – Representação esquemática da injeção para moldagem com duas cavidades (BÄUMER, 2005).

A pressão gerada durante a injeção pode ser variada, de modo que a velocidade linear do fuso também possa variar. Portanto, as principais variáveis nos estágios de injeção são: a pressão de injeção e a velocidade de injeção. A velocidade de injeção para as máquinas de injeção são medidas em taxa volumétrica em cm^3/s . Assim que o polímero passa pelo canal de distribuição, posteriormente passará por uma válvula estreita chamada “gate” ou canal de alimentação.

Os canais de alimentação devem possuir um tamanho de $\frac{3}{4}$ da espessura da peça (BÄUMER, 2005).

A pressão e a velocidade de injeção são fatores limitados devido à capacidade da máquina.

A pressão de injeção deve ser mantida abaixo da maior pressão de aperto dos moldes que a máquina pode gerar (GIL, 2002).

Recalque “*holding pressure*”

Esta é a fase em que o fuso mantém a pressão no polímero já injetado no molde.

Este procedimento é chamado de recalque ou “*holding*” sendo necessário devido ao alto coeficiente de expansão térmica do polímero. Assim que o polímero vaza para o molde que está frio, a parte que está em contato com as paredes do molde resfria primeiro formando uma película ou “*skin*”. O resfriamento da película causa contração do polímero afastando-o das paredes do molde. Se esse fenômeno ocorrer, as dimensões da peça serão totalmente diferentes das dimensões do molde, dificultando extremamente o projeto do molde (GIL, 2002).

Particularmente, o problema é agravado na fabricação das microlentes, por causa do valor da razão superfície/volume ser grande no caso, então o resfriamento das micropeças será mais rápido.

Ao invés de permitir que a contração ocorra, o fuso mantém pressurizado e força a maior quantidade de polímero para o molde fazendo com que a película formada nas paredes se expanda novamente para que as dimensões sejam preservadas. Manter a peça pressionada garantirá as dimensões geométricas, porém causará tensão residual na lente (GIL, 2002).

A pressão e o tempo de recalque são fatores muito importantes para o processo de injeção. A pressão de recalque é limitada pela capacidade da máquina e do tempo de recalque ou pressurização, que dependerá da quantidade de tempo que o polímero levará para solidificar, ou seja, ficar abaixo da temperatura de transição vítrea (GIL, 2002).

Após, o polímero solidificar até o canal de entrada ou principal, não será mais necessário manter a peça pressurizada.

Resfriamento

Assim que a pressão de recalque da peça é aliviada, a peça começa a resfriar no molde. Os moldes utilizam diferentes tipos de sistemas de controle de temperatura tais como: óleo, água ou resistência elétrica (GIL, 2002).

O resfriamento tem como objetivo remover calor suficiente do polímero para que a temperatura caia e fique abaixo da transição vítrea do polímero. Neste ponto, o polímero entra na fase vítrea e não será mais facilmente danificado durante a ejeção do molde (GIL, 2002).

O resfriamento influencia na distorção que a peça terá, no dimensionamento exato, e também na qualidade da injeção do componente produzido (BÄUMER, 2005).

Portanto, o tempo de resfriamento e a temperatura do molde são importantes fatores para o ciclo de resfriamento. Um pequeno tempo de resfriamento diminui o tempo total do ciclo enquanto tempos longos de resfriamento evitam que a peça empene devido à taxa de resfriamento. Entretanto, longos ciclos de tempo de resfriamento são limitados por fatores econômicos que conduzem para tempos mais curtos com a finalidade de produzir mais peças de modo mais barato (GIL, 2002).

A temperatura do molde é limitada pela unidade de controle da temperatura que possui habilidade de trocar calor de acordo com a massa térmica dessa. Outra limitação da temperatura do molde é o aquecimento e o resfriamento médio usado por meio de um variotermo. Em sistemas que usam água, a temperatura máxima é tipicamente 110 °C se o sistema for pressurizado. No final do tempo de resfriamento, o molde abre e a peça é ejetada usando atuadores ou ar comprimido. Logo após, o molde fecha novamente para que o ciclo seja reiniciado (GIL, 2002).

Variotermo é um equipamento que permite aquecer a cavidade prioritariamente à injeção para melhorar a replicação e posteriormente refrigerar o polímero até a temperatura de ejeção da peça. A cavidade pode ser aquecida a partir do interior (por meio de circulação de fluídos ou aquecimento elétrico) ou na superfície. Pequenas massas são aquecidas por meio do último processo citado para que o tempo de ciclo seja curto. Outros meios de aquecimento superficial podem ser feitos com o uso da indução elétrica e luz infravermelha (TOFTEBERG, AMÉDRO, ANDREASSEN, 2008).

A FIGURA 3. 11 mostra o ciclo de pressão e a histerese da temperatura durante a injeção.

FIGURA 3. 11 - Pressão e Temperatura para a moldagem por injeção (BÄUMER, 2005).

O processo de injeção supramencionado é descrito de forma seriada, mas na verdade estes fatores ocorrem de forma paralela. Assim que o tempo de recalque é completado, o fuso começa a fundir novo polímero simultaneamente com a peça sendo refrigerada e ejetada do molde.

3.3.3.2 - Principais desafios da moldagem por microinjeção

Para obter peças plásticas com qualidade óptica é essencialmente óbvio o uso de alta qualidade de ferramentas na moldagem por injeção. Entretanto, as peças nunca serão melhores que o ferramental disponível, isto é, boas ferramentas não garantem boas peças. O completo entendimento de todo o processo de manufatura é essencial para se produzir componentes plásticos com alta exatidão.

Para replicar exatamente uma peça feita de plástico é necessário o seu completo entendimento. O polímero pode ser analisado de modo macroscópico ou microscópico (molecular). Os fatores moleculares devem ser analisados prioritariamente, pois são responsáveis pela resposta macroscópica do polímero. O foco da análise será para termoplásticos, amorfos ou semicristalinos, já que possuem maior relevância na replicação de precisão de pesquisas ópticas. Termorrígidos e elastômeros não são abordados em razão de sua inaplicabilidade no estudo de materiais ópticos.

Zhang, Ong, Lam (2008) diferenciam a moldagem por injeção convencional da microinjeção. Na microinjeção é necessária maior pressão de injeção, taxa de injeção e

temperatura do molde para obter peças com boa qualidade. Molde a vácuo normalmente são usados de forma a preencher toda a cavidade nestes casos e também evitar a degradação do polímero devido ao ar que se encontra aprisionado em seu interior. Outros fatores como dissipação, viscosidade, paredes lisas, e rugosidade superficial, que são insignificantes na injeção convencional, podem desempenhar papel importante na moldagem por microinjeção.

Ao contrário da termomoldagem onde apenas os parâmetros de temperatura e pressão são abordados, a micromoldagem por injeção é uma tecnologia de manufatura muito mais complexa possuindo grande número de parâmetros que influenciam diretamente no processo de fabricação dos μ EODs.

Além dos parâmetros já citados acima (abastecimento, injeção, recalque e resfriamento), ainda serão observados outros que influenciam diretamente no processo da moldagem por microinjeção:

1. Temperatura da fusão cristalina (T_m) na injeção;
2. Temperatura do molde;
3. Velocidade de injeção;
4. Retração e empenamento;
5. Rugosidade superficial do molde e microgeometrias.

Já os principais fatores moleculares e do substrato que são importantes na reologia da micromoldagem por injeção são:

6. Temperatura de transição vítrea;
7. Viscosidade e reologia;
8. Peso molecular e grau de polimerização;
9. Cristalinidade;
10. Calor específico;
11. Coeficiente de transferência de calor.
12. Módulo de elasticidade.

Pelas razões explicitadas, a seguir serão descritos os 12 principais fatores que atuam diretamente no processo de microinjeção.

3.3.3.3 - Temperatura da fusão cristalina (T_m) na injeção

Aumentar a temperatura de fusão cristalina do material aumenta a fluidez devido à redução da viscosidade do material e da tensão de cisalhamento. Isto ocorre com a maioria dos polímeros, entretanto, alguns podem exibir um aumento da taxa de cisalhamento em altas temperaturas. Selecionar uma faixa de temperatura apropriada é importante devido ao efeito do escoamento do material fundido e à possibilidade de evitar a degradação do plástico.

Este parâmetro do processo se torna mais influente na injeção de micropeças em virtude da quantidade de material que é mantido dentro do cilindro durante um longo período.

Entretanto, existem algumas desvantagens de se aumentar a temperatura de fusão cristalina. Por exemplo, quanto maior for a temperatura de fusão de um material polimérico, maior será a quantidade de energia (calor) que o sistema de injeção terá que fornecer na área de plastificação do fuso. Outro fator é que o molde também deverá estar aquecido para evitar que o polímero durante a injeção se solidifique antes de penetrar em todas as cavidades do molde. Quanto maior a temperatura do sistema, maior será o gasto com unidades de controle de temperatura, e também maior será o risco para o operador, ante a possibilidade de vazamentos e ignição. Nos polímeros semicristalinos o começo da solidificação sinaliza o início da cristalização. Se a temperatura de fusão do polímero for alta ocorrerá uma grande diferença entre a temperatura da cavidade e a temperatura ambiente. Quanto maior essa desigualdade maior será a contração na peça e, conseqüentemente, ocorrerá o empenamento (se a contração for desigual), maior serão as tensões internas (a não ser que o polímero resfrie uniformemente), portanto ocorrerão variações no índice de refração verificando-se o aparecimento da birrefringência.

O material com alta temperatura de fusão possui aspecto positivo no sentido de poder ser operado numa faixa de temperatura maior sem se aproximar da T_g , o que não ocorre em outro componente com baixa temperatura de fusão.

3.3.3.4 - Temperatura do molde

As peças produzidas na micromoldagem solidificam mais rapidamente do que a moldagem convencional. Isto acontece em função do pequeno volume de polímero e da alta razão superfície/volume típico da moldagem de micropeças. Portanto, selecionar a

temperatura ideal é muito importante para se evitar que o material fundido se solidifique antes da ação de preenchimento da microcavidade.

Aumentando a temperatura do molde, a temperatura do substrato do polímero mantém-se suficientemente alta garantindo o completo preenchimento da microcavidade. Entretanto, deve ser encontrado um balanço entre a temperatura do molde e a temperatura de resfriamento de forma a minimizar o tempo de ciclo.

Portanto, pode-se concluir que a temperatura do molde possui grande efeito no preenchimento dos μ EODs.

Yoshii, Kuramoto e Ochiai (1998) estudaram o preenchimento de microcavidades usando acrílico e policarbonato. Nesta investigação, as cavidades não foram totalmente preenchidas, pois as dimensões eram muito pequenas (0,55 μ m de largura por 70 nm de profundidade). Para o policarbonato, a temperatura de fusão usada foi de 330°C e para o acrílico foi de 260 °C. O molde foi pré-aquecido em diversas temperaturas. Referidos pesquisadores concluíram, que o maior fator para o preenchimento das microcavidades é o aumento da temperatura de aquecimento do molde.

Em outra comparação, Murakami; Kotaki; Hamada (2008) investigaram quatro amostras de PC (pesos moleculares diferentes) e concluíram que o efeito que mais influencia na replicação de microcavidades é a temperatura do molde seguida pela temperatura de fusão do polímero. Quanto maior for a temperatura do molde maior será a capacidade de preenchimento do polímero. Este efeito se comprovou mais forte para o PC de maior peso molecular. Os resultados foram similares aos efeitos da temperatura de fusão, entretanto, a influência da temperatura do molde na replicação foi mais significativa. Com temperaturas acima de 140 °C todos os PCs com diversos pesos moleculares atingiram fidelidade de 96% de preenchimento nos três pontos de medida, ou seja, a peça ficou mais uniforme. Com base nesses resultados os autores concluíram ainda que é possível fabricar dispositivos ópticos com melhores propriedades mecânicas, ópticas e durabilidade pela produção em massa da moldagem por injeção.

3.3.3.5 - Velocidade de injeção

O perfil de injeção para o preenchimento da cavidade possui dois principais efeitos. O primeiro é que a alta velocidade de injeção facilita o preenchimento de microcavidades, por causa do congelamento prematuro dos polímeros em finas seções de paredes que podem ser

amenizadas pelo aumento da taxa de injeção (FIGURA 3. 12). Entretanto, nestas condições ocorre o segundo efeito, ou seja, o aumento da taxa de cisalhamento que conduz ao aquecimento por cisalhamento. Este efeito diminui a viscosidade do material e auxilia no processo de preenchimento, ao mesmo tempo, em que o aumento grande nas taxas de cisalhamento pode resultar na degradação do polímero e aumento da gaseificação na cavidade. A alta velocidade de injeção acarreta a presença de ar na cavidade e é um exemplo negativo dos efeitos decorrentes da má condução do processo. Na macromoldagem este efeito pode ser suprimido pelo grande volume de material, contudo, não é o caso da micromoldagem, sendo possível constatar o fato visualmente. A gaseificação pode atuar negativamente no molde. Em casos extremos, a associação da alta pressão e alta temperatura com voláteis pode resultar no ataque químico do material do molde. O balanço entre a velocidade de injeção e a taxa de cisalhamento pode evitar a redução da temperatura do substrato antes do preenchimento da cavidade e impedir que o polímero danifique o molde.

Leo e Cuvellez (1996) avaliaram a velocidade de injeção e mostraram que quanto maior a velocidade de injeção, maior será a retração da peça. Isto ocorre por causa da formação de uma película congelada ou “*frozen skin*” de acordo com a FIGURA 3. 12. Se a velocidade de injeção for pequena a camada formada será grande fazendo com que a peça resista à retração.

FIGURA 3. 12 – Secção da película congelada (*Frozen skin*) analisada no micrótomo com filtros polarizados: (a) Taxa de injeção de 5 mm/s e (b) Taxa de injeção de 50mm/s (LEO E CUVELLIEZ, 1996).

Murakami; Kotaki; Hamada (2008) e Tofteberg, Amédro e Andreassen (2008) avaliaram o parâmetro da velocidade de injeção e comprovaram que este fator também afeta o processo de injeção. Quanto maior a velocidade de injeção, maior será a rapidez no

preenchimento da parede do molde e, conseqüentemente, melhor será o escoamento do polímero para dentro das microcaracterísticas, melhorando a fidelidade na replicação.

Entretanto, Liu e Manzione (1996) mostraram que o excesso de velocidade pode causar turbulência no fluído produzindo padrões ondulatórios na peça.

3.3.3.6 - Retração e empenamento

Durante a moldagem, o polímero sofre extremo histórico térmico, que afeta as propriedades finais ópticas e mecânicas, assim como as dimensões especificadas do produto (LIN, ISAYEV, MEHRANPOUR, 2008).

Desvios de geometria causados pela retração do volume e o empenamento são alguns dos inconvenientes causados pela moldagem por injeção. Este é o principal motivo pelo qual a moldagem por injeção de elementos ópticos é evitada em aplicações de alta precisão. Portanto, investigar o processo de moldagem por injeção para lentes poliméricas com alta precisão de forma, é fundamental para resolver as questões técnicas associadas à conformidade da superfície em relação ao projeto e, finalmente, proporcionar que o processo de manufatura de alta precisão disponível seja satisfatório na condição do desempenho óptico preciso.

A relação de retração nos polímeros ópticos varia entre 0,2 até 1%. É importante compensar o material que retraiu no projeto do molde (BÄUMER, 2005).

Infelizmente, é muito difícil calcular com exatidão a retração devido aos efeitos da geometria do componente e ao processo de moldagem único a que esta peça foi submetida.

Segundo Leartcheongchowsak et. al. (1994), os maiores problemas na moldagem por injeção são causados pela retração. A retração não uniforme ou empenamento é o maior problema do processo e pode ser resolvido aumentando-se a dimensão nominal do molde. Para peças simples este procedimento pode funcionar, porém para componentes com formato complexo com tolerâncias apertadas, a retração pode não ser prognosticada.

Leartcheongchowsak et. al. (1994) selecionaram os principais fatores que poderiam causar o empenamento: temperatura da cavidade do molde, temperatura do cilindro, temperatura do bico de injeção, recalque, tempo de injeção, tempo de resfriamento, tempo de abertura do molde, velocidade do fuso e velocidade de injeção. Tais autores concluíram, por meio de métodos estatísticos TAGUCHI e ANOVA, que 6 fatores realmente influenciaram a

retração no processo de injeção: pressão na cavidade do molde, tempo de injeção, tempo de resfriamento, velocidade de injeção, velocidade do fuso e tempo de abertura do molde.

Leo e Cuvellez (1996) fizeram testes para avaliar a retração. A primeira análise foi em relação ao tempo de recalque, concluindo que quanto maior o tempo, menor foi a retração das peças moldadas, sendo o melhor tempo obtido pelos autores de 25 s. Segundo fator analisado foi a retração ao longo da peça em relação ao ponto de injeção (“gate”). Em alguns experimentos ocorreu a retração no comprimento longitudinal, sendo que quanto mais longe do canal de alimentação (gate), maior foi a retração.

Leo e Cuvellez (1996) constataram que quanto maior a pressão, menor foi a retração na peça. Neste experimento, os autores realizaram o chamado “*overpacking*” (alta pressão de injeção que cria alto volume específico por meio de grandes recalques), o que implica na deformação elástica do molde (mesmo em moldes de alta rigidez) fazendo com que a retração seja negativa, ou seja, a peça ficará maior que sua dimensão nominal, resolvendo, destarte, o problema da retração.

Já Kambour et. al. (1996) revelam alguns problemas que o “*overpacking*” ou super-recalque pode ocasionar. O primeiro fator é o excesso de tensões residuais que permanece na peça e, conseqüentemente, causa diferenças dimensionais. O segundo fator apontado é o excesso de pressurização do núcleo. Enquanto este solidifica, a densidade específica aumenta demasiadamente e, quando o molde se abre para ejetar a peça, o seu núcleo se recupera para a densidade nominal e causa deformação da película superficial surgindo microtrincas. Os autores sugerem que os ciclos de tempo e a pressão durante o recalque sejam o mínimo possível para que esse efeito seja minimizado.

Liu e Manzione (1996) estudaram o super-recalque e concluíram que esse fator não determina a precisão de uma peça. No experimento, houve a correlação da medida da massa com o recalque e ocorreram grandes desvios padrões em ambas as medidas. Como o objetivo é obter dimensões precisas, o que mais importou para obter peças com alta exatidão foi a viscosidade no momento da injeção.

Para Murakami; Kotaki; Hamada (2008), o parâmetro de recalque ou “*holding pressure*” mostrou ser o fator que menos influenciou a replicação na microinjeção.

Park e Kwon (1998) defendem a ideia que, para minimizar o empenamento de uma peça, deve-se otimizar o sistema de resfriamento para que este seja o mais uniforme possível.

Portanto, selecionar a melhor faixa de recalque será outro ponto chave no processo de microfabricação dos elementos ópticos difrativos.

3.3.3.7 - Rugosidade superficial do molde e microgeometrias

Para que a interface do molde com o polímero seja perfeita (não haja nenhuma fenda entre o contato do polímero e a interface do molde), a rugosidade do molde deverá ser mínima para que a taxa de transferência de calor seja melhorada, já que esta é proporcional à área de contato entre ambos. Entretanto, para imperfeitas interfaces, a rugosidade do molde aumenta a resistência de contato térmica, consequentemente, há maior resistência na transferência de calor entre o polímero e o molde (ZHANG, ONG, LAM, 2008).

Zhang, Ong, Lam (2008) mostram a correlação entre a temperatura do molde e a temperatura de fusão cristalina do material versus a rugosidade da peça. Foi concluído que quanto maior a temperatura de fusão e do molde, menor será a influência da rugosidade superficial do molde. Outro fator apontado pelos autores é a espessura da cavidade do molde (espessura da peça), ou seja, quanto menor esta, maior será o efeito da rugosidade no preenchimento do molde.

GRIFFITHS et. al. (2007), em seus estudos, tentou correlacionar o efeito da rugosidade superficial no preenchimento do molde, porém nenhuma ligação foi relacionada.

Outro fator importante é o direcionamento das microcaracterísticas ou ranhuras. Se estas forem paralelas ao fluxo de injeção, seu preenchimento será mais fácil. Já para ranhuras perpendiculares ao fluxo, o preenchimento será mais difícil (TOFTEBERG, AMÉDRO, ANDREASSEN, 2008). Este fator será analisado neste trabalho nos resultados de fidelidade de replicação.

3.3.3.8 - Temperatura de transição vítrea (Tg)

A Tg é a transição do polímero do estado “vítreo” para o estado “borracha”. Esta mudança pode ser comparada à transição dúctil-frágil em outros materiais. No estado vítreo o polímero é mais resistente.

Acima da temperatura de transição vítrea (Tg), os polímeros podem apresentar fluência ou alta condição elástica devido à ativação térmica, garantindo que a mobilidade molecular seja alta. Abaixo da Tg, a configuração molecular está inerte e a fratura frágil ocorre com propagação da trinca (CALLISTER, 2006).

A temperatura de transição vítrea dos polímeros é o ponto onde a inclinação da reta no gráfico de volume específico versus temperatura sofre mudança. É estabelecido que a Tg

situa-se em uma determinada temperatura, mas, na verdade, a mudança ocorre numa faixa de temperatura de aproximadamente 12 °C e é afetada principalmente pela taxa de resfriamento e pela estrutura cristalina (GIL, 2002).

As ligações cruzadas restringem o movimento molecular. Com alta densidade de ligações cruzadas, o movimento molecular fica virtualmente impossibilitado, em nível tal que esses polímeros não experimentam transição vítrea ou o seu consequente amolecimento (CALLISTER, 2006).

A temperatura de trabalho dos polímeros usados na óptica de precisão deve ser abaixo da T_g, pois, durante a transição, ocorrem grandes mudanças no volume e resistência.

3.3.3.9 - Viscosidade e reologia do material fundido

A reologia é o ramo da mecânica dos fluídos que estuda as propriedades físicas que influenciam na quantidade de movimento em um fluído (SILVA, 2002).

A viscosidade é a propriedade reológica mais conhecida e a única que caracteriza os fluídos newtonianos. No caso de materiais poliméricos, quando aplicada à manufatura, a reologia é relacionada com a fase de deformação denominada fluxo. Para a área de processamento de plásticos é propriedade crucial, pois a viscosidade determina a habilidade do polímero escoar em cavidades pequenas e profundas, assim como sua capacidade de preenchimento do molde antes do início de seu resfriamento, e também para o dimensionamento das buchas de entrada (*sprue*), canais de injeção ou distribuição (*runners*) e canais de alimentação (*gate*) (SILVA, 2002).

A viscosidade do polímero varia com o aumento da temperatura do material e o tipo de microestrutura e por tal motivo as propriedades dos materiais são importantes fatores que afetarão o comportamento do escoamento. A viscosidade pode ser definida como a resistência interna do material à deformação.

A viscosidade é afetada por muitos fatores moleculares e também pelo valor da temperatura em que o material se encontra, como mostra a FIGURA 3. 13.

FIGURA 3. 13 – Viscosidade em função da temperatura para diversos termoplásticos (BRYDSON, 1995).

Outro fator que influencia na viscosidade é a taxa de cisalhamento que, de acordo com a equação 3.2, pode ser descrita:

$$\eta = k\dot{\gamma}^{\frac{1}{m}-1} \quad (3.2)$$

Onde η é a viscosidade, k é o fator de consistência (para $\dot{\gamma} = 1/s$), $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento e $m > 1$ para os polímeros.

A taxa de cisalhamento pode ser controlada na moldagem por injeção em diversos pontos.

Durante o estágio de plastificação, a rotação do fuso determina a taxa de cisalhamento dentro do cilindro de acordo com a equação (3.3):

$$\dot{\gamma} = \frac{DN_x}{h} \quad (3.3)$$

Onde D é o diâmetro do fuso, N_x é a rotação do fuso e h é a altura dos filetes da rosca do fuso.

A velocidade com que o polímero é injetado no molde também afeta a taxa de cisalhamento. O tamanho da bucha de injeção ou canal de entrada interfere no cisalhamento e variando-se o dimensionamento consegue-se reduzir a viscosidade do polímero antes que este entre na cavidade do molde.

As interações entre o fluxo de escoamento e a superfície do molde na micromoldagem possuem características de escoamento não newtonianas. Geralmente, casos de fluídos não newtonianos podem ser analisados como viscosidade não linear ou viscoelasticidade. Mais especificamente, os fluxos não newtonianos podem ser representados por uma curva de viscosidade não linear da tensão de cisalhamento e da taxa de cisalhamento, que define a dependência de atrito entre as taxas de cisalhamento e deformações visco-elásticas.

Polímeros fundidos não obedecem à relação linear newtoniana entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. Isso porque a curva de viscosidade desenvolve com o aumento da taxa de cisalhamento. A tensão de cisalhamento associada ao escoamento de um fluído não newtoniano pode ser vista como a variação da taxa de cisalhamento da parede para o centro do escoamento do material fundido.

A parte externa do escoamento do polímero quando entra no canal congela-se primeiro formando uma película na camada superficial denominada “*skin*” (visto na seção 3.3.3.9), deixando o núcleo com uma temperatura maior. Este núcleo move-se em direção à área da frente de escoamento de acordo com o fenômeno conhecido como “efeito de fonte”.

O comportamento da viscosidade em função da tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento podem ser expressos matematicamente pela equação 3.4:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3.4)$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento e $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento.

A FIGURA 3. 13 ilustra o comportamento da viscosidade descrita como não linear. Esse gráfico foi obtido na biblioteca de dados do programa Mold Flow adviser 2010[®] do acrílico com aspectos reológicos iguais aos do material usado nos resultados.

FIGURA 3. 14 – Viscosidade do acrílico em função da taxa de cisalhamento para várias temperaturas (Mold Flow insight®).

A diminuição da viscosidade η com o aumento de $\dot{\gamma}$ é um fato que auxilia no preenchimento de finas paredes com alta razão de aspecto. Este efeito é conhecido como cisalhamento fino (shear thinning) (GRIFFITHS et. al. 2007).

As pequenas características normalmente encontradas nas cavidades da micromoldagem podem causar $\dot{\gamma}$ com ordens de magnitude muito maiores do que as que ocorrem na moldagem convencional. O aquecimento por cisalhamento devido às grandes tensões de cisalhamento (τ) resultarão em efeitos grandes na viscosidade (η) e, portanto, η será altamente dependente da velocidade de injeção e da temperatura de injeção e do molde. Por essa razão, η pode ser considerado como função desses três parâmetros do processo.

Para investigar o escoamento dos polímeros em microcavidades é importante entender as interações interfaciais que acontecem. Quando a velocidade na interface da parede é igual a zero pode-se dizer que não há nenhuma condição de contorno no deslizamento.

O escorregamento de líquido-sólido, polímero sólido e interfaces polímero-polímero pode fortemente influenciar o comportamento hidrodinâmico do fluxo em escala micro e nano (GRIFFITHS et. al. 2007).

3.3.3.10 - Peso molecular e grau de polimerização

O peso molecular (M) de um polímero é dependente da massa molar de uma única unidade que se repete (M_0) e o número de repetição das unidades (x) que é dado por:

$$M = M_0 x \quad (3.2)$$

Onde o número de unidades repetidas (x) é o grau de polimerização. Na literatura, é difícil separar os efeitos do grau de polimerização com relação ao peso molecular.

Polímeros com peso molecular grande exibem uma grande temperatura de transição vítrea (Tg) e maior temperatura de fusão (Tm).

Quanto maior o peso molecular, maior será a viscosidade do material fundido de acordo com a medição do Índice de Escoamento do material Fundido IEF:

$$IEF \propto \frac{1}{M} \propto \frac{1}{\eta} \quad (3.3)$$

Onde η é a viscosidade do material fundido.

Entretanto, essa comparação só é verdadeira entre os polímeros com a mesma estrutura. Por exemplo, a relação se aplica para dois polímeros lineares, mas uma cadeia linear e outra ramificada com o mesmo peso molecular terão diferentes IEFs (GIL, 2002).

Polímero com maior peso molecular ou grau de polimerização possui uma longa cadeia espiralada que pode facilmente se aproximar ao tamanho de algumas saliências do molde que são empregadas na microinjeção de precisão. Algumas seções nesses moldes podem ter dimensões da ordem de 1 μm , que é possivelmente o comprimento de uma cadeia polimérica estendida em um plano. Se o escoamento for transversal a esta microcaracterística, é concebível que a molécula do polímero seja estendida devido à orientação do fluxo durante a injeção e, se for resfriada sem tempo para alívio de tensões, o comprimento da molécula que preenche a devida característica poderá afetar a sua dimensão. Isto ocorre principalmente em peças com características estreitas e profundas (alta razão de aspecto). Quanto maior as moléculas, maior será a dificuldade de ocorrer o alívio de tensões no comprimento espiralado durante o resfriamento, aumentando assim as tensões residuais no polímero (GIL, 2002).

Em geral, para a replicação de micro e nano estruturas, polímeros com alto grau de escoamento têm sido usados para obter alta exatidão. Resultados com alto nível de replicação foram obtidos com o uso de PC de alto índice de escoamento com altas temperaturas de fusão e do molde na pesquisa de Murakami, Kotaki e Hamada (2008). Entretanto, os polímeros com alto grau de escoamento possuem baixo peso molecular e, portanto, as propriedades mecânicas e a durabilidade no meio ambiente são inferiores às aquelas apresentadas pelos

polímeros com alto peso molecular. Para efeitos práticos é desejável usar polímeros com alto peso molecular.

3.3.3.11 - Cristalinidade

A cristalinidade nos polímeros é formada por uma fina camada originada da nucleação de alguns pontos formando esferulitas. Os cristais não tendem a formar grandes grãos como ocorre nos metais. Ao invés disso, o que ocorre é a formação randômica de agrupamentos de cristais, que são frequentemente intercalados com regiões amorfas (GIL, 2002).

Polímeros altamente cristalizados podem chegar a 95% de cristalinidade, mas a maioria possui baixas proporções de material cristalizado (GIL, 2002).

Nas moléculas do polímero, a ligação primária ao longo da cadeia principal é muito mais forte do que as ligações secundárias da estrutura cristalina, portanto, as moléculas resistem muito mais a fratura. Adicionalmente, a espessura da estrutura cristalina lamelar reage muito diferente do que acontece nos metais.

A densidade nos polímeros cristalinos é muito maior do que nos amorfos. Isto ocorre devido à eficiência do fator de empacotamento da molécula, fazendo com que o volume específico fique menor quando o polímero está se resfriando. Tal fato poderá causar maior contração nos polímeros semicristalinos em relação aos polímeros amorfos. A diferença nas estruturas cristalinas nas diversas regiões do polímero provocará diferentes resultados de retração podendo causar o empenamento do componente (GIL, 2002).

A contração e o empenamento são extremamente danosos na moldagem de precisão óptica por causa das alterações dimensionais da peça e diferenças no índice de refração (birrefringência) derivadas da variação de densidade nas regiões cristalinas. A interface entre a região cristalina e a região amorfa geralmente dispersa a luz tornando o componente inútil para a aplicação óptica.

Outro fator que a estrutura cristalina influencia é a transparência à luz visível, pois polímeros amorfos ou com baixo grau de cristalinidade possuem grandes valores de transmitância.

O PMMA é um material tipicamente transparente e com alto valor de transmitância, pois possui baixa cristalinidade e, devido à sua estrutura molecular, não possui grupos que absorvem a luz na região visível. Já o PC e o PS possuem anéis benzênicos na sua estrutura, como no grupo de fenila, que absorvem os espectros da luz visível.

3.3.3.12 - Calor específico

O calor específico de um material é a medida de sua capacidade calorífica. Para aquecer o material com alto calor específico será necessária grande quantidade de energia e, inversamente, para resfriá-lo.

Na moldagem por injeção é desejável que se use materiais com alto calor específico, pois durante o processo a energia térmica será mantida fazendo com que a peça fique fundida permitindo o escoamento do polímero para que o molde seja todo preenchido, principalmente nos microcanais. Antagonicamente, o uso da moldagem por injeção requer baixos ciclos, portanto usar material com baixo calor específico poderá acelerar o processo devido ao rápido resfriamento do material no molde.

3.3.3.13 - Coeficiente de transferência térmica

O coeficiente de transferência térmica reflete a taxa na qual a energia térmica é transferida pelo polímero. O polímero que possui alto coeficiente possui baixo gradiente de temperatura ao longo de sua secção e seu resfriamento é praticamente uniforme no molde fazendo com que a peça produzida tenha baixo nível de tensão residual e empenamento. A maioria dos polímeros são bons isolantes térmicos. Por este motivo, a secção do fuso faz com que o polímero se misture mecanicamente com o objetivo de uniformizar o calor por todo o seu volume para evitar que se formem gradientes de temperatura durante o processo (GIL, 2002).

3.3.3.14 - Módulo de elasticidade

Polímeros com grande cristalinidade geralmente possuem grande resistência (maior módulo de elasticidade E) em relação ao polímero amorfo. Valores típicos de E são reportados por MARK (2007), no qual, os elastômeros possuem $E=10^6$ Pa, vidros da ordem de $E=10^9$ Pa (amorfo) e polímeros cristalinos $E=10^{11}$ Pa medidos paralelamente na direção da

cadeia principal. Polímeros com alto módulo de elasticidade possuem pouca capacidade de preenchimento dos micros canais nos moldes de precisão.

Yoshii, Kuramoto e Ochiai (1998) mostram graficamente, a importância do módulo de elasticidade no processo de injeção e concluem, que o módulo de elasticidade também influencia no fator de preenchimento, ou seja, quanto maior o módulo de elasticidade, menor será a penetração de injeção.

3.3.4 - Análise geral sobre os parâmetros e propriedades na microinjeção

De acordo com a revisão bibliográfica acima, muitos autores reportam diversas conclusões a respeito dos parâmetros e propriedades dos materiais poliméricos na microinjeção. Alguns afirmam que o aumento da temperatura do molde e da velocidade de injeção melhora a replicação das peças. Entretanto, a quantidade de dados que existe em relação à influência da temperatura do molde e da velocidade de injeção na replicação é limitada. Por outro lado, altas temperaturas do molde podem danificar suas microcaracterísticas e, além disso, o tempo de ciclo será muito alto. É possível verificar ainda que alguns cientistas defendem o uso do “*overpacking*”, enquanto outros rejeitam tal técnica.

Alguns autores dizem que grandes velocidades de injeção podem gerar péssimo acabamento superficial, enquanto outros dizem que se essa taxa for baixa, a fidelidade será comprometida.

Como descrito acima, alguns pontos dentre as diversas linhas de pensamento dos autores se divergem. Devido à falta de congruência dessas investigações, será necessário pesquisar os efeitos da replicação para os μ EODs manufaturados neste trabalho.

Portanto, obter dados quantitativos é de extrema importância na construção dos μ EODs e faz parte desta pesquisa correlacionar os parâmetros do processo com a qualidade da replicação, de modo que a micromoldagem por injeção das peças que possuam microcaracterísticas seja otimizada.

3.3.5 – Simulação

O principal objetivo de qualquer tipo de simulação é antecipar possíveis problemas para uma fase inicial do desenvolvimento de uma peça, onde a modificação do projeto ainda representa pouco investimento e nenhum atraso na data de lançamento do produto. A

simulação também permite que a prática da "tentativa e erro" seja substituída pelo desenvolvimento de produtos através da aplicação dos fundamentos, teorias e modelos que representam o problema. Isso é a utilização do que se aprende nas Ciências e Engenharia para otimizar o que é produzido, reduzir custos e aumentar qualidade.

Com o uso da simulação é possível que um profissional com pouca vivência na área de injeção, mas com uma boa fundamentação sobre os aspectos que envolvem o processo, possa desenvolver produtos de qualidade e ganhar uma experiência importante sobre a sensibilidade do processo aos fatores envolvidos, sem a necessidade de vivenciar inúmeros problemas e dificuldades (AKIKO,2001).

A análise computacional do processo de injeção de termoplásticos tornou-se uma ferramenta amplamente aceita pela indústria de plásticos e um importante auxiliar no projeto de peças e moldes na otimização dos processos de injeção. Os constantes avanços desses softwares de projeto têm um grande impacto no desenvolvimento de produtos.

Atualmente, a otimização através da simulação tem sido uma exigência de várias empresas do ramo automotivo e eletroeletrônico para com seus fornecedores de peças plásticas e moldes. Isso porque a simulação tem sido entendida como ferramenta fundamental para redução de custos e prazos de desenvolvimento. Ela permite ainda aos projetistas criarem formas complexas que eram inatingíveis alguns anos atrás. A velocidade no desenvolvimento e modificação de produtos permite, às empresas, a alteração de características visando conquistar novos mercados, o que é importante, especialmente em uma economia global, onde a diferenciação dos produtos é a melhor forma para evitar a competição dos preços (AKIKO,2001).

Conforme visto na equação 3.4, a viscosidade é definida pela razão da tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento.

Para fluídos newtonianos o modelo de viscosidade é independente da taxa de cisalhamento. Entretanto, como dito anteriormente, os polímeros não são newtonianos e a viscosidade fica em função de τ e $\dot{\gamma}$.

O montante de calor liberado durante o cisalhamento do polímero é determinado pelo produto da η e $\dot{\gamma}$. Particularmente, quanto maior a viscosidade e a taxa de cisalhamento, maior será o calor liberado. Outra consequência do aumento da taxa de cisalhamento é que as cadeias próximas à parede se alinharão na direção do fluxo, como mostra a FIGURA 3. 15, região 2. Este desembaraço reduzirá a viscosidade. Portanto, haverá duas regiões distintas de viscosidade de cisalhamento na seção transversal do escoamento. A primeira, no centro, é chamada de região com viscosidade de cisalhamento zero η_0 que possui menor dependência

da taxa de cisalhamento e a outra região se concentra na parede do molde conhecida como região de viscosidade interfacial (GRIFFITHS et. al., 2008).

FIGURA 3. 15 – Perfil da velocidade e da frente de fluxo do escoamento do material fundido (GRIFFITHS et. al., 2008).

Os modelos de análise por elementos finitos são extensivamente usados nos processos de replicação na macroescala, entretanto diversos autores reportam os avanços significativos neste campo que ocorreram nas últimas duas décadas (GRIFFITHS et. al., 2008).

Embora os modelos de simulação sejam baseados no efeito da viscosidade polimérica levando em conta os parâmetros da taxa de cisalhamento, pressão e temperatura, eles são considerados ainda insuficientes para analisar efeitos na escala micrométrica, não levando em conta ainda aspectos como o acabamento superficial do molde (GRIFFITHS et. al., 2008).

Neste trabalho, primeiramente o projeto foi construído em CAD e importado para o software de análises de elementos finitos para injeção Mold Flow Adviser e Insight 2010® para a construção da malha ajustando os nós e elementos de forma a obter os melhores resultados do modelo da superfície de contorno, conforme FIGURA 3. 16, onde as malhas foram geradas na microlente de Fresnel com altura constante de 10 μm .

FIGURA 3. 16 – Projeto construído em CAD de uma lente de Fresnel com a geração de malhas feita no programa Mold Flow 2010®.

Para obter resultados próximos à realidade, todos os testes de simulação foram realizados no domínio tridimensional, pois, segundo Griffiths et. al. (2008), resultados obtidos no domínio bidimensional possuem menor exatidão quando comparados com valores experimentais obtidos pelos pesquisadores.

Variando-se os parâmetros, serão executados diversos modelos de simulação numérica no CAE, para investigar o comportamento do microescoamento do PMMA – DH ECL P, comparando os resultados obtidos experimentalmente.

Nesta pesquisa o sistema de análise por elementos finitos (CAE) será usado para verificar os efeitos dos parâmetros na microinjeção com atenção especial para o escoamento no preenchimento dos microcanais, baseando-se no comportamento do escoamento do polímero fundido, correlacionando os resultados de simulação numérica executada no programa Mold Flow 2010® com os resultados experimentais obtidos. Para isso, foi gerada uma malha com 21706 elementos para garantir a exatidão dos resultados.

O intuito é obter conclusões sobre a exatidão e sensibilidade do software na predição da moldagem de microcaracterísticas de acordo com o modelo simulado proposto.

Capítulo 4 – Metrologia

A metrologia é um item que frequentemente é esquecido ou considerado o último estágio no ciclo do desenvolvimento do produto.

Entretanto, a metrologia é uma disciplina chave na indústria, tornando possível a produção de peças manufaturadas. A metrologia permite o controle do processo com base em medidas definidas no projeto dos componentes ou para alguma característica de um processo específico.

O princípio da metrologia é muito mais que uma sala cheia de equipamentos de medição e conhecimento de como usá-los. Metrologia é uma disciplina, assim como o projeto de lentes ou moldes (BÄUMER, 2005).

O ambiente tradicional de metrologia dimensional na manufatura é elemento fundamental para que a qualidade do sistema seja garantida, e as ferramentas disponíveis em termos de instrumentação, artefatos para calibração, normas, assim como procedimentos estabelecidos, facilitam o aumento da demanda na rede global da produção de produtos com alta qualidade e complexidade.

Para obter boas medidas é necessário o completo entendimento do produto (e a sua função) e estar familiarizado com o estado da arte das tecnologias de medida e equipamentos.

Há várias tarefas que devem ser seguidas na caracterização dos materiais ópticos moldados por injeção, no que diz respeito à metrologia. Primeiro, o molde ou inserto deve ser medido. Partindo do princípio que isto é a base para a produção, normalmente faz-se a metrologia dimensional de modo a obter um valor com alta exatidão (BÄUMER, 2005).

Segundo, o produto moldado também deve ser medido. A moldagem por injeção é uma tecnologia de produção em massa, o que gera grande volume de produção. Para obter um

plano bom de metrologia, o projetista ou o moldador deve possuir conhecimento e experiência no comportamento de retração do material que está sendo usado (BÄUMER, 2005).

A integração de sistemas com características em microescala e componentes com macro, meso ou nano escala impulsionam todas as tecnologias ao limite de sua capacidade, causando enormes problemas para assegurar a qualidade e controle desses dispositivos.

Para realizar testes de medidas em microlentes, primeiramente, é essencial medir a geometria do perfil superficial construído. Além disso, outros parâmetros paraxiais, tais como distância focal ou propriedades mais complexas como as aberrações de onda e qualidade superficial, devem ser medidos. Para arranjos de microlentes, a uniformidade e repetibilidade das lentes e seu posicionamento exato também são importantes aspectos a serem verificados.

Mesmo as lentes feitas com grande precisão e com boa correção de aberração esférica são sujeitas a certas limitações no desempenho que devem ser entendidas para melhor atender ao projeto de um propósito particular. MILLER; McLEOD; SHERWOOD (1951) produziram várias lentes com erros de aberrações esféricas, astigmatismo e coma. Estes erros são comuns até mesmo nos dias atuais na produção de lentes, pois vários autores relatam em seus experimentos o aparecimento de tais fenômenos.

Pode-se dizer que esses erros são provocados pelas ferramentas que produzem o molde, tensões superficiais durante a moldagem e a retração volumétrica causada pelo polímero.

De acordo com estudos prévios, a exatidão com que uma superfície óptica pode ser moldada é principalmente influenciada pelas tensões superficiais, nos cantos e arestas, onde a razão da área superficial/volume é muito alta e, devido a este fato, a tensão superficial gerada nos microcomponentes causará a retração não uniforme ou empenamento.

Para peças genéricas a metrologia pode ser genérica. Por exemplo, a lente colimadora para uso nas unidades de leitura de CDs ou DVDs. Este tipo de lente pode ser caracterizada usando interferometria padrão. Entretanto, se adicionar funções como separação de feixe de luz e formatação do feixe, a metrologia deverá ser customizada no sentido de atender às funções da peça (BÄUMER, 2005).

Para se obter um sistema óptico de alto desempenho, valores razoáveis de tolerância devem ser escolhidos.

Bäumer (2005) mostra quatro níveis de valores típicos de tolerância apontados na TABELA 4. 1, tais sejam, baixo custo, comercial, estado da arte e tolerância extremamente apertada.

TABELA 4. 1 - Tolerâncias e especificações para peças ópticas moldadas por injeção (BÄUMER, 2005).

Atributos da Lente Tolerâncias (unidades)	Baixo custo	Comercial	Estado da arte	Tolerância Extremamente apertada
Comprimento Focal (%)	±3-5	±2-3	±0,5-1	±0,5
Raio de curvatura da superfície(%)	±3-5	±2-3	±0,8-1,5	±0,3
Potência (franjas)	10-6	5-2	1-0,5	
Irregularidade (franjas/10mm)	2,4-4	0,8-2,4	0,8-1,2	
Riscos/sulcos	80/50	60/40	40/20	
Centralização	±3'	±2'	±1'	
Espessura do centro (mm)	±0,1	±0,05	±0,01	±0,015
Diâmetro do flange (mm)	±0,1	±0,05	±0,005/Ø10	±0,015
Deslocamento radial (mm)	0,1	0,05	0,02	
Repetibilidade (%)	1-2	0,5-1	0,3-0,5	
Razão (diâmetro/espessura)	2:1	3:1	5:1	
Bolhas e inclusões (ISO 10110-3)		1x0,16	1x0,10	1x0,06
Imperfeições superficiais (ISO 10110-6)		2x0,10	2x0,06	2x0,04
Aberração de ondas superficiais (nm RMS)		60	30	15
Rugosidade superficial (nm _{rms})	10	5	2	

4.1 - Rugosidade superficial

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

- **A rugosidade de pico-a-vale (Rt):** pois a altura relativa da microtopografia é mais representativa para o acabamento superficial 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 aumentando o desgaste, acumulando fragmentos e danificando superfícies de deslizamento. Em uma pesquisa realizada pelo CIRP com 284 indústrias em 18 países, constatou-se que esse parâmetro é usado por 40% das companhias (DE CHIFFRE et al., 2000).

- **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 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). Em uma pesquisa realizada pelo CIRP com 284 indústrias em 18 países, mostrou-se que este parâmetro é usado por 92% das companhias (DE CHIFFRE et al., 2000).
- **Rugosidade média quadrática (R_q ou RMS):** possui o efeito de aumentar os valores causados devido aos picos únicos ou ocasionais que aparecem em uma superfície, diferenciando superfícies muito lisas de outras similares que possuem pequenas marcas ou defeitos. Para trabalhos estatísticos, este parâmetro é mais significativo do que a média aritmética R_a . É mais usado na indústria óptica e eletrônica devido à sua habilidade de detectar picos aleatórios.

4.2 – Metrologia típica usada na caracterização dos μ EODs

4.2.1 - Metrologia dimensional e perfilometria de contato

A ferramenta mais apropriada para obter a metrologia dimensional é o medidor tridimensional de coordenadas. Com este equipamento é possível medir todas as dimensões geométricas com exatidão de 0,1 μ m da peça a ser medida (BÄUMER, 2005).

Entretanto, para óptica de precisão, referido aparelho possui baixa resolução de medida.

O perfilômetro de contato é o método mais clássico de medir perfis superficiais. O mais usado e mais conhecido é o “*Form Talysurf of Taylor Hobson*”, que possui uma agulha

de diamante muito fina. A ponta é levada à peça de teste e percorre toda a sua superfície linearmente.

Na perfilometria de contato, um braço com uma agulha de diamante percorre uma superfície com velocidade constante, e um sinal elétrico é produzido por meio de um transdutor. Este tipo de equipamento pode gerar resultados com alta exatidão em laboratórios e nos ambientes industriais, cobrindo faixas de medidas verticais de até alguns milímetros com resolução na faixa nanométrica e possibilidade de varredura lateral em torno de centenas de milímetros. A ponta de diamante possui angulação cônica de 60° ou 90° e raio de ponta na faixa de 1-10 μm . A máxima inclinação detectável usando a ponta de diamante é de 60° ou 45°.

A resolução espacial obtida é geralmente de 2-20 μm , sendo limitada pela geometria da ponta da ferramenta, dependendo também da verdadeira inclinação da superfície e altura dos picos aos arredores do ponto de contato. Outra desvantagem é a força aplicada pela ponta diamantada, que provoca deformações plásticas na superfície tornando o método inaplicável em superfícies macias ou onde leves arranhões não são permitidos, ou seja, no caso da fabricação dos molde dos μEODs .

A vantagem desse método é que diversos tipos de superfícies inclinadas podem ser analisadas (an esféricas, esféricas ou aleatórias), o que não é possível nos perfilômetros ópticos.

A desvantagem desse processo é o tempo de medida e o fato de ter contato entre a agulha e a amostra. Embora as forças, durante a medida, estejam na escala de milinewtons, ocorrem arranhões visíveis na área de amostragem. Para a caracterização das microlentes isto não é problema, pois a fabricação é realizada em grande volume. Entretanto, a caracterização do inserto torna-se mais crítica.

Tal problema pode ser resolvido usando o perfilômetro óptico.

Outra desvantagem da medição mecânica é a reprodução do perfil em apenas duas dimensões, enquanto na perfilometria óptica, a medida em 3D pode ser obtida instantaneamente.

4.2.2 – Metrologia óptica

A interferometria de superfície pode ser construída nas configurações de Michelson e Fizeau. A resolução desses dispositivos pode ser da ordem sub μm ou sub nm (HANSEN et. al., 2006).

Pode ser usado em espelhos macroscópicos (100 mm até metros no diâmetro), onde o desvio de forma (planicidade, esfericidade, parabolicidade, etc) é calibrado com incerteza sub nanométrica (HANSEN et. al., 2006).

O microscópio interferométrico pode obter resoluções sub-nm na direção de propagação do feixe, entretanto, se for necessário resolução na direção lateral x e y, os métodos de detecção óptica fracassam devido ao limite de difração do equipamento.

Técnicas de escaneamento óptico englobam os perfilômetros ópticos, microscópio confocal e interferômetros. Os métodos ópticos permitem realizar análises sem contato, tornando possível seu uso em superfícies macias. Entretanto, este tipo de instrumento está sujeito a erros de medidas quando seu uso é feito em superfícies lustrosas ou transparentes à luz. Tais métodos ópticos possibilitam medidas rápidas sem contato em superfícies planas.

Métodos interferométricos oferecem grande faixa de resolução vertical que vai desde a escala subnanométrica, sendo empregadas em superfícies com rugosidade média abaixo de 0,1 nm até alturas de pico-a-vale em torno de alguns milímetros.

A limitação dos microscópios interferométricos está relacionada com a inclinação da superfície. A máxima inclinação detectável usando a interferometria é de 30° .

O uso do perfilômetro óptico sem contato permite determinar com exatidão o diâmetro de abertura da lente e a sua sagita. Adicionalmente, é possível medir também a rugosidade superficial no topo das microlentes, por isso seu uso foi intensivo neste trabalho.

Outras grandes vantagens da metrologia óptica são a rapidez e o fato de não ser de contato, ou seja, não causa danos à peça.

A tecnologia mais aplicada para caracterização dos componentes ópticos é a interferometria. Passados 30 anos, grandes avanços ocorreram fazendo com que esta técnica alcançasse níveis industriais.

Embora mencionada técnica seja de alta exatidão, o instrumento não garante medidas perfeitas. O que irá assegurar boas medidas são as condições de contorno, tais como

configuração, manuseio e conhecimento do operador, que deve ser de alto nível (BÄUMER, 2005).

Existem diversos tipos de interferômetro, sendo os mais conhecidos de Fizeau, Michelson e Twyman-Green. Nesta revisão não serão abordados profundamente os tipos de interferômetros, portanto, para informações mais detalhadas consultar Slocum (1992).

Para caracterizar o componente óptico injetado, a interferometria poderá ser usada em diversas configurações, de acordo com a FIGURA 4. 1. As configurações básicas são:

- **Configuração para superfície plana:** Quando uma superfície plana precisa ser testada um espelho plano é usado na configuração do interferômetro (FIGURA 4. 1 (a)). A amostra testada é colocada no interferômetro e depois é realizada a medida do formato da superfície plana.
- **Superfícies curvas:** Se uma superfície curva precisa ser inspecionada, será necessário inserir uma objetiva com alta qualidade no caminho da medida com o objetivo de se obter uma frente de onda curva que será refletida na superfície curva da peça a ser testada. O foco da lente auxiliar é feito de forma a coincidir com o centro de curvatura da amostra. Nesta configuração pode-se medir superfícies côncavas e convexas (FIGURA 4. 1 (b) e (c)).

FIGURA 4. 1 – Diferentes configurações interferométricas para medidas das lentes (a) plano (b) côncavo (c) convexo (BÄUMER, 2005).

Devido aos motivos apresentados na FIGURA 4. 1 (b) e (c), ocorreram dificuldades muito grandes para realizar as medidas dos arranjos de microlentes esféricas. Como o raio de

curvatura do elemento óptico é muito pequeno, as extremidades da lente possuem inclinações muito severas. Portanto, como não estavam disponíveis objetivas com o mesmo raio de curvatura das microlentes, os raios da frente de onda emitidos pelo aparelho se perderam com facilidade dificultando as medidas nesse tipo de arranjo.

4.2.3 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um método de microscopia existente há varias décadas.

Neste tipo de instrumento a área a ser examinada ou o microvolume a ser analisado é baseado na irradiação de um feixe de elétron sobre uma amostra focada em uma área específica, o qual pode ser estático ou em movimento rápido (varredura) através da superfície do espécime (GOLDSTEIN et al., 1992).

A interação entre o feixe e a superfície da amostra conduz a diversas emissões que podem ser detectadas e usadas para caracterizar as propriedades físicas e químicas da amostra investigada, podendo-se também obter a sua imagem topográfica. No que diz respeito à topografia, o MEV possui propriedades particulares que combinadas não se encontram em nenhuma outra técnica de microscopia. Isso inclui: ampliações da ordem de 100x até 100.000X, e resolução abaixo de 2nm (para as maiores ampliações), ampla profundidade de campo sem perder o foco, grande distância de trabalho (permite múltiplo posicionamento nas medidas), capacidade de análise elementar e efeito mínimo de difração.

Dentre as desvantagens em relação à microscopia óptica podem-se citar: necessidade de uso de câmara com vácuo, necessidade de superfícies metalizadas para ocorrer a interação com o feixe de elétron e também sua baixa taxa de transferência de dados para armazenamento. Outra desvantagem é sua visualização bidimensional. Embora a profundidade de campo visual seja grande nesta técnica, ainda é difícil obter medida de altura de picos ou vales em microestruturas.

O princípio de funcionamento desta microscopia pode ser visto na FIGURA 4. 2.

FIGURA 4. 2 – Princípio de funcionamento do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) (HANSEN et. al., 2006).

Neste trabalho, o M.E.V. auxiliou na caracterização das superfícies usinadas das lentes de Fresnel e arranjos de microlentes esféricas e suas devidas replicações. Apoiou também no estudo da caracterização das ferramentas com ponta única de diamante e fresas de metal duro, ambas novas e desgastadas, provenientes do torneamento para observar suas dimensões e morfologias.

4.2.4 - Microscopia de Varredura por Sonda Mecânica (SPM)

A microscopia de varredura por sonda mecânica inclui a microscopia de varredura por tunelamento (STMs), microscopia de força atômica (AFMs), microscopia de força magnética e outros. Estas ferramentas são muito poderosas para aquisição de dados de topografia nonométrica em superfícies finas.

A técnica faz uso de uma sonda mecânica na ponta sobre uma superfície com um espaçamento muito pequeno entre esta e a amostra analisada. SPM permite medidas nas superfícies com áreas de medidas em torno de $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$, sendo uma microscopia com

resolução limitada às superfícies de $2\frac{1}{2}$ D. A resolução vertical é de 0,1nm, enquanto as resoluções laterais para o AFM estão em torno de 2 a 10 nm podendo ser atômico.

Nesta técnica a amostra precisa de pouca preparação.

Embora existam diversas técnicas baseadas nas forças de campo, em todas o mecanismo de varredura é baseado nos efeitos piroelétricos que permitem o posicionamento dentro de frações de nanômetros. Consequentemente, medidas realizadas com técnicas SPMs possuem deficiências intrínsecas, tais como histerese e rastejamento (efeitos de “*stick slip*”). Isto conduz ao uso de técnicas de correção baseada nos sensores capacitivos, assim como *softwares* especializados de calibração.

Outra característica dessa técnica é ser um ensaio não destrutivo, podendo ser usado em metais, semicondutores, não metais e até mesmo em amostras biológicas.

4.3 - Seleção da metrologia dimensional usada nos μ EODs

Considerações gerais sobre a capacidade de medida dos instrumentos apresentados acima podem ser resumidas na TABELA 4. 2.

TABELA 4. 2 – Microtopografia superficial dos instrumentos e seu uso em micro e nano metrologia (HANSEN et. al., 2006).

Princípios	Ponta de diamante	Interferometria com luz branca	Microscópio Confocal	Microscopia de varredura por sonda mecânica
Méritos	Longa faixa de medida (x,y e z).	Medida rápida. Alta resolução vertical (subnm)	Estruturas com alta razão de aspecto. Inclinação máxima detectável 75°	Resolução nanométrica.
Limitações	Contato Mecânico. Geometria da Ponta	Resolução lateral limitada. Inclinação máxima detectável 30°	Resolução lateral e vertical limitada	Tempo de medida lenta. Pequena faixa de medida (x,y e z).
Aplicação	Superfícies industriais.	Rugosidade de superfícies planas. Espessuras de filmes. EODs com baixa razão de aspecto.	EODs com alta razão de aspecto	Medidas nanométricas

Para ilustrar melhor esta classificação, a FIGURA 4. 3 mostra as técnicas de medida com relação às dimensões laterais e verticais da peça a ser mensurada.

FIGURA 4. 3 – Diferentes técnicas de metrologia para tamanhos específicos de altura e comprimentos laterais (HANSEN et. al., 2006).

Para estabelecer fidelidade e confiabilidade nos resultados de medidas obtidos, conforme visto na TABELA 4. 1 e FIGURA 4. 3, selecionar os instrumentos de metrologia neste trabalho se tornou um procedimento de extrema importância para o procedimento de caracterização dos μ EODs fabricados na presente tese. Combinar dispositivos que possuem escalas que se iniciam na faixa atômica da ordem de 0,1nm até 100nm, até escalas onde a mecânica contínua termina foi um verdadeiro desafio que fez parte deste trabalho.

Como visto na FIGURA 4. 3, selecionando equipamentos de perfilometria óptica em conjunto com o uso do MEV será atendida uma ampla faixa de resolução vertical mais uma ampla faixa de resolução horizontal, pois, conforme será visto no capítulo de materiais e métodos, temos, neste trabalho, μ EODs produzidos com dimensões que, de acordo com seus projetos, possuem valores de altura que variam na faixa de 930 nm até 465 μ m e resolução lateral da ordem de 195 μ m variando até o tamanho de um arranjo de microlentes completo, que seria de 10mm x 10mm ou até mesmo resoluções laterais maiores, como no caso da lente de Fresnel completa que possui 24mm de abertura total.

Portanto, combinar escalas de acabamento superficial na faixa atômica ou nanométrica com resoluções verticais na escala micrométrica e resoluções laterais na escala macrométrica

configuram o uso combinado da metrologia macroscópica com microscópica e nanoscópica, justificando o uso dos dispositivos de medida supracitados.

4.4 – Análise e metrologia paraxial das microlentes

4.4.1 – Transparência e transmitância da luz

A transparência é quantitativamente expressa pela *transmitância*, que é a razão entre a quantidade de luz que atravessa o meio e a quantidade de luz que incide ortogonalmente à superfície. Os plásticos podem alcançar até 92%. A quantidade de luz restante é refletida à superfície ou absorvida dentro do material transparente. A presença de inclusões muito pequenas ou de cristalitos torna o material semitransparente, pois essas partículas atuam espalhando a luz. Materiais poliméricos muito cristalinos tornam-se translúcidos ou opacos. A determinação da transmitância é feita pelos métodos ASTM 1746 e D 1003, sendo medida em porcentagem (MANO, 1991).

A transparência do polímero é intimamente ligada à sua estrutura molecular. Várias interações interatômicas e intermoleculares causam a absorção da luz quando o plástico é exposto à luz na região ultravioleta, devido às transições eletrônicas. Também pode ocorrer absorção na região infravermelha em virtude das transições vibracionais. A absorção na região infravermelha não afeta a região visível. A absorção devido às transições eletrônicas α_e é calculada segundo a regra de Urbach:

$$\alpha_e = A \exp \frac{B}{\lambda} \quad (4.1)$$

Onde A e B são inerentes a cada molécula e λ é o comprimento de onda óptica. Bäumer (2005) reporta que para o comprimento de onda $\lambda = 500$ nm a absorção α_e do PMMA é <1dB/km, enquanto o poliestireno é de 98 dB/km para a equação (4.1). O valor de α_e se torna grande quando o polímero possui anéis benzênicos na sua estrutura, como no grupo de fenila, onde são encontrados os policarbonatos e poliestirenos (BÄUMER, 2005).

As impurezas podem afetar o polímero na sua transmitância. Na maioria dos plásticos são adicionados antioxidantes, plastificantes, absorvedores de radiação ultravioleta, pigmentos

ou agentes coloridos. Pequenas quantidades desses produtos podem colorir o polímero causando perda na transmitância (BÄUMER, 2005).

A FIGURA 4. 4 mostra a comparação dos dados de transmitância numa faixa de comprimentos de onda para o PMMA, PC e COP.

FIGURA 4. 4 - Comparação da transmitância da luz entre o PMMA, PC e COP (BÄUMER, 2005).

O PMMA é um material tipicamente transparente devido a sua estrutura molecular que não possui grupos que absorvem a luz na região visível. Por tal motivo, o acrílico é o material óptico que possui os melhores índices de transmitância entre os polímeros e este fato foi levado em consideração para a decisão de sua escolha neste trabalho.

Testes foram feitos para avaliar o índice de transmitância do PMMA usado neste trabalho.

4.4.2 – Função Transferência de Modulação (FTM)

A nitidez de um sistema de imagem fotográfica ou de um componente do sistema (lentes, filmes, sensor de imagem, scanner, ampliação da lente, etc) é caracterizada por um parâmetro chamado Função Transferência de Modulação (FTM), também conhecido como resposta de frequência espacial.

As objetivas de microscópio devem possuir ótimo desempenho de imagem. Em uma tendência paralela existem dois segmentos, o primeiro com usuários de objetivas em microscópios que estão preocupados com o desempenho subjetivo nas lentes, apenas clareamento de imagem, enquanto no segundo estão aqueles usuários preocupados com a habilidade para resolver uma estrutura particular, que engloba medidas objetivas e desempenho da lente, tais como a função de transferência da modulação (FTM) (DOMENICALI; FANTONE, 2009).

O significado essencial de FTM é bastante simples. Suponha uma onda que tenha um padrão consistente de um tom puro (por exemplo a onda senoidal). Em frequências onde a FTM de um sistema de imagem ou de um componente (lente, filme, etc.) é de 100%, isto significa que não ocorreu a atenuação do padrão, ou seja, o contraste se manteve em sua totalidade. Na frequência, onde o $FTM = 50\%$, indica que o contraste ficou com a metade do valor original de contrapartida, e assim por diante nos demais exemplos.

Para entender melhor como se procede a análise de FTM deve-se observar o exemplo do diagrama da FIGURA 4. 5 (a), que mostra os níveis de contraste com valores que variam de 100% até 2% para um padrão de frequência variável senoidal. Nessa imagem, tem-se claramente exibido que o contraste é moderadamente atenuado para $FTM = 50\%$ e severamente atenuado para $FTM = 10\%$ ou menores.

Na FIGURA 4. 5 (b), tem-se na primeira linha o exemplo da emissão de um sinal padrão em barra das bandas originais, que são formadas por pares de linha brancas e escuras, variando-se em uma frequência que vai desde as mais baixas, de 2 pares de linhas por mm (lp/mm), até as frequências mais altas de 200 (lp/mm) no plano da imagem. Abaixo da primeira linha, podem ser visualizados os efeitos cumulativos de atenuação de um filme, depois, os efeitos de atenuação de uma lente e, posteriormente, o efeito cumulativo da soma de ambos, lente + filme. Todos os resultados foram baseados em modelos computacionais com alta exatidão e os dados publicados por Koren (2007).

FIGURA 4. 5 – (a) FTM em função da frequência espacial de linhas pares /mm (b) Padrão de bandas: originais, após passar por um filme fotográfico, após passar por uma lente e após passar pela lente e o filme fotográfico (KOREN, 2007).

Para exemplificar o desempenho de uma lente, a FIGURA 4. 6 mostra a curva FTM comparando duas lentes hipotéticas. Ambas iniciam com frequência zero (dc) valor 1,0, e cruzam o eixo zero quando não podem mais resolver os dados naquela frequência de corte. Ambas as lentes possuem limites de difração e, conseqüentemente, no tamanho de abertura. Em qualquer evento, supõe-se que são acopladas a um detector que possui uma frequência de corte como indicado no diagrama da FIGURA 4. 6. Apesar do fato de que a lente 1 possui maior limite de resolução, a lente 2 certamente promoverá melhor performance quando acoplada em um detector (HETCH, 1974).

FIGURA 4. 6 – Modulação versus frequência espacial para duas lentes (HECHT, 1974).

Baseado nesse fato deve-se apontar que se um objeto quadrado promove um sinal de entrada que serão várias séries de pulsos quadrados, o contraste na imagem será, na verdade, a superposição das variações do contraste devido à constituinte dos componentes de Fourier.

Para isso deve-se pensar que o “*funcionamento dos elementos ópticos como operadores lineares transformam uma entrada senoidal em uma saída senoidal que não sofre distorções*” (HECHT, 1974). Apesar disso, a distribuição da irradiação de entrada e a saída,

como regra, não serão sempre idênticas (FIGURA 4. 7 (a)). Por exemplo, um sistema de ampliação afeta a frequência espacial de saída. Difração e aberração reduzem a amplitude senoidal (contraste FIGURA 4. 7 (b)). Finalmente, aberrações assimétricas (coma) e centragem mal feita dos elementos produzem uma mudança na posição de saída senoidal correspondente a introdução da mudança de fase, conforme FIGURA 4. 7 (c).

FIGURA 4. 7 – Entrada harmônica e resultado da saída (HECHT, 1974).

Portanto, FTM se tornou o meio mais usado para especificar o desempenho de todos os tipos de lentes e sistemas ópticos. Além disso, o FTM possui a vantagem de que, para cada componente individual independente de um sistema conhecido, o FTM total será frequentemente o seu produto. Isto não é aplicável a lentes em cascata, desde que as aberrações em uma lente possam compensar as de outras lentes alinhadas com esta, e por esta razão não se tornam independentes. Portanto, no exemplo da FIGURA 4. 5 (b), se fotografarmos um objeto que possui modulação de 0,30 em 30 ciclos por mm, usando uma câmera cujas lentes são próprias para uma configuração de FTM de 0,5 para 30 ciclos/mm e usar um filme com $FTM=0,4$ para 30 ciclos/mm, a modulação da totalidade da imagem será $0,3 \times 0,5 \times 0,4 = 0,06$.

Segundo o fabricante de lentes LEICA[®], para uma qualidade ótima (baseado no olho humano e no filme 35mm) a lente deve desempenhar acima de 50% em 20 lp/mm para uma impressão 13x18cm. Para uma excelente impressão em 30x40cm são necessários acima de 63% a 70 lp/mm. No entanto, para tais fabricantes quase nenhuma lente é capaz de desempenhar dessa forma (RIOLEICA, 2010).

A TABELA 4. 3 mostra alguns exemplos de lentes comerciais e pesquisadas na literatura para servir de referência nos dados deste trabalho.

TABELA 4. 3 – FTM de lentes comerciais e encontradas na literuatura.

Fabricante / Lente	Fonte/FTM	40 lp/mm	50 lp/mm	60 lp/mm	70 lp/mm	80 lp/mm
Lente Padrão	Lente padrão para calibração, que acompanha estação de testes	-	90%	77%	75%	70%
Canon [®] / 28-70 mm f/2.8L	Koren (2007)	70%	-	-	-	
Silva / 112mm e 106 mm	Silva (2002)	-	30%	27%	23%	20%
IFSC / Lente de Vidro	Oficina de óptica do IFSC		72%	68%	63%	58%

4.4.3 - Interferograma

Outra análise que pode ser realizada por meio da interferometria óptica é aquela concretizada com o uso de interferograma com franjas para investigar aberrações das microlentes manufaturadas.

Os interferogramas consistem em padrões de franjas resultantes da interferência entre frentes de onda provenientes da superfície do objeto em instantes diferentes. A distribuição de fase desses padrões corresponde normalmente ao campo de deslocamento sofrido pelo objeto.

Na FIGURA 4. 8 (a), tem-se o interferograma padrão para o comportamento de uma lente com sua estrutura nominal esférica e a FIGURA 4. 8 (b) mostra o interferograma de uma lente com aberração de coma.

Segundo Bäumer (2005) é possível avaliar até 70% da frente de onda transmitida por um interferograma. Para análises mais precisas deve-se usar a técnica de análise de frente de onda de Shack–Hartmann.

FIGURA 4. 8 – Interferograma (a) lente nominal (b) lente com aberração de coma (BÄUMER, 2005).

A aberração de coma é similar à aberração esférica (citada anteriormente), exceto pela incidência de luz, que agora é fora do eixo óptico. Devido ao fato da luz ser fora de eixo, os pontos focais que passam pela lente em diferentes raios focam em diferentes pontos em posições fora de eixo. Outra descrição do coma é que diferentes zonas de abertura (raio da lente) possuem diferentes ampliações. A FIGURA 4. 9 mostra um raio com perfil de feixe circular, a luz passa pela lente e a imagem com formato de coma é mostrada no plano da imagem.

FIGURA 4. 9 – Projeção da luz com coma (SMITH, 2000).

Portanto, serão analisados os interferogramas por meio do interferômetro óptico dos moldes e réplicas produzidos por diferentes técnicas de manufatura, com a finalidade de determinar o método de produção dos μ EODs mais eficiente com menores índices de aberrações.

Capítulo 5 - Materiais e Métodos

5.1 - Material para fabricação dos insertos

5.1.1 – Insertos de cobre

Conforme visto na revisão bibliográfica, o material selecionado para a fabricação dos insertos móveis foi o cobre eletrolítico, que também é chamado de C11000. Este material possui controle de oxigênio em sua fundição (0,04% de O₂) e 99,9 % de cobre (AMERICAN SOCIETY FOR METALS ASM, 1998). No ANEXO A está o laudo fornecido pelo distribuidor do cobre eletrolítico. Entretanto, para conferir se as propriedades do material estavam dentro das especificações requeridas, foi realizado o ensaio de EDX conforme a FIGURA 5. 1. Nesta imagem, os picos dos espectros indicam apenas o aparecimento do elemento cobre, exibindo a pureza do material usado com 99,58% de cobre.

FIGURA 5. 1 – EDX do cobre eletrolítico usado na construção dos insertos.

Após a aquisição das barras de cobre de 2” e 1”, foram usinados os corpos de prova de acordo com os projetos encontrados no APÊNDICE A, que foram usados como insertos no trabalho.

5.1.2 – Molde plano fixo e porta-insertos

Para os insertos fixos e porta-insertos foi usado o aço inoxidável martensítico SAE 420. Essas peças foram usinadas na oficina da mecânica EESC São Carlos e os respectivos projetos dos insertos são encontrados no APÊNDICE A.

Após a usinagem mostrada na FIGURA 5. 2 (a), o inserto fixo foi polido com pasta de diamante no Laboratório de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos com granulometrias de 6 μ m, 3 μ m e 1 μ m até obter superfície espelhada, conforme FIGURA 5. 2 (b). Após, foi executada a montagem do inserto no porta-moldes.

FIGURA 5. 2 – (a) Inserto fixo usinado e polido de acordo com o projeto no APÊNDICE A (b) Montagem no porta moldes.

Em seguida, foi feita a caracterização no perfilômetro óptico para conseguir os dados de rugosidade superficial com $R_a = 7,02$ nm, $R_q = 9,05$ nm e $R_t = 225,19$ nm, valores comparados àqueles obtidos com torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante, de acordo com o que será exposto no capítulo 6 de resultados e discussão.

FIGURA 5. 3 – Superfície polida e espelhada do inserto fixo caracterizado no perfilômetro óptico. (a) Valores e perfil de rugosidade (b) Espectro da superfície em 3D.

O molde móvel ou porta-inserto de cobre é mostrado na FIGURA 5. 4. Seu projeto encontra-se no APÊNDICE A, onde é possível ver os dutos de refrigeração usados no resfriamento do molde e o pino guia de fixação.

FIGURA 5. 4 – Molde móvel ou porta-inserto construído em aço SAE 420.

A TABELA 5. 1 mostra as propriedades físicas do cobre C11000 e do aço SAE 420.

TABELA 5. 1 – Propriedades Físicas (AMERICAN SOCIETY FOR METALS ASM, 1998).

Propriedades	Densidade ρ (g/cm ³)	Calor Especifico C_p (kJ/kg.K)	Coefficiente Linear De Expansão Térmica ($\mu\text{m/mK}$)	Condutividade Térmica k (W/mK)	Resistividade elétrica ($n\Omega.m$)
Cobre	8,93	0,3846	16,5	398	16,730
Aço Inoxidável SAE420	7,870	0,4473	11,8	80,4	97,1

A TABELA 5. 2 mostra as propriedades mecânicas desses materiais usados nos moldes.

TABELA 5. 2 - Propriedades Mecânicas (AMERICAN SOCIETY FOR METALS ASM, 1998).

Propriedades	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Elongação 50mm (%)	Dureza
Cobre	221-455	69-365	55-4	40 HRF
Aço Inoxidável SAE420	655	445	25	195 HB

5.2 - Fabricação dos arranjos de microlentes esféricas

5.2.1 - Máquina-ferramenta – Centro de Usinagem CNC

Esta parte do trabalho está focada em desenvolver um método que viabilize baixos custos e flexibilidade nas técnicas de fabricação, no qual o erro de forma e rugosidade seja próximo ao do torneamento com ferramenta de diamante. O método vanguardado emprega um centro de usinagem com coordenadas em três eixos, punção de aço VND e esferas de rolamento com diâmetro de 4,76 mm (3/16”).

O centro de usinagem vertical localizado no NUMA - Núcleo de Manufatura Avançada da EESC São Carlos, usado neste experimento foi um ROMI modelo D 800 (FIGURA 5. 5) dotado de trocador automático de 30 ferramentas, motorização 20 cv, rotação máxima de 12000 rpm, CNC GE Fanuc 0i-MC, curso da mesa superior (eixo X) 800mm, curso da mesa inferior (eixo Y) 530mm, curso do cabeçote (eixo Z) mm 580 e resolução de 100 nm.

FIGURA 5. 5 – Centro de usinagem vertical 3 eixos.

5.2.2 - Fresa de metal duro

Nos insertos de cobre foram realizados 3 tipos de fabricação para os arranjos de microlentes esféricas: 1 – microfresado, 2- microforjado e 3- microfresado e microforjado.

Nos primeiro e terceiro casos, primariamente, foi usado uma fresa do tipo “*end ball nose*” de $\phi = 2$ mm de metal duro da Sandvik® como mostra a FIGURA 5. 6.

A caracterização desta ferramenta foi feita no MEV sendo que, na FIGURA 5. 6 (b), é possível notar com maior clareza a ponta arredondada da fresa. Na FIGURA 5. 6 (c), a imagem possui maior magnitude de ampliação, sendo possível observar a microporosidade da aresta de corte da ferramenta. Isto acontece devido ao processo de produção conhecido como metalurgia do pó, que é empregado nas ferramentas de metal duro e, como consequência dessas imperfeições na aresta de corte, obtém-se acabamento superficial inferior ao acabamento das ferramentas de diamante, como será mostrado adiante.

(a)

(c)

(c)

FIGURA 5. 6 – (a) Fresa “end ball nose” com 2 mm de diâmetro da Sandvik® (b) Aumento de 100x mostrando o detalhe da ponta arredondada (c) Aumento de 2500 x mostrando a porosidade do metal duro

5.2.3 - Punção de aço VND

O aço usado para o punção foi o VND, que é um material de baixa liga (teores de liga que variam de 1,5% a 5%,) e alto teor de carbono, portanto, temperável em óleo. Apresenta alta dureza superficial, alta resistência ao desgaste e média tenacidade. É um aço usado para ferramentas de corte, especialmente machos, cossinetes, brochas, punções, facas para corte de papel, ferramentas para trabalho em madeira, pinos de guia, roletes para laminar roscas, estampos e matrizes em geral, calibres, padrões, réguas e demais instrumentos de medição.

O aço VND foi primeiramente usinado na medida em um torno convencional da NARDINI® Mascote MS205, para adquirir forma de um punção e depois aquecido com maçarico e banhado ao óleo queimado para o resfriamento da têmpera. Logo após, foi realizado o tratamento térmico de revenimento para alívio de tensões. A TABELA 5. 3 mostra a composição desse aço.

TABELA 5. 3 – Composição do aço VND (%).

C	Si	Mn	Cr	V	W
0,9	0,5	1,2	0,5	0,3	0,5

Na FIGURA 5. 7 (a), tem-se a esfera de rolamento com $\phi = 3/16''$ usada para puncionar as microlentes. Na FIGURA 5. 7 (b), mostra-se o punção montado com a esfera, sendo que o dispositivo roscado para fixação da esfera foi usinado em aço SAE 1020.

(a)

(b)

FIGURA 5. 7 – (a) Rolamento de Esfera de aço com $\phi = 3/16''$ (b) Punção montado.

Para obter a caracterização da esfera de rolamento com $\phi = 3/16''$ foi usada a perfilometria óptica exibida na FIGURA 5. 8 (a), que mostra os valores de rugosidade desta peça na figura (b) com $R_a = 252,21 \text{ nm}$, $R_q = 307,83 \text{ nm}$ e $R_t = 3,62 \text{ }\mu\text{m}$.

FIGURA 5. 8 – Caracterização da esfera de rolamento do punção (a) Imagem 3D e (b) Análise da rugosidade com filtro de esfericidade e inclinação.

5.2.4 - Concepção do projeto e calibragem do processo de fabricação dos arranjos de microlentes esféricas (microfresamento e microforjamento).

Primordialmente, foi necessário construir os projetos dos arranjos de microlentes esféricas em um *software* CAD 3D, de acordo com a FIGURA 5. 9, para gerar com maior facilidade o programa CNC usado no centro de usinagem. Os arranjos esféricos com entrada circular ou empacotamento $\phi = 78,5\%$ se encontram do lado esquerdo do desenho, enquanto os arranjos esféricos com entrada quadrada ou empacotamento completo $\phi = 100\%$ estão do lado direito da imagem. As aberturas de 2 mm encontram-se na parte superior do molde e as aberturas de 1 mm encontram se na parte inferior.

FIGURA 5. 9 – Projeto dos arranjos de microlentes esféricas

Para obter o cálculo das profundidades da curvatura da lente com uma abertura determinada foi usada a seguinte relação:

$$z(d, R) = R - \sqrt{R^2 - \frac{d^2}{4}} \quad (5.1)$$

Onde z é a profundidade da curvatura ou sagita, d é o diâmetro impresso e R é o raio da lente.

Para o cálculo do foco foi usada a relação (2.3).

A fim de aferir se o centro de usinagem possuía potência suficiente para forjar os insertos, foi construído o modelo teórico para calcular a força mínima necessária à obtenção do microforjamento do arranjo das microlentes esféricas em um molde de cobre.

Kalpakjian e Schmid (2006) fizeram um modelo matemático para uma matriz de forjamento cilíndrico baseado na seguinte relação:

$$F_0 = Y_f \pi r^2 \left(1 + \frac{2\mu r}{3h} \right) \quad (5.2)$$

Onde F_0 é a força de forjamento, Y_f é a tensão de escoamento do material que pode ser adquirida na TABELA 5. 2, r é o raio do cilindro, h a altura, μ é o coeficiente de atrito que é de aproximadamente 0,2.

Para o caso de uma impressão semiesférica, devemos readaptar a relação 5.2 para a equação 5.3:

$$F_0 = Y_f A_s \left(1 + \frac{2\mu d}{3z} \right) \quad (5.3)$$

Onde z dado pela equação 5.1 e A_s é a área da calota semiesférica que é dada por:

$$A_s(d, R) = 2\pi R \left(R - \sqrt{R^2 - \frac{d^2}{4}} \right) \quad (5.4)$$

onde R é o raio da esfera e d o diâmetro de abertura da lente.

O modelo da equação 5.3 prevê a força necessária F_0 para criar uma impressão semiesférica com profundidade z e abertura d , para qualquer material de molde, tamanho de lente e altura da sagita.

A TABELA 5. 4 mostra os cálculos de profundidade, abertura da diagonal da lente, empacotamento, distância focal, abertura focal e força requerida para o microforjamento de uma esfera com $\phi = 3/16''$.

TABELA 5. 4 – Cálculo da profundidade dos arranjos de microlentes esféricas.

Raio das Esferas (mm)	Tipo de Abertura	Profundidade de z (μm)	Abertura da diagonal da lente d (mm)	Distância entre os centros (mm)	Tipo de empacotamento ϕ (%)	Distância Focal (mm)	$f/\#$	F_0 (N)
2,38 (3/32")	Redonda	220	2	2	78,5	4,85	2,42	1530
	Quadrada	465	2,828	2	100	4,85	2,42	2640
	Redonda	53	1	1	78,5	4,85	4,85	585
	Quadrada	107	1,414	1	100	4,85	4,85	930

Entretanto, calcular a força de microforjamento não foi suficiente para conduzir o processo ao sucesso. Apesar do centro de usinagem possuir força muito maior do que 2640 N, força recomendada para ocorrer a impressão no molde de cobre, este fato não ocorreu. Para obter dimensões exatas de acordo com o projeto, foi necessário realizar a calibragem do processo (conforme diagrama da FIGURA 3. 1), pois, devido à deformação elástica do sistema (recuperação elástica do material e deformação elástica da máquina-ferramenta durante o teste), as profundidades obtidas experimentalmente não foram as mesmas que os dados calculados nominalmente no projeto, ou seja, foram menores.

Para isso, pré-testes foram conduzidos no sentido de se obter as dimensões exatas das microlentes, ou seja, recálculos foram feitos e chegou-se a conclusão de que foram necessárias profundidades maiores para que se obtivesse a profundidade nominal do projeto do molde dos arranjos de microlentes igual à profundidade experimental conseguida.

Devido ao fato de a deformação elástica nos metais possuir o comportamento de uma função linear, uma regra de três simples resolveu o problema de calibração do processo.

De acordo com os pré-testes e os novos cálculos, as melhores condições encontradas para se obter as profundidades desejadas no microforjamento estão descritas na TABELA 5. 5.

TABELA 5. 5 – Valores reais de profundidade usados para construir os insertos de arranjos de microlentes esféricas.

Raio das Esferas (mm)	Fresa Ball Nose $\phi = 2\text{mm}$ 12000 RPM	Abertura da diagonal da lente (mm)	Tipo de Abertura	Profundidade nominal da lente z (μm)	Profundidade da fresa real z_f (μm)	Profundidade do Punção real z_p (μm)
2,38 (3/32")	$V_c = 75$ m/min	2	Redonda	220	110	300
		2,828	Quadrada	465	200	590
		1	Redonda	53	25	75
		1,414	Quadrada	107	50	150

Já para as profundidades da peça apenas fresada tem-se, na TABELA 5. 6, os valores experimentais usados.

TABELA 5. 6 – Profundidade real usado para insertos apenas fresados.

Fresa Ball Nose $\phi = 2\text{mm}$ $R=1\text{mm}$ 12000 RPM	Abertura da diagonal da lente (mm)	Tipo de Abertura	Profundidade nominal da lente z (μm)	Profundidade da fresa z_f (μm)
$V_c = 75$ m/min	2	Redonda	1000	1116
	X	x	x	X
	1	Redonda	134	149
	1,414	Quadrada	292	326

Depois de realizados os cálculos e calibrado o processo, foi gerado o programa na linguagem Fanuc CNC, para fabricar os arranjos de microlentes, seguindo as seguintes etapas: os insertos de cobre foram polidos ou usinados com diamante e, logo depois, fixados ao centro de usinagem como mostra a FIGURA 5. 10 (a).

Para a realização dos ajustes e referenciamento da fresa e do punção, foi usado o equipamento dot-zero da empresa Accure Technologies® (FIGURA 5. 10 (b)). Seu pré-set é de 30,000mm com erro de $\pm 1 \mu\text{m}$ à 20°C.

A fresa foi referenciada (zerada) e, em seguida, usada para retirar material de forma a criar pré-cavidades de acordo com a FIGURA 5. 10 (c), resultando na peça da FIGURA 5. 10 (d). A rotação usada foi de 12000 RPM (rotação máxima da máquina) para retirar material da cavidade da lente, portanto a $V_c = 75\text{m/min}$. Após a retirada de material por meio do fresamento, o punção foi referenciado (zerado) na máquina e então esferas de rolamento fizeram o trabalho de microforjamento na face do cobre até que determinada profundidade de

penetração fosse alcançada para obter o acabamento superficial final e o raio de curvatura desejada conforme a FIGURA 5. 10 (e). O tempo de espera do punção pressionando a peça foi de 3 segundos e o resultado da peça pode ser visto na FIGURA 5. 10 (f).

FIGURA 5. 10 – Etapas do processo de fabricação dos arranjos de microlentes esféricas (a) Fixação da peça (b) Dispositivo para microreferenciamento do punção e da fresa (c) Referenciamento da fresa (d) Resultado da peça microfresada (e) referenciamento do punção (f) Resultado da peça microforjada

Após a fabricação do molde algumas peças foram injetadas.

5.3 – Fabricação das lentes de Fresnel

5.3.1 – Projeto e concepção das microlentes de Fresnel

No processo de replicação, primeiramente deve-se construir o projeto do molde da microlente de Fresnel.

Para isso, foi necessário gerar um código computacional na linguagem VB denominado LF2010 para obter o perfil da geometria deste tipo de lente. A FIGURA 5. 11

mostra a interface do software desenvolvido, que permite projetar lentes convencionais e de Fresnel anesféricas em qualquer escala (macro, micro e nano) com precisão de oito casas decimais calculando os respectivos módulos de fase do atraso de onda da luz para um comprimento de onda determinado pelo projetista, cálculo da área superficial e do volume da lente. Além disso, o usuário pode dimensionar a distância focal, o diâmetro de abertura da lente, o número de zonas no caso da lente de Fresnel, a resolução da lente e o índice de refração do material a ser usado.

Após o término do projeto da lente, o *software* LF2010 gera e salva um arquivo com extensão txt para ser transcrito para o torno de ultraprecisão ASG -2500.

FIGURA 5. 11 – Interface do programa LF2010 que projeta lentes convencionais, de Fresnel e calcula as respectivas funções de transmitância.

Após a concepção do programa, foram projetados e gerados três perfis da microlente de Fresnel. Os parâmetros de geometria estão descritos na TABELA 5. 7.

TABELA 5. 7 – Parâmetros paraxiais das lentes de Fresnel.

Raio da superfície anesférica (mm)	Concavidade	Tipo de Geometria	Profundidades z (μm)	ϕ (mm)	Distância Focal (mm)	f/#	Dioptria
235	Convexa	Altura constante	10	24	480	20	2
34,3	Côncava	Altura variável	Menor = 0,93 Maior = 73,57	20	70	3,5	15
34,3	Convexa	Altura variável	Menor = 0,93 Maior = 73,57	20	70	3,5	15

Os projetos das microlentes de Fresnel foram designados para operarem nos domínios paraxiais possuindo perfil de fase normalizado anesférico.

Foram construídas duas microlentes com velocidade rápida $f/\# = 3,5$ e uma microlente de velocidade lenta $f/\# = 20$.

A lente de Fresnel que possui altura constante possui sua largura variável. Seu perfil gerado pelo software LF2010 pode ser visto na FIGURA 5. 12 (a).

Este programa também auxilia no cálculo da área superficial e do volume da microlente, portanto em função disso, pôde-se calcular a razão superfície/volume com maior facilidade sendo que neste caso foi de $195,967 \text{ mm}^{-1}$.

A lente de Fresnel que possui altura variável possui sua largura constante. Seu perfil pode ser visto na FIGURA 5. 12 (b) Conforme o projeto obtido por meio do software LF2010 o cálculo da razão superfície/volume foi de $41,15 \text{ mm}^{-1}$.

Nota-se que a razão superfície/volume da lente de Fresnel de altura constante foi de aproximadamente cinco vezes maior, ou seja, nesta lente o comportamento das propriedades mecânicas e ópticas do material da lente é definido basicamente pela camada superficial “*skin*”, enquanto que na segunda lente o comportamento pode ser em parte definido pelo substrato. Isso influenciará diretamente no comportamento do preenchimento do molde, pois de acordo com a revisão bibliográfica, as peças produzidas na micromoldagem solidificam mais rapidamente do que na moldagem convencional, devido ao pequeno volume de polímero e a alta razão superfície/volume típica da moldagem de micropeças. Portanto, o preenchimento da lente com altura constante é muito mais oneroso que o preenchimento da lente de altura variável, já que o rápido resfriamento na região superficial acarreta a retração do material polimérico dificultando ainda mais a ação de adição de material para dentro das microcavidades.

(a)

(b)

FIGURA 5. 12 – Projeto das lentes de Fresnel de fase normalizado obtidas pelo LF2010
(a) Altura constante (b) Altura variável

5.3.2 - Máquina-ferramenta – Torneamento de ultraprecisão

A máquina-ferramenta empregada para os ensaios de corte foi a Geradora de Superfícies Anesféricas ASG 2500 (“Aspheric Surface Generator 2500”), da RANK PNEUMO® (atualmente Precitech Components®), localizada no laboratório de engenharia de precisão da EESC São Carlos (FIGURA 5. 13). Trata-se de uma máquina-ferramenta especialmente projetada tanto para o torneamento como para a retificação de ultraprecisão. Esta máquina possui uma base de ferro fundido, termicamente livre de tensões, a qual é isolada de vibrações externas através de isoladores pneumáticos passivos montados cinematicamente numa estrutura de aço soldada. Os mancais do eixo-árvore são aerostáticos,

de modo a conferir precisão de giro, rigidez axial e radial compatíveis com o nível de precisão a que o equipamento se propõe (10 nm de precisão de posicionamento).

Para obter resoluções e acabamentos superficiais desta ordem de grandeza, um Controle Numérico Computadorizado (CNC) ALLEN BRADLEY série 8200[®] é usado para controlar simultaneamente os deslocamentos dos eixos X e Z da máquina. Neste ponto, vale a pena ressaltar que não existe superposição dos eixos, com o objetivo de se evitar a propagação dos erros de posicionamento. As posições dos eixos são monitoradas por transdutores interferométricos a laser, da HEWLETT-PACKARD[®], com realimentação ao controlador. Os deslocamentos dos carros da máquina são suportados por guias hidrostáticas de alta rigidez, que permitem a movimentação suave em escala nanométrica, de forma que o atrito mecânico se torna desprezível. A fixação das peças a serem usinadas é realizada por meio da placa de vácuo (cerca de -70kPa). Esta máquina-ferramenta está instalada em uma sala com controle de temperatura ($20,0^{\circ}\text{C} \pm 0,1$) e umidade.

FIGURA 5. 13 - Torno de ultraprecisão gerador de superfícies anesféricas ASG-2500, da RANK PNEUMO[®] (atualmente Precitech Components[®])

5.3.3 – Seleção das ferramentas de diamante

O projeto de ferramentas monocortantes de diamante deve ser tal a atender os requisitos necessários à usinagem de ultraprecisão. Atenção especial deve ser dada ao projeto e fabricação de ferramentas de corte, pois caso a afiação da ferramenta não seja garantida, dificilmente haverá a possibilidade de se realizarem cortes com espessuras da ordem submicrométrica.

Para que estas exigências sejam satisfeitas, não basta apenas o operador realizar uma operação de torneamento com ferramenta de diamante, ele deverá possuir conhecimentos profundos de uso da técnica. Caso contrário, os resultados obtidos poderão ser péssimos em termos de adequação do processo ao material usado, para obter os melhores acabamentos superficiais e pequenos erros de forma.

Para isto foram usadas três ferramentas de corte neste trabalho, todas de diamante monocristalino, porém uma foi fabricada pela empresa DIFER[®] DIAMANTES INDUSTRIAIS LTDA. e as outras duas, pela empresa CONTOUR FINE TOOLING[®] (UK).

Primeiramente, para assegurar que a afiação das ferramentas usadas fossem boas, foi usado o MEV para investigar a geometria da aresta de corte. A FIGURA 5. 14 (a) mostra a imagem da ferramenta da Contour[®], cujo nome é **ferramenta de meio raio - raio mão esquerda tipo HC0.10mLGC**, e o seu projeto que é definido com raio de ponta de 0,1mm, ângulo de saída $\gamma = 0^\circ$, ângulo de folga $\alpha = 10^\circ$, ângulo de ponta $\varepsilon = 30^\circ$ e porta-ferramentas de 6,35x6,35x51mm.

Na FIGURA 5. 14 (b), temos o detalhe da cunha de corte da ferramenta de corte, que possui geometria especial para permitir a construção de lentes de Fresnel.

(a)

(b) 500X

(c) 4000 X

FIGURA 5. 14 – (a) Ferramenta de meio raio - raio mão esquerda (b) Detalhe da cunha de corte da ferramenta (c) Detalhe da geometria da aresta de corte

Na FIGURA 5. 14 (c), obtida no MEV com 4000 x de ampliação, é possível notar que, ao contrário das ferramentas de metal duro, a aresta de corte possui geometria perfeitamente definida. Isto torna o acabamento superficial gerado no processo de torneamento de ultraprecisão de certos tipos de materiais dúcteis em uma escala óptica.

Na FIGURA 5. 15 temos uma ferramenta nova, da marca DIFER[®]. Esta ferramenta foi usada para realizar um pré-faceamento nos insertos de cobre para retirar qualquer impureza superficial causada pela lapidação, preparar os insertos que seriam usados na fabricação dos arranjos esféricos e tornar a superfície espelhada anterior ao processo de usinagem da lente de Fresnel.

FIGURA 5. 15 – Ferramenta Difer[®] usada no faceamento de cobre em diversas ampliações (a) cunha de corte (b) aresta de corte

Entretanto, de acordo com FIGURA 5. 15 (b), observa-se que a aresta de corte não possui geometria bem definida. Isso fez com que, durante a usinagem, ocorressem fortes vibrações (ruídos altos), determinando a desistência de seu uso devido ao péssimo acabamento superficial gerado. Por tal motivo, sabendo-se que o custo de ambas as ferramentas são próximos, fica evidente que o operador de uma máquina-ferramenta de ultraprecisão deve possuir conhecimentos do processo como um todo, pois a péssima seleção de uma ferramenta de corte levará ao fracasso da operação de construção dos moldes conduzindo à reprodução de lentes de baixíssima qualidade.

Devido a este fato, foi necessário usar novamente outra ferramenta da marca Contour[®] para realizar o pré-faceamento nos insertos de cobre, cujo modelo é: **Ferramenta de Torneamento Padrão Rank Pneumo: 51mm (2") tipo C1.50mLG.**

A FIGURA 5. 16 (a) mostra o projeto desta ferramenta, que possui raio de ponta de 1,5mm e ângulo de saída $\gamma = 0^\circ$, ângulo de folga $\alpha = 10^\circ$, ângulo de ponta $\varepsilon = 60^\circ$ e porta-ferramentas de 6,35x6,35x51mm.

Na FIGURA 5. 16 (b), tem-se a imagem ampliada da cunha de corte e na FIGURA 5. 16 (c), a ampliação em 10000 x da geometria da aresta de corte mostra a geometria extremamente bem definida, mesmo em grandes ampliações. Por esse motivo foi usada para realizar um pré-faceamento nos insertos de cobre e tornar as superfícies espelhadas.

FIGURA 5. 16 – (a) Projeto da ferramenta torneamento padrão de ultraprecisão da Rank Pneumo: 51mm (2'') com 63x. (b) Cunha da Ferramenta de corte. (c) Detalhe da geometria da aresta de corte com 10000x de ampliação

5.3.4 – Etapas de calibração do processo de torneamento de ultraprecisão

Para fixar as peças que foram usinadas por meio da placa de vácuo foi necessário construir um suporte de 2'', conforme o APÊNDICE A.

Após a fabricação do suporte e dos insertos de cobre (vide APÊNDICE A) foi digitado no CNC ALLEN BRADLEY um programa contendo 400 pontos para gerar cinco insertos da lente de Fresnel, sendo que 2 foram usados na prensagem a quente e os outros 3, na moldagem por injeção.

Na construção do primeiro protótipo da lente de Fresnel ocorreram falhas na geometria construída, portanto, para calibrar o processo foi necessário construir o projeto da lente, FIGURA 5. 17, em um *software* 3D de forma a auxiliar na compreensão da geometria da lente concomitante com a geometria da ferramenta de corte, e consequentemente digitar os pontos de forma correta no CNC.

FIGURA 5. 17 – Projeto dos moldes das lentes de Fresnel

Calibrada e verificada a digitação correta dos 400 pontos do perfil da lente de Fresnel, foram acertados os parâmetros de corte na usinagem de ultraprecisão para a construção da lente de Fresnel sendo usado avanço de $f = 2,5\mu\text{m/rev}$, profundidade de corte de $a_p = 3\mu\text{m}$, e Velocidade de corte $V_c = \text{variável}$, pois a operação realizada foi de faceamento. O fluido de corte ALKALISOL 900[®] foi pressurizado e direcionado para a zona de corte na forma de nevoa ($\sim 100\text{ml/h}$) e a rotação do eixo-árvore ficou mantida a 1000 rpm (FIGURA 5. 18).

Nenhuma interação elástica foi encontrada nesta técnica, ou seja, não ocorreu a recuperação elástica do material. Portanto, as profundidades de corte nominais foram as mesmas que as reais resultando em uma peça pronta sem a necessidade de realizar este tipo de calibração.

FIGURA 5. 18 – Lente de Fresnel durante o processo de microusinagem com ferramenta de diamante

É válido enfatizar novamente, conforme visto na revisão bibliográfica, que para obter bons resultados na manufatura de ultraprecisão é necessário que o operador esteja

familiarizado com o estado da arte e conheça as tecnologias de medida e equipamentos que devem ser usados, ou seja, ele deverá possuir o completo entendimento da técnica empregada de forma a garantir que o produto gerado possua os menores erros de forma possíveis e os melhores índices de rugosidade superficial. De acordo com a afirmação estabelecida, para eliminar os erros de batida axial e radial foi usado um probe LVDT da Tesatronic® modelo TTA 20, no sentido de minimizar as vibrações dinâmicas geradas durante o processo.

5.4 – Termomoldagem – Equipamentos e calibragem do processo

Na replicação dos insertos prensados, foi usada uma prensa destinada a realizar embutimentos de amostras metalográficas do laboratório de materiais da escola de engenharia de São Carlos, FIGURA 5. 19, com pressão e temperatura controladas.

É importante ressaltar que este equipamento possui baixo custo de aquisição tornando o processo mais viável. Além disso, o principal motivo de sua aplicação nesta tese é o grande índice de replicação que o processo estabelece (DAVIS, 2002).

FIGURA 5. 19 – Prensa usada nos ensaios de termomoldagem

Pellets de acrílico foram usados neste procedimento durante a prensagem.

Para realizar este experimento a embutidora foi pré-aquecida durante 5 minutos e, após este procedimento, a amostra foi prensada por 15 minutos com pressão de 100 BAR e, finalmente, refrigerada com água durante 5 minutos para ser despressurizada e retirada do molde, resultando em um tempo total de ciclo de 30 minutos, contada a desmoldagem da peça para obter o resultado de uma lente totalmente coalescida da FIGURA 5. 20 (a). Tentativas no

sentido de diminuir o tempo de ciclo não foram bem sucedidas, pois conforme FIGURA 5. 20 (b), mostra que o coalescimento do material não ocorreu, restando microtrincas por toda a parte da lente. A FIGURA 5. 20 (c) mostra o detalhe de uma microtrinca no meio das zonas de Fresnel, causada pela falta de coalescimento do material.

FIGURA 5. 20 – Lente de Fresnel termomoldada (a) Lente moldada com o coalescimento completo (b) Lente com o coalescimento do material incompleto (c) Detalhe de uma trinca entre as zonas de Fresnel, formada devido à falta de coalescimento do material, ampliação 200x

5.5 - Moldagem por Microinjeção

5.5.1 – Máquina injetora

Para os ensaios de microinjeção foi usada uma máquina injetora da marca ROMI® modelo PRIMAX 100R – CONTROLMASTER 8 (FIGURA 5. 21). Este equipamento possui um parafuso plastificador com diâmetro de 40 mm. O volume máximo permitido para a injeção é de 175 cm³. O tamanho mínimo do porta-moldes é de 270 mm x 270 mm x 150 mm (largura x comprimento x altura) e o máximo, de 640 mm x 410 mm x 410 mm. Seu curso máximo de abertura é de 410 mm e a força de fechamento, de 100 TON.

FIGURA 5. 21 – Injetora ROMI® PRIMAX 100R

5.5.2 – Porta-moldes

O porta-moldes selecionado foi o modelo 25-30 da empresa Polimold® mostrado na FIGURA 5. 22, montado na injetora.

Esta peça é constituída de aço contendo uma quantidade média de carbono (1045). Foi obtida por meio de empréstimo com o professor do IFSC – USP, Dr. Euclides Marega Junior por ser adequada para as variações de pressões de injeção, projeto com saída de gases e geometria da cavidade da lente. Dessa forma, partiu-se desse porta-molde para projetar os itens que faltavam para a fabricação dos μ EODs, como por exemplo, o porta-inserto, inserto fixo e os insertos de cobre.

FIGURA 5. 22 – Porta moldes da Polimold® montado na injetora

5.5.3 – Calibragem dos parâmetros técnicos da moldagem por injeção

Todos os resultados simulados foram realizados para a lente de Fresnel de altura variável devido ao fato dos resultados não se tornarem repetitivos e esta ser a mais crítica para ocorrer o preenchimento dos microcanais em razão dos seguintes critérios: 1 - a geometria da lente possui cantos vivos; 2 - sua razão de aspecto foi a maior entre todas as microlentes construídas; 3 – a complexidade do modelo simulado no software Mold Flow[®] dessa geometria foi maior, conforme a imagem da FIGURA 5. 23.

FIGURA 5. 23 – Complexidade do modelo analisado pelo Mold Flow 2010[®].

Primeiramente, alguns testes iniciais foram realizados para verificar a temperatura de plastificação do PMMA. De acordo com o fabricante de injetora ROMI[®] a temperatura indicada para o processo seria de 220°C. Entretanto, foram realizadas mais de dez variações nos parâmetros de pressão e rotação do fuso para verificar se a viscosidade diminuiria e os resultados foram pífios, conduzindo à falha prematura de um molde de cobre eletrolítico de Fresnel.

Para resolver o problema foi feita a análise no simulador por elementos finitos Mold Flow[®] para verificar qual a temperatura mais adequada ao ponto de fusão e de resfriamento do molde para o polímero PMMA – DH ECL P usado neste trabalho.

Conforme os resultados simulados da FIGURA 5. 24 (a), a melhor temperatura de fusão indicada foi de 246°C e a melhor temperatura de resfriamento do molde foi de 80°C (FIGURA 5. 24 (b)).

FIGURA 5. 24 – Simulações para obter os parâmetros de (a) Temperatura de fusão do acrílico de 246,1 (b) Temperatura de resfriamento do molde de 81°C

Após esta primeira etapa, foi preciso verificar qual era a mínima pressão de injeção necessária para o preenchimento da macroestrutura da lente de PMMA. Vários testes práticos, com diversas pressões de injeção, foram conduzidos investigando o preenchimento na cavidade da macroestrutura e comparados com os resultados simulados de forma a calibrar os parâmetros de injeção e conferir a sensibilidade e exatidão do software Mold Flow®. A FIGURA 5. 25 mostra o resultado dos testes que tinham como objetivo diversificar as pressões de injeção desde valores de 10 BAR até obter o valor mínimo de preenchimento da macroestrutura de 400 BAR.

Outro fato interessante observado nestas imagens é o comportamento do fluxo de escoamento do acrílico que possui velocidade zero nas bordas e máxima no centro, corroborando a teoria descrita na FIGURA 3. 15 e também os resultados de simulação da FIGURA 5. 26.

Nestas imagens, são mostrados os resultados de probabilidade da confiança para o plástico preencher a região interna da cavidade sob condições convencionais da moldagem por injeção. Nota-se que o perfil de velocidade obtido experimentalmente é semelhante aos resultados simulados e a confiança de preenchimento também é análoga aos resultados simulados, isto é, com preenchimento de 10 Bar (FIGURA 5. 26 (a)) ocorre pouco preenchimento da cavidade com apenas 18% de certeza de preenchimento e, com 400 BAR (FIGURA 5. 26 (f)), o preenchimento é completo, ou seja, o programa executa a simulação com grande exatidão no nível macroestrutural. Referidos resultados são derivados da mudança de pressão e temperatura. As cores representam a confiança de preenchimento e podem ser interpretadas da seguinte maneira: a cor verde significa que o preenchimento

definitivamente ocorrerá e a qualidade da peça será aceitável, a cor amarela expressa que talvez alguma dificuldade ou problemas existirão no preenchimento. A maior presença desta cor significa que a qualidade da peça talvez não seja satisfatória. Já a cor vermelha representa grande dificuldade ou qualidade no preenchimento, ou seja, a peça produzida certamente será rejeitada. Por último, a parte cinza significa que não ocorrerá o preenchimento em hipótese nenhuma para aquela condição.

Se a cavidade não preencher, devem ser realizadas mudanças no projeto do local de injeção, na escolha do plástico ou dos parâmetros de injeção, como o aumento de pressão de injeção realizado na FIGURA 5. 26.

FIGURA 5. 25 – Ensaio para verificar a mínima pressão de preenchimento da macrocavidade (a) 10 BAR (b) 50 BAR (c) 100 BAR (d) 200 BAR (e) 300 BAR (f) 400 BAR

FIGURA 5. 26 – Resultados simulados para verificar a sensibilidade e exatidão do MOLD FLOW® na pressão mínima de preenchimento e perfil de velocidade da macrocavidade (a) 10 BAR (b) 50 BAR (c) 100 BAR (d) 200 BAR (e) 300 BAR (f) 400 BAR

Realizadas as etapas de calibragem da temperatura de injeção, da temperatura do molde e da pressão mínima de injeção, os *pellets* de PMMA foram secados, antes do processamento para remover a umidade absorvida, em uma estufa durante 4 horas com temperatura de 80°C, pois o material deve apresentar baixo grau de umidade, caso contrário, a água poderia se transformar em vapor e resultar em manchas, escamas ou bolhas nas peças moldadas.

Congruente com os pré-testes expostos, os parâmetros usados para verificar o preenchimento das microcavidades são apresentados na TABELA 5. 8 em seis diferentes condições.

TABELA 5. 8 – Parâmetros de injeção usados na replicação dos μ EODs.

Parâmetros	Unidades / Condições	1	2	3	4	5	6
Velocidade de plastificação	mm/s	500	500	500	500	500	500
Velocidade de injeção	cm ³ /s	140	140	140	140	140	140
Contra pressão	BAR	20	20	20	20	20	20
Temperatura de injeção 1	°C	240	240	240	240	240	240
Temperatura de injeção 2	°C	245	245	245	245	245	245
Temperatura de injeção 3	°C	250	250	250	250	250	250
Temperatura de injeção 4	°C	240	240	240	240	240	240
Temperatura de resfriamento do molde	°C	80	80	80	80	80	80
Pressão de injeção	BAR	400	600	800	1000	1200	1340
Pressão de Recalque 1	BAR	300	500	700	900	1000	1300
Tempo de Recalque 1	(s)	10	10	10	10	10	10
Tempo de resfriamento	(s)	25	25	25	25	25	25
Tempo de ciclo	(s)	42 - 44	42 - 44	42 - 44	42 - 46	42 - 44	42 - 46

5.6 - Perfilômetro óptico

As pequenas características do molde de Fresnel (menores ainda na parte mais externa do molde) e os arranjos microcirculares tornam difícil a medição do perfil da superfície por meio do método de contato. Apenas o MEV não caracteriza a superfície de forma adequada.

Por este motivo, para caracterizar a fidelidade de replicação de forma precisa, os insertos e as lentes produzidas foram submetidos às medidas com o instrumento óptico sem contato da Veeco® Wyco NT1100 localizado no laboratório de engenharia de precisão da EESC São Carlos, como mostrado na FIGURA 5. 27.

FIGURA 5. 27 – Perfilômetro óptico NT 1100 da Veeco®

Este equipamento é rápido possuindo resolução vertical subnanométrica (Angstrom) em todas as ampliações.

Faz uso de interferometria com luz branca para alta resolução de medidas de superfícies 3D, desde rugosidades subnanométricas até degraus milimétricos. Faz análises de desgaste, fratura e controle de processo.

Possui sistema completo de software: Wyco Vision®, que fornece mais de 200 ferramentas para analisar qualitativa e quantitativamente os dados superficiais, todos padronizados em diversas normas.

As características técnicas do sistema são:

- **Técnicas de medida:** mudança de fase óptica e interferometria de varredura vertical com o uso de luz branca;

- **Capacidade de medida:** medida superficial com três dimensões e sem contato;
- **Objetivas:** 1,5x, 2,5x, 5,0x, 10x, 20x, 50x;
- **Fonte da lâmpada:** lâmpada de tungstênio halogênica;
- **Software:** Wyko Vision[®] compatível com Windows.
- **Faixa de medida vertical:** 0,1nm – 1mm;
- **Resolução vertical:** $< 1 \text{ \AA}$ Ra;
- **Repetibilidade RMS:** 0,01nm;
- **Velocidade vertical de varredura:** até 7,2 $\mu\text{m}/\text{seg}$;
- **Refletividade:** 1% até 100%

5.7 - Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.)

O MEV usado neste trabalho foi da Carl Zeiss modelo LEO OPEN X, mostrado na FIGURA 5. 28. Este microscópio possui resolução de 2,5 nm a 30 kV, ampliações de 23 x a 40000 x, voltagem de aceleração de 200 V até 30 kV e câmera que suporta peças até 2".

FIGURA 5. 28 – Microscópio eletrônico de varredura da Carl Zeiss[®] modelo LEO OPEN X

5.8 - Análises Paraxiais

O espectrofotômetro usado é do Instituto de Física de São Carlos IFSC. É um instrumento de análise que permite selecionar o comprimento de onda (λ) da radiação adequado à análise de um determinado componente e determinar a variação de transmitância em função do tipo de material que está sendo analisado.

O banco óptico da marca Trioptics[®] mostrado na FIGURA 5. 29 foi usado para realizar os ensaios de medida de distância focal, $f/\#$ e FTM. Seu espectro é na frequência verde, que é a cor mais importante do espectro visível, porque o olho é muito mais sensível a ela do que a outras cores.

FIGURA 5. 29 – Banco óptico da Trioptics[®]

Capítulo 6 – Resultados e Discussões

Esta é uma iniciativa que busca desenvolver conhecimento tecnológico envolvendo projeto especial de microelementos ópticos difrativos com custos reduzidos e alta fidelidade de replicação.

Neste capítulo serão tratados os resultados obtidos da manufatura dos insertos dos μ EODs de cobre relacionados ao desempenho da ferramenta de corte de diamante monocristalito, e avaliação das técnicas de microforjamento e microfresamento buscando caracterizar o molde de acordo com os seguintes objetivos: 1) produzir superfícies muito bem acabadas e dimensões precisas com baixos desvios de forma; 2) medir a influência relativa de cada um dos parâmetros de corte (avanço, profundidade e velocidade de corte) sobre o acabamento superficial; 3) examinar as influências do material no acabamento; 4) avaliar o desempenho das ferramentas usadas; 5) analisar a repetibilidade do processo; 6) investigar o desgaste da ferramenta; e 7) avaliar os mecanismos de formação do cavaco.

Nos resultados de replicação ou reprodução dos μ EODs os aspectos avaliados foram em razão dos seguintes objetivos: 1) fidelidade de replicação das microestruturas em função da razão de aspecto do perfil e da perda de pressão na injeção, analisando e comparando as técnicas de termomoldagem e moldagem por microinjeção; 2) exatidão de forma óptica e estabilidade avaliando as aberrações de distorção geométrica oriundas dos processos de fabricação 3) avaliação da repetibilidade e uniformidade das microestruturas obtidas por meio dos processos executados.

6.1 – Arranjos de microlentes esféricas

A FIGURA 6. 1 exemplifica o uso dos arranjos de microlentes esféricas para aplicações de iluminação, detalhando para cada tipo de conjunto, o efeito luminoso das microlentes construídas na tese. Na FIGURA 6. 1 (a), é observada a geometria da frente de luz usada para realizar as análises dos empacotamentos com diâmetro de abertura de 2 mm e, na FIGURA 6. 1 (b), a geometria da frente de onda usada para arranjos com diâmetro de abertura de 1 mm.

A FIGURA 6. 1 (c) e (d) mostra empacotamento quadrado ($\phi = 78,5\%$) para 2 mm de abertura e 1mm de abertura, respectivamente. Percebe-se, dentro do círculo branco, que parte da frente de onda da luz atravessa as áreas do arranjo que não modula a sua fase, ou seja, onde não há a geometria da lente forma-se a própria geometria projetada atrás do arranjo. Nos domínios paraxiais das microlentes tem-se a projeção da geometria da frente de onda em cada microlente do conjunto.

Já na FIGURA 6. 1 (e) e (f) temos o empacotamento completo ($\phi = 100\%$) para diâmetro de abertura de 2 mm e 1mm, respectivamente. Nestas imagens é possível observar que toda a frente de onda é convergida para o domínio paraxial das microlentes, ou seja, não ocorrem perdas luminosas entre os vazios do arranjo, tornando a iluminação totalmente homogênea, o que melhora seu efeito estético na aplicação de luminosidade. Entretanto, a manufatura deste tipo de geometria é mais difícil de ser obtida.

Nos próximos tópicos serão apresentados os resultados de caracterização para cada técnica de fabricação usada na construção dos diferentes tipos de arranjos de microlentes esféricas.

FIGURA 6. 1 – Efeito dos diversos tipos de empacotamento (a) e (b) geometria da frente de onda (c) Empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ e diâmetro de abertura de 2 mm. (d) Empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ e diâmetro de abertura de 1 mm. (e) Empacotamento completo $\phi = 100\%$ e diâmetro de abertura de 2 mm. (f) Empacotamento completo $\phi = 100\%$ e diâmetro de abertura de 1 mm.

6.1.1 – Arranjo de microlentes esféricas fresadas

A FIGURA 6. 2 (a) mostra a imagem 3D de um pré-teste de uma microlente microfresada em um molde de cobre eletrolítico com 1,17 mm de diâmetro de abertura, destacando o aparecimento de rebarbas originadas no processo. Na FIGURA 6. 2 (b) tem-se o perfil desta microlente e a FIGURA 6. 2 (c) mostra o gráfico da rugosidade obtida com filtro de inclinação e esfericidade com $R_a = 3,98 \mu\text{m}$, $R_q = 6,43 \mu\text{m}$ e $R_t = 140,83 \mu\text{m}$. Os valores de rugosidade são muito superiores aos obtidos pelas técnicas combinadas de microfresamento e microforjamento ou somente o microforjamento, conforme será visto nas próximas seções.

FIGURA 6. 2 - Microlente microfresada (a) imagem 3D (b) perfil (c) rugosidade analisada com filtro de esfericidade

Os resultados obtidos por este método foram insatisfatórios, pois, concordante com o exposto no capítulo de materiais e métodos, a fresa possui geometria de aresta com baixa definição de forma, por causa da porosidade proveniente do processo de construção da tecnologia de sinterização do pó. Outro fato que deve ser levado em conta neste processo é o acabamento gerado pelo fresamento com CNC convencional, isto é, este tipo de máquina não possui mancais aeroestáticos que minimizam a vibração dinâmica durante o processo de microusinagem e, conseqüentemente, estas vibrações serão reproduzidas na superfície do molde produzindo uma área com baixa qualidade superficial e geração de rebarbas. Por este motivo, apesar de ter sido construído um inserto com arranjos de microlentes neste trabalho, seu uso foi descartado.

6.1.2 – Arranjos de microlentes esféricas fresadas e conformadas

6.1.2.1 – Empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ abertura circular de 2 mm

Este tipo de arranjo possui microlentes com 2 mm de diâmetro de abertura circular, sagita com 220 μm e empacotamento quadrado com $\phi = 78,5\%$. A FIGURA 6. 3 (a) mostra a imagem obtida no MEV, do inserto de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas, que foi primeiramente submetido, ao microfresamento para determinar a pré-cavidade e, posteriormente, à técnica de microforjamento com o uso de um punção esférico para determinar a forma final do molde.

Nesta imagem com ampliação de 33x é possível verificar que, a repetibilidade e uniformidade do processo são muito grandes, ou seja, podem ser construídos arranjos de microlentes em uma grande área com a mesma exatidão dimensional geométrica para todo o conjunto de microlente. Isso mostra o grande potencial para o uso dessa tecnologia na produção em massa.

Na FIGURA 6. 3 (b) tem-se destacada uma microlente do arranjo com ampliação de 100 x indicando marcas causadas pelo recalque no microforjamento, de rebarbas originadas do processo de microfresamento. Foi constatada que esta marca deixada pela fresa possui excentricidade de aproximadamente 70 μm , em consequência da construção mal executada do punção em um torno convencional manual. Outro fato que deve ser observado é que no centro da fresa a $V_c = 0\text{m/min}$ para $r = 0\text{mm}$, portanto, não há remoção de material, somente há o recalque do mesmo. A FIGURA 6. 3 (c) apresenta a ampliação deste detalhe provocado pelo microfresamento.

A FIGURA 6. 3 (d) mostra a réplica dos arranjos de microlentes de PMMA obtidos pelo método da moldagem por injeção, exibindo a uniformidade e fidelidade em toda a extensão de sua área. Nesta fotografia não é possível comprovar com clareza a impressão das marcas causadas pelas rebarbas recalcadas geradas pelo processo de microfresamento, entretanto, com uma ampliação maior, onde se examina apenas uma microlente do arranjo, FIGURA 6. 3 (e), comprova-se a replicação destas imperfeições ou defeitos que são mais claramente percebidos na FIGURA 6. 3 (f).

FIGURA 6. 3 - (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 78,5\%$ e abertura de 2mm, ampliação de 33x. (b) Imagem do molde mostrando apenas uma microlente do arranjo, ampliação de 100x. (c) Detalhe mostrando as marcas originadas da técnica de microfresamento, ampliação de 200x. (d) Reprodução em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 35x (e) Imagem de uma microlente do arranjo replicada, ampliação 100x (f) Defeitos replicados nas microlentes provocados pelo microfresamento, ampliação 1000x.

Estas marcas ou defeitos podem prejudicar o desempenho óptico da microlente, causando aberrações como será exposto nas seções posteriores, pois para inspecionar uma superfície curva por meio da perfilometria óptica seria necessário inserir uma objetiva com alta qualidade no caminho da medida visando obter uma frente de onda curva que serviria para refletir a superfície curva da peça a ser testada. O foco da lente auxiliar deve ser feito de forma a coincidir com o centro de curvatura da amostra. Nesta configuração poderiam ser medidas superfícies côncavas (molde) e convexas (microlentes) com grande grau de inclinação, conforme exposto no capítulo de metrologia.

Portanto, uma vez que a inclinação dos arranjos com abertura maior é muito grande (maior que a capacidade sensível do aparelho de análise), fazendo com que os raios de luz emitidos pelo instrumento se dispersem durante a caracterização, foi impraticável investigar o tipo de arranjo por meio deste método, já que não foi possível obter uma objetiva padrão com o mesmo raio da microlente produzida.

6.1.2.2 – Empacotamento completo $\phi = 100\%$ abertura quadrada de 2 mm

Este arranjo é o principal motivo do uso da combinação das técnicas de microfresamento e microforjamento, em razão da maior profundidade que as microlentes possuem neste conjunto com dimensões de 2,828 mm de abertura diagonal, 2 mm de aresta da abertura quadrada, o que resultará em uma sagita com profundidade de $z = 465 \mu\text{m}$ e empacotamento completo $\phi = 100\%$.

A ideia principal para esse arranjo de microlentes era a de que, se usássemos apenas a técnica de microforjamento, grandes recalques poderiam acontecer de forma a trincar o material.

Por isso foi usada a técnica de microfresamento seguida pelo microforjamento no intuito de evitar o surgimento de microtrincas. A razão por trás deste processo é que o fresamento poderia determinar a maior parte da forma do molde, e o subsequente forjamento com uma esfera de rolamento concederia boa forma e rugosidade sem deformações substanciais que poderiam afetar as lentes adjacentes do arranjo compacto gerando microfraturas na sua estrutura.

Entretanto, a teoria não funcionou como esperado, pois, neste caso, a relação da sagita da microlente pelo seu raio, que é de quase 20%, é a maior entre todos os arranjos manufaturados no presente trabalho. Como consequência, mesmo com o processo de microfresamento anterior ao de microforjamento ocorreu a formação de grandes forças de recalques originando microtrincas na estrutura arranjo de molde de cobre, próximas à aresta da abertura do conjunto que são imperceptíveis a olho nu.

Este fato ocorreu em toda a extensão do arranjo como indicado na FIGURA 6. 4 (a).

Além disso, a grande deformação plástica determinada pela ação do recalque derivado do microforjamento não foi suficiente para eliminar as marcas ou defeitos produzidos pelas rebarbas originadas no microfresamento, ou seja, estas marcas continuaram a permanecer em todo o conjunto prejudicando o acabamento superficial da microlente de acordo com a FIGURA 6. 4 (b), na qual é destacada apenas uma microlente do molde.

Os defeitos podem ser melhor vistos na FIGURA 6. 4 (c), com ampliação de 250x.

Na FIGURA 6. 4 (d) temos a imagem da reprodução do arranjo de microlentes de PMMA obtido pelo método da moldagem por injeção. Embora este arranjo possua geometria mais complexa que a geometria do conjunto anterior, sua uniformidade e reprodutibilidade também foram absolutas por toda a extensão do arranjo como podemos constatar na figura.

O aparecimento das microtrincas foi perfeitamente encontrado por todo o arranjo replicado e melhor analisado na FIGURA 6. 4 (e) que indica apenas uma microlente. Nesta imagem verifica-se a reprodução das microtrincas encontradas no molde das microlentes, entretanto os defeitos causados pelo microfresamento não foram evidenciados nem com ampliações maiores, de 250x da FIGURA 6. 4 (f).

FIGURA 6. 4 - (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 100\%$ e abertura de 2mm, ampliação de 33x (b) Imagem do molde mostrando apenas uma microlente do arranjo, ampliação de 100x (c) Detalhe indicando as microtrincas geradas pelo grande recalque causado pelo microforjamento e marcas deixadas pelas rebarbas do microfresamento, ampliação 250x (d) Reprodução em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 35x (e) Imagem de uma microlente do arranjo replicada, ampliação 100x (f) Replicação das trincas causadas pelo grande recalque do microforjamento, ampliação 1000x

Neste caso, também não foi possível caracterizar o arranjo de microlentes pelos mesmos motivos expostos anteriormente.

6.1.2.3 – Empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ abertura circular de 1 mm

Para este conjunto de lentes foi manufaturado um molde de cobre eletrolítico com microlentes de dimensões de 1 mm de abertura circular, sagita com profundidade de 53 μm e empacotamento quadrado com $\phi = 78,5\%$. A FIGURA 6. 5 (a) mostra a imagem obtida no MEV, do inserto de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas microfresadas e microforjadas. Como no caso dos arranjos com abertura de 2 mm, este também possui boa uniformidade em sua construção, e novamente surgem marcas causadas pelas rebarbas recalçadas no microforjamento derivadas do processo de microfresamento de acordo com a FIGURA 6. 5 (b) e (c).

A FIGURA 6. 5 (d) mostra a réplica dos arranjos de microlentes de PMMA obtidos pelo método da moldagem por injeção exibindo a uniformidade e fidelidade em toda a extensão de sua área. Novamente, na imagem não é possível comprovar com clareza a impressão das marcas causadas pelas rebarbas recalçadas geradas pelo processo de microfresamento, entretanto, com uma ampliação maior, onde se examina apenas uma microlente do arranjo, FIGURA 6. 5 (e), comprova-se a replicação das imperfeições ou defeitos, mais claramente percebidos na FIGURA 6. 5(f).

FIGURA 6. 5 - (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 78,5\%$ e abertura de 1 mm, ampliação de 50x (b) Imagem do molde mostrando apenas uma microlente do arranjo, ampliação de 200x (c) Imagem mostrando os defeitos provocados pelo microfresamento, ampliação de 1000x (d) Reprodução em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 50x (e) Imagem de uma microlente do arranjo replicada, ampliação 200x (f) Replicação dos defeitos causados pelas rebarbas do microfresamento, ampliação 1000x

Para este arranjo foi possível realizar a caracterização com perfilometria óptica. A FIGURA 6. 6 (a) mostra o espectro tridimensional do molde de cobre exibindo novamente as marcas deixadas pela operação de microfresamento e a linha branca que indica o perfil analisado para obter as dimensões de uma das microlentes do arranjo.

A FIGURA 6. 6 (b) exhibe o perfil do arranjo com 0,5010 mm de raio de abertura e 53,1213 μm de comprimento da sagita (profundidade). Isso revela o resultado do processo de calibração da manufatura das microlentes apresentando resultados experimentais muito próximos do cálculo nominal do projeto.

Na FIGURA 6. 6 (c) tem-se o interferograma com análise de franjas para o arranjo. Percebe-se que houve a formação de anéis circulares concêntricos pretos e brancos com distúrbios de forma na parte onde foi realizado o microfresamento, ou seja, os defeitos causados por essa operação acarretaram desvios na frente de onda que, consequentemente, geraram aberrações ópticas.

Subsequentemente, a FIGURA 6. 6 (d) exibe a rugosidade usando o filtro de esfericidade e inclinação e indicando os valores alcançados pela técnica com $R_a = 412 \text{ nm}$, $R_q = 565,31 \text{ nm}$ e $R_t = 4,66 \text{ }\mu\text{m}$. O valor do acabamento superficial foi aproximadamente 60% maior que o valor da rugosidade apresentado na FIGURA 5. 8 da esfera de rolamento de aço. São exibidas também as marcas deixadas pela operação de microfresamento.

FIGURA 6. 6 – Análise no perfilômetro óptico do molde com arranjo de empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ e abertura circular de 1 mm (a) Imagem 3D (b) Perfil (c) Interferograma. (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação

Realizar a caracterização com perfilometria óptica nas microlentes foi uma tarefa muito difícil, pois como o material acrílico é muito transparente, diversas vezes ocorreu a dissipação da luz durante as medidas, dificultando a obtenção dos dados superficiais para esse tipo de tecnologia metrológica. Entretanto, algumas medidas foram conseguidas.

A FIGURA 6. 7 (a) mostra o espectro tridimensional do arranjo de microlentes de PMMA com 1 mm de abertura circular com a linha branca para indicar o perfil analisado. Nas análises por esse método de metrologia, não foi possível distinguir na peça injetada as marcas deixadas pela operação de microfresamento deixadas no molde.

Logo, a FIGURA 6. 7 (b) exhibe o perfil de uma microlente do arranjo com 0,5010 mm de raio de abertura e 50,8633 μm de comprimento da sagita (profundidade). O cálculo da fidelidade no caso, realizado pela relação da equação 3.1, é de aproximadamente 95,7 %, na condição de injeção número 3.

A FIGURA 6. 7 (c) expõe o interferograma com análise de franjas para esse arranjo. Nota-se que ocorreu a formação de anéis circulares perfeitamente concêntricos com cores pretas e brancas. Os distúrbios de forma na frente de onda para a parte onde foi realizado o microfresamento desapareceram nestas imagens, ou seja, os únicos defeitos que causaram desvios na frente de onda foram em função da dificuldade de se medir o arranjo causando tais aberrações.

Na sequência, a FIGURA 6. 7 (d) exhibe a rugosidade usando filtro de esfericidade e inclinação indicando os valores alcançados por essa técnica com $R_a = 416,45 \text{ nm}$, $R_q = 563,36 \text{ nm}$ e $R_t = 12,37 \mu\text{m}$. Os valores ficaram muito próximos aos de rugosidade do molde de cobre, de acordo com os resultados anteriormente vistos.

FIGURA 6. 7 - Arranjo com empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ analisado no perfilômetro óptico da lente de PMMA injetada com e abertura circular de 1 mm (a) Imagem 3D (b) Perfil (c) Interferograma. (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação

6.1.2.4 – Empacotamento completo $\phi = 100\%$ abertura quadrada de 1 mm

Para este conjunto de lentes foi manufaturado um molde de cobre eletrolítico com microlentes de dimensões de 1 mm de abertura quadrada, 1,414 mm de abertura diagonal, sagita com profundidade de 107 μm e empacotamento completo de $\phi = 100\%$.

A FIGURA 6. 8 (a) exhibe o arranjo de microlentes com grande uniformidade em todo o conjunto. As imagens indicam o desaparecimento das microtrincas ocasionadas pelo grande recalque do microforjamento que ocorreu no caso da fabricação das microlentes similares a estas, porém com $\phi = 100\%$ e 2 mm de abertura.

Todavia, as marcas deixadas pela operação de microfresamento surgiram também neste arranjo (FIGURA 6. 8 (b) e (c)), ou seja, todas as microlentes foram danificadas pela operação de manufatura.

A FIGURA 6. 8 (d) mostra a imagem da réplica em PMMA pelo método da moldagem por injeção indicando a boa reprodutibilidade deste meio de produção.

Com ampliação de 200x observa-se apenas uma microlente do conjunto, exposto na FIGURA 6. 8 (e) apontando a reprodução dos defeitos provocados pelo processo de microfresamento no molde, que é melhor analisada na FIGURA 6. 8 (f).

FIGURA 6. 8 - (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 100\%$ e abertura de 1 mm, ampliação de 32x (b) Imagem do molde mostrando apenas uma microlente do arranjo, ampliação de 200x (c) Detalhe indicando as marcas deixadas pelas rebarbas do microfresamento recalcadas, ampliação 1000x (d) Reprodução em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 35x (e) Imagem de uma microlente do arranjo replicada, ampliação 200x (f) Replicação das rebarbas causadas pela operação de microfresamento, ampliação 1000x

Na análise com perfilometria óptica da FIGURA 6. 9 (a) tem-se o espectro tridimensional do molde de cobre exibindo o arranjo com abertura quadrada e indicando as marcas deixadas pela operação de microfresamento e a linha branca, que exhibe o perfil usado para realizar as análises dimensionais.

O perfil do arranjo indicado na imagem anterior é apresentado na FIGURA 6. 9 (b) que mostra uma microlente do arranjo com dimensões de 0,7066 mm para a metade da diagonal de abertura e 109,7 μm de comprimento da sagita (profundidade). Os valores ficaram levemente acima dos valores nominais de projeto (2,7 μm maior na profundidade),

indicando a necessidade de uma pequena calibração no projeto de manufatura para alcançar o valor exato desejado.

Na FIGURA 6. 9 (c) é exposto o interferograma com análise de franjas para o arranjo. Verificando a imagem percebe-se que agora a composição das franjas não é mais formada por anéis circulares concêntricos pretos e brancos, como foi o caso do arranjo de microlentes circulares, ou seja, aqui temos estruturas de franjas deformadas com estruturas pseudoelípticas pretas e brancas com pequenas variações na sua concentricidade, indicando o aparecimento de aberrações conhecidas como distorções ópticas ou distorções geométricas. Essa disposição revela uma distorção devido ao sistema de captação de imagem no interferômetro. Geralmente, isso faz com que as imagens obtidas sofram uma distorção espacial referida na ótica como distorção não-linear.

Adicionalmente, na mesma figura, percebe-se que os defeitos causados pelo microfresamento também causaram desvios na frente de onda, resultando, da mesma forma, no aparecimento de aberrações ópticas.

Para entender o fenômeno ocorrido na imagem anterior, a FIGURA 6. 9 (d) exhibe a rugosidade usando filtro de esfericidade e inclinação indicando os valores alcançados por essa técnica com $R_a = 1,89 \mu\text{m}$, $R_q = 2,42 \mu\text{m}$ e $R_t = 26,09 \mu\text{m}$. Nota-se que estes valores de rugosidade foram muito superiores aos de acabamento superficial encontrados no arranjo com abertura circular. Tal fato se deve à força exercida pelo punção para que seja gerada abertura do tipo quadrada, pois, nesta condição, a profundidade de microforjamento faz com que haja uma interação de deformação plástica entre as microlentes adjacentes já construídas. São exibidas também, nesta figura, as marcas deixadas pela operação de microfresamento.

Portanto, a interatividade do punção na geração de novas microlentes com as já concebidas resultaram em deformações plásticas severas em todo o conjunto de microlentes que, conseqüentemente, aumentou os valores de rugosidade e gerou o aparecimento do fenômeno conhecido como “distorção geométrica da imagem” examinada no interferograma. Isto confirma a necessidade de nova calibração na manufatura deste tipo de conjunto.

FIGURA 6. 9 - Arranjo de empacotamento completo $\phi = 100\%$ analisado no perfilômetro óptico o molde de cobre com abertura quadrada de 1 mm (a) Imagem 3D (b) Perfil. (c) Interferograma (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação

Na sequência, foi feita a caracterização da réplica em PMMA medida no perfilômetro óptico. A FIGURA 6. 10 (a) destaca o espectro da imagem tridimensional indicando a linha de perfil para realizar as análises dimensionais. Na replicação das microlentes, os resultados foram análogos aos do molde, com exceção da capacidade sensível do perfilômetro óptico de não detectar a replicação dos defeitos causados pelo microfresamento.

O perfil do arranjo replicado é apresentado na FIGURA 6. 10 (b) evidenciando uma microlente do conjunto que possui dimensões de 0,7063 mm para a metade da diagonal de abertura e 109,5 μm de comprimento da sagita (profundidade). Estes valores revelam que a fidelidade na replicação calculada pela relação 3.1 ficou em aproximadamente 100%.

O resultado do interferograma da réplica de PMMA está na FIGURA 6. 10 (c), que revela resultados análogos aos do molde, em que a frente de onda da luz possui estruturas de franjas pseudoelípticas pretas e brancas com pequenas variações na sua concentricidade, indicando o aparecimento de aberrações do tipo distorções ópticas ou distorções geométricas

causadas em consequência das tensões impostas pelo punção no microforjamento. Esta configuração não homogênea acarreta uma falsa interpretação das informações que podem ser obtidas a partir de uma imagem que atravessa essa microlente. De tal forma, é essencial a correção da distorção ótica de imagens realizando a calibragem do seu processo produtivo.

Os valores de rugosidade são expostos na FIGURA 6. 10 (d) com $R_a = 1,74 \mu\text{m}$, $R_q = 2,28 \mu\text{m}$ e $R_t = 19,77 \mu\text{m}$, indicando números muito próximos da rugosidade alcançada pelo molde, porém, neste caso, não ficaram evidenciadas as marcas deixadas pelo microfresamento.

FIGURA 6. 10 - Arranjo de empacotamento completo $\phi = 100\%$ analisado no perfilômetro óptico da lente de PMMA injetada com abertura quadrada de 1 mm (a) Imagem 3D (b) Perfil (c) Interferograma (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação

6.1.3 – Arranjo de microlentes esféricas conformadas

Como exposto anteriormente, existe grande dificuldade para se medir com a perfilometria óptica este tipo de estrutura lenticular, entretanto os resultados na caracterização apenas dos moldes foram conseguidos após sucessivas tentativas. Portanto, não foi possível adquirir resultados com o uso da perfilometria óptica para as réplicas de PMMA.

6.1.3.1 – Empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ abertura circular de 2 mm

A FIGURA 6. 11 (a) mostra a imagem obtida no MEV, do arranjo de microlentes esféricas fabricadas pelo processo de microforjamento em um inserto de cobre eletrolítico indicando a grande repetibilidade e uniformidade do processo.

A integridade superficial obtida no conjunto mostrou boa qualidade, mesmo para maiores profundidades de recalque. De acordo FIGURA 6. 11 (b), que expõe apenas uma microlente do conjunto, verifica-se que não ocorreu a geração de microtrincas mesmo em ampliações de 100x e nem defeitos provenientes da técnica de microforjamento. Isto comprova que não há a necessidade de realizar uma operação de microfresamento anterior ao processo de microforjamento na construção do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 78,5\%$ contrariando a teoria defendida por FOREST, SAEZ, HUNTER (2007).

Sucessivamente, a imagem mostra a tangente de cada microlente, que deveria ser dada por um ponto, mas houve a formação de uma aresta, podendo-se inferir que cada microlente ficou com profundidade maior que a almejada. O problema pode ser corrigido por uma nova calibragem do projeto de manufatura.

A reprodução na moldagem por injeção de PMMA do arranjo de microlentes esféricas da FIGURA 6. 11 (c) exhibe uniformidade e fidelidade em toda a extensão de sua área.

Na FIGURA 6. 11 (d) tem-se uma microlente destacada do conjunto exibindo a replicação do mesmo problema que aconteceu no molde.

FIGURA 6. 11 - (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 78,5\%$ e abertura de 2 mm, ampliação de 50x (b) Imagem do molde mostrando apenas uma microlente do arranjo, ampliação de 100x (c) Réplica em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 50x (d) Imagem de uma microlente do arranjo replicada, ampliação 100x

Nesta investigação, a caracterização se torna mais completa com a análise do perfilômetro óptico que é exposto na FIGURA 6. 12 (a), onde é obtido o espectro tridimensional do arranjo indicando a linha branca do perfil examinado.

Conforme a FIGURA 6. 12 (b), o perfil dado por uma microlente do conjunto de lentes é de 1,0020 para o raio de abertura e 247 μm de profundidade corroborando os resultados comentados na FIGURA 6. 11 (b) e evidenciando que o valor da sagita é levemente maior que o seu projeto.

A falha na calibração do processo acarretou nos efeitos mostrados da FIGURA 6. 12 (c), que indicam o comportamento da análise de interferograma de franjas. Na imagem pode-se observar que seu centro é formado por anéis circulares concêntricos, entretanto, à medida que é analisada a borda da microlente, nota-se que sua formação começa a ficar achatada

tendendo ao formato retangular. Isso se deve ao fato da deformação imposta pelo punção ter causado uma profundidade maior que a calculada no projeto, deformando plasticamente as adjacências de cada microlente do conjunto e como consequência causando as aberrações na frente de onda investigada.

A rugosidade superficial é exposta na FIGURA 6. 12 (d) com $R_a = 2,92 \mu\text{m}$, $R_q = 3,63 \mu\text{m}$ e $R_t = 28,45 \mu\text{m}$. Fazendo uma análise qualitativa, o acabamento superficial ficou melhor que a técnica anterior sumindo qualquer formação de microtrincas na estrutura do arranjo. Entretanto, os valores obtidos ficaram muito acima do valor de rugosidade do punção em razão das tensões para o arranjo com abertura de 2 mm serem muito maiores que as tensões usadas na manufatura das microlentes com abertura de 1mm, como será visto adiante.

FIGURA 6. 12 – Arranjo de empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ analisado no perfilômetro óptico o molde de cobre com abertura quadrada de 1 mm (a) Imagem 3D (b) Perfil (c) Interferograma (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação

6.1.3.2 – Empacotamento completo $\phi = 100\%$ abertura quadrada de 2 mm

Conforme descrito anteriormente, em razão da maior profundidade de recalque no microforjamento das microlentes concomitantes à interação da deformação plástica exercida na fabricação de novas microlentes adjacentes às aquelas anteriormente construídas, resultaram na geração de microtrincas na superfície de cada microlente como exibido na FIGURA 6. 13 (a). Apesar disso, o acabamento superficial foi melhor que o acabamento usado na técnica anterior (microfresamento + microforjamento), na qual foram relevantes as consequências dos defeitos procedentes da operação de microforjamento.

Para investigar melhor, a FIGURA 6. 13 (b) destaca uma microlente do arranjo exibindo uma grande área com microfraturas geradas pela ação do grande recalque no microforjamento, que podem ser observadas melhor na FIGURA 6. 13 (c) com ampliação de 250 x.

Na FIGURA 6. 13 (d) é exposta a reprodução do arranjo de microlentes de PMMA obtida pelo método da moldagem por injeção. Embora este arranjo possua geometria de maior complexidade, sua uniformidade, fidelidade e reprodutibilidade no preenchimento foram boas por toda a extensão do arranjo como podemos constatar nesta figura.

Entretanto, para observar melhor as microtrincas reproduzidas por todo o conjunto de microlentes, foi necessária a ampliação de 100 x (FIGURA 6. 13 (e)), em que se destaca uma microlente fabricada do conjunto, mostrando tais defeitos, que podem ser melhor evidenciados na FIGURA 6. 13 (f) com 250 x de ampliação.

FIGURA 6. 13 – (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 100\%$ e abertura de 2mm, ampliação de 50x (b) Imagem do molde mostrando apenas uma microlente do arranjo, ampliação de 100x (c) Detalhe indicando as microtrincas geradas pelo grande recalque causado pelo microforjamento, ampliação 250x (d) Reprodução em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 35x (e) Imagem destacando uma microlente do arranjo replicada, ampliação 100x (f) Replicação das trincas causadas pelo grande recalque do microforjamento, ampliação 1000x

A FIGURA 6. 14 mostra a única caracterização obtida do molde de cobre com arranjo de abertura quadrada com 2 mm de abertura. Na imagem (a) tem-se o espectro da imagem tridimensional indicando a linha do perfil para realizar as análises dimensionais.

O perfil do molde para o arranjo é apresentado na FIGURA 6. 14 (b) destacando uma microlente do conjunto que possui dimensões de 1,4120 mm para a metade da diagonal de abertura e 523,3 μm de comprimento da sagita (profundidade). Os valores mostram que a profundidade de recalque ficou 58 μm acima do valor de projeto. Esta falha pode ser corrigida realizando nova calibragem do arranjo.

O resultado do interferograma do molde exibido na FIGURA 6. 14 (c) revela o aparecimento de franjas com comportamento circular no centro e o achatamento nas extremidades conduzindo a formatos retangulares e indicando o aparecimento de aberrações geométricas em maior escala que os outros arranjos anteriormente mostrados. O aparecimento do fenômeno de distorção geométrica novamente foi causado em consequência das tensões

impostas pelo punção no microforjamento que geraram microfraturas nas microlentes e deformações excessivas que conduziram aos erros de forma.

Como consequência, os valores de rugosidade expostos na FIGURA 6. 14 (d) foram os maiores obtidas com $R_a = 16,29 \mu\text{m}$, $R_q = 21,27 \mu\text{m}$ e $R_t = 174,28 \mu\text{m}$. Na imagem percebe-se também que mesmo com o uso de filtros de esfericidade e inclinação apareceram grandes enrugamentos na superfície produzidos em função do alto recalque no microforjamento.

FIGURA 6. 14 - Arranjo de empacotamento completo $\phi = 100\%$ analisado no perfilômetro óptico da lente de PMMA injetada com abertura quadrada de 2 mm (a) Imagem 3D (b) Perfil (c) Interferograma. (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação

6.1.3.3 – Empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ abertura circular de 1 mm

A FIGURA 6. 15 (a) exibe o conjunto de microlentes microforjadas com grande uniformidade e repetibilidade do arranjo.

A superfície de uma das microlentes do arranjo demonstradas na FIGURA 6. 15 indica bom acabamento superficial livre de imperfeições, ou seja, na fabricação de microlentes usando-se apenas a técnica de microforjamento, o acabamento superficial foi muito superior à técnica combinada com o microfresamento, como será visto na caracterização óptica. Entretanto, são destacadas partes planas entre as microlentes do conjunto que foram causadas pela má calibração do ensaio, resultado de uma profundidade adquirida menor que o projeto mencionado.

As amostras replicadas em PMMA são mostradas na FIGURA 6. 15 (c) com boa uniformidade superficial e reprodutibilidade confirmadas na FIGURA 6. 15 (d), onde uma microlente é analisada demonstrando resultados análogos aos do molde de sua fabricação.

FIGURA 6. 15 - (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 78,5\%$ e abertura de 1 mm, ampliação de 50x (b) Imagem do molde mostrando apenas uma microlente do arranjo, ampliação de 200x (c) Reprodução em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 50x (e) Imagem de uma microlente do arranjo replicada, ampliação 200x

A FIGURA 6. 16 (a) mostra o espectro tridimensional do molde de cobre exibindo o arranjo com abertura quadrada e indicando o perfil que será usado para realizar as análises dimensionais.

Para este arranjo, o raio de abertura ficou com 0,4844 mm e 47,8079 μm de sagita. O erro foi provocado pela falta de recalque no punção fazendo com que o perfil possua partes planas nos picos ao invés de cantos vivos.

Subsequentemente, interferograma com análise de franjas é exibido na FIGURA 6. 16 (c) com estruturas perfeitamente circulares e concêntricas. Este foi o único caso livre de aberrações geométricas, pois o recalque foi menor do que nos outros casos, não ocorrendo deformações plásticas decorrentes da interação entre microlentes adjacentes ou formação de microtrincas que seriam indesejáveis, ou seja, apenas as aberrações provenientes do formato esférico poderiam ser detectadas pelo motivo da construção de sua própria geometria.

Como consequência, os resultados de rugosidade da FIGURA 6. 16 (d) ficaram muito próximos do valor do punção que executou o serviço de microforjamento com $R_a = 262,84\text{nm}$, $R_q = 325,43\text{nm}$ e $R_t = 2,34 \mu\text{m}$, isto é, em relação a esfera de aço os valores ficaram 4,2 % maior para o R_a , 5,7 % maior para R_q e 35,35% menor para R_t . Isso expressa a ductilidade do material em obter a impressão e reprodutibilidade executada pelo punção e, como efeito, obtém boa integridade superficial.

FIGURA 6. 16 - Arranjo com empacotamento quadrado $\phi = 78,5\%$ analisado no perfilômetro óptico do molde de cobre com abertura circular de 1 mm (a) Imagem 3D (b) Perfil (c) Interferograma (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação

6.1.3.4 – Empacotamento completo $\phi = 100\%$ abertura quadrada de 1 mm

O molde de cobre eletrolítico para o arranjo de $\phi = 100\%$ e abertura quadrada de 1 mm é exposto na FIGURA 6. 17 (a). Nota-se a grande uniformidade e repetição do processo de fabricação.

A FIGURA 6. 17 (b) mostra uma microlente do arranjo indicando que não houve formação de microtrincas pelo motivo do baixo recalque imposto pela esfera do punção.

Logo após, tem-se a replicação das amostras de PMMA mostrando a fidelidade e reprodutibilidade na FIGURA 6. 17 (c).

A avaliação de uma microlente do arranjo, na FIGURA 6. 17 (d), mostra o bom acabamento superficial obtido.

FIGURA 6. 17 – (a) Molde de cobre eletrolítico do arranjo de microlentes esféricas com $\phi = 100\%$ e abertura de 1 mm, ampliação de 33x (b) Imagem do molde mostrando apenas uma microlente do arranjo, ampliação de 200x (c) Reprodução em PMMA do respectivo arranjo de microlentes esféricas pela moldagem por injeção, ampliação de 35x (d) Imagem de uma microlente do arranjo replicada, ampliação 200x

Para avaliar de forma quantitativa, a FIGURA 6. 18 (a) expõe o espectro tridimensional do arranjo indicando a linha branca do perfil analisado.

Na segunda imagem, FIGURA 6. 18 (b), tem-se as dimensões de uma microlente do arranjo completo com 0,7077 mm da metade da abertura diagonal e 107,8 μm de tamanho da sagita. O processo de calibragem no arranjo ficou próximo ao calculado no projeto.

Entretanto, na FIGURA 6. 18 (c), o interferograma exhibe a estrutura de franjas com pseudoelipses formadas indicando o aparecimento da aberração de distorção geométrica.

Tal fato resultou no aumento da rugosidade superficial mostrado na FIGURA 6. 18 (c) com valores de $R_a = 1,59 \mu\text{m}$, $R_q = 2,23 \mu\text{m}$ e $R_t = 19,37 \mu\text{m}$, mas não foi suficiente para superar os valores do acabamento superficial determinado pela técnica combinada de microfresamento e microforjamento.

FIGURA 6. 18 - Arranjo de empacotamento completo $\phi = 100\%$ analisado no perfilômetro óptico da lente de PMMA injetada com abertura quadrada de 1 mm. (a) Imagem 3D (b) Perfil (c) Interferograma (d) Rugosidade analisada com filtro de esfericidade e inclinação

Portanto, o melhor procedimento para construir os arranjos de microlentes esféricas foi com o uso único da técnica de microforjamento, com baixo grau de recalque. Conforme

descrito, a operação de microfresamento com o objetivo de retirar material da cavidade prioritariamente ao processo de acabamento final só funciona na teoria, pois, na prática, o que aconteceu foi a danificação severa dos moldes, reproduzindo defeitos gerados por rebarbas nas microlentes que conduziram às aberrações ópticas, adicionalmente, criou-se mais uma operação de manufatura, incidindo em maiores custos na cadeia produtiva.

Consequentemente, na primeira parte do trabalho pode-se concluir que obter arranjos de dimensões com tolerâncias extremamente apertadas e acabamento superficial óptico é uma tarefa árdua e difícil.

6.2 - Lente de Fresnel

6.2.1 – Lente de Fresnel convexa com altura constante

Neste trabalho foram construídas microlentes com paredes muito delgadas, mantidas superfícies espelhadas em virtude do uso de ferramenta de corte de diamante com ponta arredondada.

As lentes de Fresnel possuem projetos com o eixo óptico simétrico. O raio de ponta da ferramenta usada na construção do molde côncavo dessa microlente possui 100 μm . Como o raio da ferramenta não pode ser infinitesimalmente zero, o perfil do molde será levemente diferente do projeto inicial, no qual, usualmente, o projeto designa a base ou os picos como sendo zero e o raio finito será uma das fontes de erro que afetará o desempenho óptico do inserto da lente.

As lentes foram projetadas para serem usadas nos domínios paraxiais. A lente possui 30 zonas de Fresnel. Seu perfil de fase é anesférico com distância focal de 480 mm, o que resulta em um $f/\# = 20$.

A máxima sagita da lente ou altura fixa é de apenas 10 μm , mas com larguras das zonas variáveis.

No projeto, considerando o comprimento de onda da luz do laser de Hélio-Neônio com λ igual a 632,8 nm e índice de refração do material plástico (polimetacrilato de metila) n igual a 1,49 temos que a característica de altura é:

$$h = \frac{\lambda}{(n-1)} \quad (6.1)$$

o que resulta em aproximadamente 1,3 μm para a lente.

O local de transição para cada zona ocorre em $r_p^2 = 2\lambda p h$ (onde $p = 0, 1, 2, 3, \dots, 30$ é um número inteiro).

A FIGURA 6. 19 mostra dois insertos das lentes de Fresnel indicando a superfície óptica espelhada. O molde côncavo da imagem (a) foi usado na termomoldagem possuindo $\phi = 25,0$ mm com sua réplica convexa representada na FIGURA 6. 19 (b), e o molde côncavo da FIGURA 6. 19 (c) foi usado na moldagem por injeção com $\phi = 50,0$ mm com sua réplica convexa exibida na FIGURA 6. 19 (d). Na moldagem por injeção, as zonas de Fresnel foram divididas em duas regiões para efeitos de estudos. A região A foi designada para as zonas mais próximas do bico de injeção, enquanto a região B, para as zonas mais afastadas da bucha

de injeção. A razão de distinguir em duas regiões se deve ao fato de que, durante o escoamento de um fluido, ocorrem perdas de pressão em função do atrito nas paredes do molde, mostradas no tópico 6.4 que descreve a simulação da injeção.

O perfil analisado é representado por uma linha preta que está no mesmo sentido do fluxo de escoamento, pois o preenchimento é mais difícil nas microcavidades transversais ao fluxo.

FIGURA 6. 19 – (a) Molde côncavo da lente de Fresnel com altura constante em cobre eletrolítico usado na termomoldagem (b) Lente de Fresnel convexa de PMMA com altura constante de 10 μm reproduzida por meio da moldagem por prensagem a quente (c) Molde côncavo da lente de Fresnel em cobre eletrolítico usada na moldagem por microinjeção (d) Réplica da lente de Fresnel convexa de PMMA injetada com altura constante de 10 μm

Para caracterizar qualitativamente as arestas delgadas do molde da lente de Fresnel foi usado o microscópio eletrônico de varredura.

A FIGURA 6. 21 (a) mostra o centro do molde côncavo de cobre eletrolítico da lente de Fresnel com altura constante de 10 μm . Das 30 zonas de Fresnel, 28 são mostradas na imagem com indicação de um defeito comum que ocorre em operações de usinagem no processo de faceamento. No centro da peça surge uma protuberância (FIGURA 6. 21 (b)) por causa da dificuldade de se alinhar perfeitamente a ferramenta de corte com o centro da placa do torno. Isso é extremamente ruim na produção de microlentes, pois a protuberância é gerada exatamente no eixo óptico, resultando no aparecimento de aberrações, prejudicando o desempenho da lente. Tal problema pode ser sanado realizando o processo de calibração da centragem da ferramenta de corte. Como a protuberância possui formato cônico, pode-se

concluir que a má centralização da ferramenta de corte está acima da linha de centro da placa de vácuo do torno, portanto deve-se baixá-la em $75\text{ }\mu\text{m}$.

Na FIGURA 6. 21 (c) tem-se a imagem ampliada dos degraus da zona de Fresnel. Esta ampliação mostra que o degrau entre uma zona e outra é formado por uma aresta delgada muito bem definida. Outro fato notável foi a aparição de pequenas saliências nos degraus, o que pode ter ocorrido em virtude de algum problema cinemático da máquina enquanto a ferramenta realizava o movimento de mergulho de corte no molde. Provavelmente, este fato aconteceu em decorrência do fenômeno conhecido como “stick slip”.

O efeito “stick slip” é observado quando há mudança de posição alternando entre deslizamentos (“slip”) e paradas (“stick”) e ocorre em movimentos de translação ou rotação com baixa velocidade de avanço. Em velocidades de avanço pequenas (5 a 20 mm/min), a película de óleo lubrificante é rompida e ocorre atrito estático. Na microusinagem usada no trabalho o avanço foi de $2,5\text{ mm/min}$, ou seja, o valor foi muito pequeno.

Adicionalmente, o projeto da lente de Fresnel fez com que para cada degrau da zona houvesse um deslocamento em x, ou seja, a ferramenta de corte não fez o movimento de mergulho seco na construção do molde conforme exposto na FIGURA 6. 20. Na imagem (b) nota-se que o avanço do componente do carro em x foi de apenas 928 nm/rev , isto é, o pequeno avanço do componente de deslocamento do carro no eixo X pode ter ocasionado o fenômeno de “stick slip”.

FIGURA 6. 20 – Vetores em Z, X e R (resultante) (a) Deslocamento (b) Avanço

Outro fato que comprova tal fenômeno é a existência de 4 degraus, ou seja, $10/2,5 = 4$ que significa $10\text{ }\mu\text{m}$ do tamanho da altura do degrau da microlente e $2,5\text{ }\mu\text{m/rev}$ a frequência de avanço usada nos ensaios de microusinagem.

Para entender o fenômeno, pode-se dizer que os elementos de transmissão (correias e fusos) possuem comportamento elástico e se deformam quando o motor é acionado. Uma

força elástica crescente é aplicada sobre o carro até que o atrito estático seja superado. O movimento acontece e a força de atrito que se opõe ao movimento diminui (o atrito passa a ser cinético), reduzindo a deformação dos elementos de transmissão e, conseqüentemente, a força aplicada. Isso provoca uma nova parada do carro, restabelecendo-se o atrito estático. Novos deslizamentos e paradas podem se repetir, proporcionando erros e defeitos de usinagem. Cabe salientar que o efeito “stick slip” ocorre na usinagem de peças com arestas arredondadas, uma vez que é realizada pela composição de movimentos de mais de um carro (este tipo de geometria de peça, geralmente, necessita baixa velocidade em algum carro para ser usinada).

Embora as guias do torno sejam hidrostáticas (guias e barramentos construídos de forma a reduzir a potência dos servomotores para acionamento dos carros porta-ferramentas, nos barramentos cilíndricos é injetado entre a guia e o corpo a ela ligado, óleo sob pressão. Este sistema é denominado de “cama hidrostática” ou “barramento hidrostático”, e reduz a força de atrito à quase zero), há indício de que o fenômeno de “stick slip” ocorreu como visto nos moldes.

Para solucionar o problema de “stick slip” o *software* LF2010 foi modificado de forma que a ferramenta, durante o mergulho de corte, faça-o secamente, ou seja, sem componentes no eixo de deslocamento em x. Com base nisso, não apareceu o fenômeno nos moldes para lente de Fresnel com altura variável.

A réplica de PMMA da lente de Fresnel convexa e altura constante de 10 μm fabricada pelo processo de termomoldagem é mostrada na FIGURA 6. 21 (d), destacando o defeito causado pela protuberância do molde perfeitamente replicado conforme a FIGURA 6. 21 (e).

Na sequência, a FIGURA 6. 21 (f) exhibe o degrau de Fresnel com a aresta entre uma zona e outra perfeitamente definida, e as mesmas 4 saliências ou defeitos ocasionados pelo fenômeno de “stick slip” também replicados, revelando o grande grau de fidelidade proporcionado pelo processo de termomoldagem.

A réplica de PMMA moldada por injeção das 30 zonas da microlente de Fresnel convexa e altura constante de 10 μm é exibida na FIGURA 6. 21 (g), que também replicou a saliência causada pela descentralização da ferramenta de corte, exposta mais claramente na FIGURA 6. 21 (h), onde é exibido o tamanho do diâmetro do defeito, de 141 μm de abertura.

Entretanto, na moldagem por injeção, a aresta que divide uma zona para outra não se formou, conforme a FIGURA 6. 21 (i). O que houve foi a formação de um perfil com contorno arredondado, indicando a baixa fidelidade do processo de replicação da moldagem

por injeção. Em função disso, também não foram replicadas as saliências ou defeitos ocasionados pelo fenômeno de “stick slip”.

FIGURA 6. 21 – (a) Microscopia eletrônica de varredura do molde côncavo da lente de Fresnel com altura constante de 10 μm (b) Defeito causado pela falta de centralização da ferramenta de corte de diamante. (c) Degraus da zona de Fresnel mostrando a aresta bem definida e a ocorrência do fenômeno conhecido como “stick slip”. (d) Microlente termomoldada de Fresnel convexa com 30 zonas. (e) Defeito causado pela operação de faceamento reproduzido na microlente. (f) Aresta do degrau da zona de Fresnel bem definida e reprodução do fenômeno de “stick-slip”. (g) Microlente injetada de Fresnel convexa com 30 zonas. (h) Defeito reproduzido no eixo óptico da lente. (i) Degrau da zona de Fresnel com perfil arredondado decorrente da baixa fidelidade na replicação.

No sentido de realizar uma análise quantitativa dos dados obtidos dos processos de fabricação dos moldes e réplicas, assim como os respectivos acabamentos superficiais, foi necessário recorrer às investigações com o uso do perfilômetro óptico. Com este instrumento foi possível analisar diversas características tais como: perfil da lente, defeitos, razão de aspecto e fidelidade de replicação. De tal modo, por meio desse instrumento foram examinadas as diferenças entre o molde, a réplica termomoldada e a réplica injetada.

A FIGURA 6. 22 mostra a distância de 75,5023 μm da descentralização da ferramenta que causou um defeito com altura de 18,4496 μm .

FIGURA 6. 22 – (a) Perfil do defeito causado pela falta de centralização da ferramenta de corte (b) Imagem 3D da protuberância

A FIGURA 6. 23 (a) e (b) exibe o perfil de Fresnel com altura constante de 10 μm do molde de cobre eletrolítico destacando a altura real de 9,9513 μm para a 2^a zona e 10,0055 μm para a 30^a zona, respectivamente.

A FIGURA 6. 23 (c) e (d) mostra o perfil da lente de Fresnel replicada em PMMA pelo processo de termomoldagem indicando a altura real de 9,9299 μm para a 2^a zona e 10,0083 μm para a 30^a zona, respectivamente. Isto denota a grande fidelidade no processo de replicação por prensagem a quente, que foi de aproximadamente 100% para todas as zonas como será descrito nos gráficos de fidelidade.

Subsequentemente, tem-se, na FIGURA 6. 23 (e) e (f), o perfil da microlente de Fresnel replicada em PMMA pelo processo de injeção. Em tal caso, a altura real foi de 10,0039 μm para a 2^a zona e 7,2661 μm para a 30^a zona. Portanto, a fidelidade foi de aproximadamente 100% para as zonas do centro e 73% para a última zona do μEOD . Percebe-se também que o perfil ficou com os picos arredondados, ao invés de cantos vivos conforme visto no MEV.

FIGURA 6. 23 – Perfil (a) Molde exibindo a altura da 1ª para 2ª zona (b) Molde exibindo a altura da 30ª zona (c) Réplica termomoldada exibindo a altura da 1ª para 2ª zona (d) Réplica termomoldada exibindo a altura da 30ª zona (e) Réplica injetada na condição n. 1 exibindo a altura da 1ª para 2ª zona. (f) Réplica injetada exibindo a altura da 30ª zona

Com o objetivo de caracterizar o comportamento da fidelidade no preenchimento das microcavidades da microlente de Fresnel, foi realizado um total de 1320 análises, investigando os moldes de cobre, as réplicas de PMMA prensadas demonstradas FIGURA 5. 20 e as regiões A e B das amostras injetadas exibidas na FIGURA 6. 19 (d) pertinente às condições de 1-6 da TABELA 5. 8.

A FIGURA 6. 24 exibe a porcentagem da fidelidade na replicação da microlente de Fresnel com altura constante realizada na região A. O gráfico indica que a amostra termomoldada possui fidelidade de aproximadamente 100% para todas as zonas.

Entretanto, as amostras injetadas nos parâmetros de injeção de 1 até 6 indicam que a fidelidade foi entre 100 e 105% das zonas de 1-5. Este valor, maior que o do molde, sugere a existência do fenômeno conhecido como “*overpacking*”.

Logo, nas últimas zonas para a condição de n. 1, que foi a de menor pressão de injeção, a fidelidade na última zona foi de 75%. O melhor resultado da fidelidade na referida zona foi para o parâmetro de número 4 com 95%. A diferença de preenchimento que exibiu uma tendência de queda nas últimas zonas ocorre em função da maior razão de aspecto das mesmas. Para as outras condições, os resultados de preenchimento da 25^a a 30^a zona ficaram na faixa de 85% a 90%.

Outro fator importante é a razão de superfície/volume para este microelemento. Foi descrito anteriormente que a lente de Fresnel com altura constante de 10 μm possui relação superfície/volume de $195,967 \text{ mm}^{-1}$, o que significa um valor 5 vezes maior que a lente de altura variável. Consequentemente, em razão dos fatos discutidos na revisão bibliográfica, o preenchimento das microcavidades para esta microlente foi muito mais difícil.

Prosseguindo, o gráfico de fidelidade na região B da microlente de Fresnel é exibido na FIGURA 6. 24, onde é possível perceber que a fidelidade no processo de termomoldagem não sofre influência do fenômeno de perda. Entretanto, na microinjeção, em função das perdas de pressão decorrentes do atrito gerado nas paredes do molde, sobrevieram piores valores de fidelidade na região B, em comparação àqueles apresentados pela região A.

Na injeção da microlente de Fresnel com altura constante de 10 μm na condição n. 1 nota-se que as zonas de 23 até 30 ficaram muito próximas de 75%, ou seja, foram menores que na região A, a qual teve valores acima de 80%. Esta diferença de preenchimento exibindo tendência de queda nas últimas zonas também ocorreu em função da maior razão de aspecto das mesmas.

Para as outras condições, os resultados de preenchimento da 25^a a 30^a zona ficaram na faixa de 80% a 89% na região B, ou seja, de 10% a 5 % menor que a região A.

Outro fato importante indicado no gráfico é que o fenômeno de “*overpacking*” ocorrido da 1^a a 5^a zonas foi maior que no caso anterior, chegando a valores de até 109% para a condição de n. 6. Isto pode gerar tensões residuais nas microlentes criando aberrações ópticas.

FIGURA 6. 24 – Gráfico de fidelidade das zonas de Fresnel com altura constante de 10 µm na região A, comparando os processos de termomoldagem e injeção

FIGURA 6. 25 - Gráfico de fidelidade das zonas de Fresnel com altura constante de 10 µm na região B, comparando os processos de termomoldagem e injeção.

De qualquer modo, para componentes ópticos em que a funcionalidade óptica é o fator mais importante para fabricantes e consumidores, estas lentes podem perfeitamente ser empregadas.

O espectro do molde das primeiras e últimas zonas exibindo o interferograma com franjas interferométricas está na FIGURA 6. 26. A imagem (a) mostra os resultados do molde, nos quais as franjas interferométricas são formadas por círculos extremamente concêntricos, entretanto surge uma aberração proveniente da má centralização da ferramenta de corte. Na figura (b) tem-se a formação de franjas com aberrações causadas pela protuberância e pelas conhecidas como coma. Este efeito pode ter sido causado pela desmoldagem da microlente que resultou no empenamento da amostra. Na ilustração (c), é exposto o espectro tridimensional da réplica injetada com sua estrutura análoga ao molde, no qual franjas interferométricas foram formadas por anéis circulares concêntricos.

FIGURA 6. 26 – Espectro das primeiras e últimas zonas exibindo as franjas interferométricas do (a) Molde côncavo (b) Réplica convexa termomoldada. (c) Réplica convexa injetada

A avaliação do acabamento superficial do molde, das réplicas termomoldadas e injetadas é exposta na TABELA 6. 1, sendo feitas duas medidas, a saber: a primeira é mensurada na parte plana da lente com medidas contendo filtro de inclinação e a segunda é designada na parte central da lente realizando medidas com filtro de inclinação inserindo-se mais o filtro de esfericidade. Os resultados das rugosidades do molde de cobre e da microlente injetada ficaram muito próximos, entretanto os valores da réplica prensada ficaram muito mais elevados em relação ao molde em função, talvez, da formação de rebarbas.

TABELA 6. 1 – Rugosidade do molde de cobre eletrolítico e das réplicas da lente de altura constante convexa de PMMA termomoldada e injetada.

Rugosidade	Molde		Réplica Prensada		Réplica Injetada	
	Plana	Filtro	Plana	Filtro	Plana	Filtro
Ra (nm)	16,61	32,35	157,93	101,19	10,20	35,70
Rq (nm)	21,40	43,56	321,08	198,88	13,56	49,29
Rt (nm)	971,95	1310	7010	9,05	363,06	1100

Este resultado foi muito satisfatório, pois, como visto na literatura, para superfícies ópticas a rugosidade deve ser de aproximadamente 10 a 20 vezes menor que o comprimento de onda da luz ($\lambda/10$ ou $\lambda/20$). Considerando o comprimento de onda luz do laser de Hélio-Neônio com λ igual a 632,8 nm, tem-se o valor de rugosidade $R_q = 31,64$ nm. Significa que os componentes ópticos injetados ficaram dentro desse parâmetro, ou seja, as microlentes de Fresnel podem ser perfeitamente operacionais em comprimentos de luz próximos ao infravermelho com grande grau de precisão.

6.2.2 – Lente de Fresnel convexa com altura variável

As lentes de Fresnel convexas com altura variável também foram projetadas para serem usadas nos domínios paraxiais. A microlente de altura variável possui 40 zonas de Fresnel. Seu perfil de fase é anesférico com distância focal de 70 mm, o que resulta em $f/\# = 3,5$.

O menor valor do comprimento da sagita que a microlente possui é de 930 nm e o valor máximo é de 73,57 μm com larguras das zonas constantes em 250 μm .

A FIGURA 6. 27 (a) mostra o molde côncavo de cobre eletrolítico da lente de Fresnel com largura constante de 250 μm . Na imagem (b) tem-se a ampliação do degrau que separa uma zona da outra com aresta muito bem definida gerada pelo torneamento com ferramenta de diamante e a ausência do fenômeno de “stick slip” na parede delgada do molde. Após, na fotografia (c), verifica-se a protuberância causada pela má centralização da ferramenta, todavia, desta vez, o formato é cilíndrico indicando que a ferramenta de corte estava abaixo da linha de centro da placa de vácuo do torno. Para eliminá-la, portanto, deve-se subir a ferramenta de corte de diamante em 20 μm aproximadamente.

A réplica convexa injetada na condição n. 3 está na FIGURA 6. 27 (d), na qual tem-se as 40 zonas impressas em PMMA. A imagem (e) mostra que, ao contrário do caso anterior, a aresta de corte ficou bem definida, o que se deve à razão superfície/volume que será discutida nos gráficos de fidelidade. Na fotografia (f) tem-se a replicação da protuberância causada pela má centralização da ferramenta de corte.

A microlente convexa termomoldada é exibida na FIGURA 6. 27 (g) com as 40 zonas de Fresnel convexa e arestas bem definidas mostradas na imagem (h). Na fotografia (f) tem-se a ampliação de 3000 x do centro da lente, mostrando-se que não houve reprodução da protuberância, pois, em tal caso, a ferramenta de corte estava calibrada na produção do molde.

FIGURA 6. 27 - (a) Microscopia eletrônica de varredura do molde côncavo da lente de Fresnel com altura variável e largura constante de 250 μm (b) Degraus da zona de Fresnel mostrando a aresta bem definida (c) Protuberância causada pela má centralização da ferramenta com formato cilíndrico. (d) Microlente injetada de Fresnel convexa com 40 zonas. (e) Degrau da zona de Fresnel com aresta bem definida. (f) Protuberância replicada (g) Microlente termomoldada de Fresnel convexa com 40 zonas. (h) Aresta do degrau da zona de Fresnel bem definida (i) Ausência da protuberância, ferramenta calibrada.

O perfil de Fresnel com altura variável e largura constante de 250 μm do molde de cobre eletrolítico côncavo está na FIGURA 6. 28 (a), com a altura real de 936,1 nm na 1^a zona e largura de 252,2 μm . Na imagem (b) tem-se a altura real da 40^a zona com 73,1908 μm e largura de 252,2 μm .

FIGURA 6. 28 - Perfil (a) Molde exibindo a altura da 1ª zona. (b) Molde exibindo a altura da 40ª zona. (c) Réplica termomoldada exibindo a altura da 1ª zona. (d) Réplica termomoldada exibindo a altura da 30ª zona. (e) Réplica injetada exibindo na condição n. 1 a altura da 1ª zona. (f) Réplica injetada exibindo a altura da 40ª zona.

A FIGURA 6. 28 (c) e (d) mostram o perfil da lente de Fresnel replicada em PMMA pelo processo de termomoldagem indicando a altura real de 922,3 nm para a 1ª zona e largura de 255,5 μm e, para a 40ª zona, a altura ficou com 71,4752 μm indicando grande fidelidade no processo de replicação por prensagem a quente novamente, que foi de aproximadamente 100% para todas as zonas como será descrito nos gráficos de fidelidade.

Subsequentemente, tem-se, na FIGURA 6. 28 (e) e (f), o perfil da microlente de Fresnel replicada em PMMA pelo processo de injeção na condição de n. 1. Em tal caso, a altura real foi de 901,1 nm μm para a 1ª zona e 65,2727 μm para a 40ª zona. Portanto, a

fidelidade foi de aproximadamente 100% para as zonas do centro e 89% para a última zona do μ EOD. Logo, a fidelidade no caso das microlentes de Fresnel com altura variável ficou melhor.

Isto se deve à razão de superfície/volume que, neste caso, foi menor, conforme será descrito no gráfico de fidelidade a seguir.

O gráfico de fidelidade na região A está na FIGURA 6. 29.

Nas zonas de 1 a 10 constata-se o aparecimento do fenômeno de “*overpacking*” com fidelidades chegando a 120%, lembrando-se que a altura da primeira zona é de 930nm e a menor deformação elástica provocada no molde para a região incorrerá em aumentos excessivos no valor da fidelidade.

Percebe-se que, dessa vez, a reprodução ficou melhor para todas as zonas, ou seja, todas as condições injetadas permaneceram acima de 90% de fidelidade, o que pode ser explicado pela razão de superfície/volume, que no caso foi de $41,15 \text{ mm}^{-1}$, portanto, cinco vezes menor que a microlente com altura constante de 10 μm . Portanto, as propriedades físicas e mecânicas serão ditadas pelo substrato e não pela camada superficial como foi no caso anterior. Consequentemente, o substrato se mantém suficientemente aquecido para que o preenchimento seja executado de forma que a fidelidade seja melhorada.

Testes com o auxílio do LF2010 mostraram que a microlente com o mesmo projeto (distância focal, raio de curvatura e raio de abertura), porém com altura constante possuirá menor volume, o que acarretará na razão superfície/volume maior. Por exemplo, para uma microlente análoga a esta, mas com altura constante, recalculando-se os valores, o seu volume será de $5,852 \text{ mm}^3$, altura constante de 37,3 μm com a mesma área superficial de $321,035 \text{ mm}^2$ e, portanto, resultará em uma relação superfície/volume de $54,85 \text{ mm}^{-1}$, uma diferença de $13,7 \text{ mm}^{-1}$ maior. Conclui-se que construir lentes com altura variável é a melhor opção para a fabricação de microelementos ópticos difrativos por causa da razão superfície/volume. Entretanto, vale ressaltar que se a escala for para macroelementos ópticos difrativos, a escolha melhor será a razão superfície/volume maior, para que seja economizado material.

Na sequência, a FIGURA 6. 30 expõe o gráfico de fidelidade na região B da microlente. Percebe-se que o comportamento da condição de n. 1 possui queda acentuada chegando a 56% de fidelidade para a 40ª zona. O fenômeno do “*overpacking*” aconteceu nas 5 primeiras zonas chegando a 111% de fidelidade nas condições de maiores pressões de injeção. As condições de n. 2 até n. 6 tiveram o comportamento semelhante ao da região A, ou seja, todas as zonas ficaram acima da faixa dos 90% de fidelidade.

FIGURA 6. 29 - Gráfico de fidelidade das zonas de Fresnel convexas com altura variável e largura constante de 250 µm na região A, comparando os processos de termomoldagem e injeção.

FIGURA 6. 30 - Gráfico de fidelidade das zonas de Fresnel convexas com altura variável e largura constante de 250 µm na região B, comparando os processos de termomoldagem e injeção

O espectro do molde das primeiras e últimas zonas exibindo o interferograma com franjas interferométricas está na FIGURA 6. 31. A imagem (a) mostra os resultados do molde, em que as franjas interferométricas são formadas por círculos extremamente concêntricos. Neste caso surge também a aberração proveniente da má centralização da ferramenta de corte, mas apenas no molde.

De acordo com os resultados do MEV para a réplica termomoldada a ferramenta de corte de diamante, em função do pré-set bem realizado, ficou muito bem centralizada, eliminando a formação da protuberância. Portanto, na figura (b) tem-se a formação de franjas perfeitamente concêntricas e livres de aberrações causadas principalmente pela: 1) protuberância; 2) erros de coma originados da desmoldagem da microlente que resultariam em seu empenamento; 3) ou de distorção geométrica, como no caso dos arranjos esféricos.

Na ilustração (c) é exposto o espectro tridimensional da réplica injetada com sua estrutura análoga ao molde, no qual franjas interferométricas foram formadas por anéis circulares concêntricos e livres de aberrações. Em todos os casos, o maior número de anéis de linhas pares pretas e brancas por mm se justifica em função do raio de curvatura da microlente de Fresnel que, no caso da altura variável, é muito menor.

O acabamento superficial avaliado nas microlentes injetadas, termomoldadas e também do inserto de cobre estão na TABELA 6. 2, mostrando duas partes mensuradas, a primeira na parte plana da lente com medidas contendo filtro de inclinação e a segunda, na parte central da lente realizando medidas com filtro de inclinação adicionando-se o filtro de esfericidade.

Outra vez a rugosidade da peça injetada ficou próxima à rugosidade do molde de cobre ficando dentro das especificações ópticas, isto é, abaixo de $R_q = 31,64$ nm. Já a da peça termomoldada ficou em torno de 4x superior, ou seja, o acabamento superficial foi insatisfatório em razão, talvez, da formação de rebarbas. Portanto, o processo de prensagem a quente se torna impróprio para uso em aplicações ópticas de precisão.

FIGURA 6. 31 - Espectro das primeiras e últimas zonas exibindo as franjas interferométricas do (a) Molde côncavo (b) Réplica convexa termomoldada. (c) Réplica convexa injetada

TABELA 6. 2 - Rugosidade do molde de cobre eletrolítico e das réplicas da lente de altura variável convexa de PMMA termomoldada e injetada.

Rugosidade	Molde		Réplica Prensada		Réplica Injetada	
	Plana	Filtro	Plana	Filtro	Plana	Filtro
Ra (nm)	26,68	28,34	107,5	35,61	31,28	24,59
Rq (nm)	33,49	38,49	144,81	52,62	39,13	31,48
Rt (nm)	650,88	321,07	3840	589,84	718,27	240,05

6.2.3 – Lente de Fresnel côncava com altura variável

O projeto da lente de Fresnel côncava com altura variável é parecido ao do tópico anterior com a exceção de que agora a microlente é côncava e o molde de cobre, convexo.

A FIGURA 6. 32 (a) mostra as zonas de Fresnel convexas no molde de cobre eletrolítico e a imagem (b), a aresta que separa uma zona da outra com a aresta bem definida. Na fotografia (c) observam-se as marcas deixadas pelo passo da ferramenta de corte de diamante, exibindo o espaçamento em função do avanço de 2,5 $\mu\text{m}/\text{rev}$.

A FIGURA 6. 32 (d) é a réplica injetada expondo as 40 zonas de Fresnel com largura constante de 250 μm . Na imagem (e), a aresta que divide uma zona da outra com razoável definição e, na (f), a protuberância replicada no eixo óptico da lente.

FIGURA 6. 32 - (a) Microscopia eletrônica de varredura do molde convexo da lente de Fresnel com altura variável e largura constante de 250 μm (b) Degraus da zona de Fresnel mostrando a aresta bem definida (c) Marcas da ferramenta em função do avanço de corte de 2,5 $\mu\text{m}/\text{rev}$. (d) Microlente injetada de Fresnel côncava com 40 zonas. (e) Degrau da zona de Fresnel com aresta razoavelmente definida (f) Protuberância no centro da lente replicada

Nesta seção não foi construído o molde para termomoldagem.

O perfil de Fresnel com altura variável e largura constante de 250 μm do molde de cobre eletrolítico convexo está na FIGURA 6. 33 (a), destacando-se a altura real de 927,6 nm na 1ª zona e largura de 252,2 μm . Na imagem (b) tem-se a altura real da 40ª zona com 66,2280 μm e largura de 252,2 μm .

Subsequentemente, tem-se o perfil da microlente de Fresnel replicada em PMMA pelo processo de injeção da condição de n. 1 na FIGURA 6. 33 (c) e (d). A altura real foi de 936,6 nm para a 1ª zona e 69,9359 μm para a 40ª. Portanto, as fidelidades no caso das microlentes de Fresnel com altura variável ficaram melhores.

Isso se deve à razão de superfície/volume que, nesse caso, foi menor conforme será descrito no gráfico de fidelidade a seguir.

FIGURA 6. 33 - Perfil (a) Molde convexo exibindo a altura da 1ª zona (b) Molde exibindo a altura da 40ª zona (c) Réplica injetada exibindo na condição n. 1 a altura da 1ª zona (d) Réplica injetada exibindo a altura da 40ª zona

Os gráficos de fidelidade da FIGURA 6. 34 ficaram muito parecidos com os gráficos do tópico anterior, tendo havido uma pequena variação da fidelidade diminuindo em torno de 5% a razão de fidelidade. Então, com exceção da condição de injeção n. 1, as faixas da

fidelidade na replicação ficaram em torno de 85 a 95 %, comprovando o efeito da relação superfície/volume. A fidelidade da amostra termomoldada não é exibida, pois não foi construída a réplica termomoldada côncava.

O fenômeno de “*overpacking*” foi mínimo, conforme exibido nos gráficos, chegando ao máximo de 102% na região A.

Para a região B (FIGURA 6. 35), nas primeiras zonas, verifica-se o fenômeno de “*overpacking*” chegando a 104 % de fidelidade e percebe-se que o comportamento da condição de n. 1 possui queda drástica chegando a 58% de fidelidade para a 40ª zona. Nas condições de n. 2 até n. 6, o comportamento foi levemente inferior ao da região A, ou seja, todas as zonas ficaram na faixa entre 80% a 95% de fidelidade.

Na sequência, a FIGURA 6. 36 (a) mostra os espectros das primeiras e últimas zonas do molde convexo com o interferograma de franjas interferométricas semelhante ao caso anterior. Logo, a FIGURA 6. 36 (b) apresenta os espectros das primeiras e últimas zonas da réplica de PMMA injetada côncava com o interferograma de franjas interferométricas também semelhantes ao caso anterior, ou seja, a densidade de franjas pretas e brancas foi maior que o caso da microlente com altura constante.

O valor de rugosidade no centro e parte plana da microlente está na TABELA 6. 3. A rugosidade R_q ficou em torno de 50 nm, tanto para o molde quanto para a réplica em PMMA, indicando que o processo necessita de uma calibragem na escolha do parâmetro de avanço ou na troca da ferramenta de corte em função do desgaste, para que sejam atendidas as especificações ópticas na faixa do infravermelho.

FIGURA 6. 34 - Gráfico de fidelidade das zonas de Fresnel côncavas com altura variável e largura constante de 250 μm na região A, do processo de injeção

FIGURA 6. 35 - Gráfico de fidelidade das zonas de Fresnel côncavas com altura variável e largura constante de 250 μm na região A, do processo de injeção

FIGURA 6. 36 - Espectro das primeiras e últimas zonas exibindo as franjas interferométricas do (a) Molde convexo (b) Réplica côncava injetada

TABELA 6. 3 - Rugosidade do molde de cobre eletrolítico e das réplicas da microlente de altura variável côncava de PMMA injetada.

Rugosidade	Molde		Réplica Injetada	
	Plana	Filtro	Plana	Filtro
Ra (nm)	30,44	37,72	28,77	37,35
Rq (nm)	38,90	50,11	39,01	48,92
Rt (nm)	399,64	413,76	1,26	412,93

De qualquer maneira, se forem necessários melhores requerimentos na qualidade do produto óptico, os desvios de geometria causados pela retração do volume e o empenamento são alguns dos inconvenientes que devem ser evitados na fabricação da moldagem por injeção. Investigar o processo de moldagem por injeção para lentes poliméricas com alta precisão de forma é fundamental para resolver as questões técnicas associadas à conformidade da superfície em relação ao projeto e, finalmente, garantir que o processo de manufatura de alta precisão disponível seja satisfatório na condição de desempenho óptico de precisão.

Considerando que os resultados das lentes de Fresnel com altura variável e largura constante de 250 μm propiciaram boa fidelidade de replicação em função da relação superfície/volume, pode-se concluir que os mesmos podem ser indicados nas aplicações quando os elementos ópticos difrativos necessitarem alta precisão de forma.

Portanto, fica provado que a razão superfície/volume influi de forma significativa no preenchimento dos μEODs , concluindo que as lentes de Fresnel com altura variável são favorecidas, no preenchimento, por tal fenômeno, porque possuem volume maior do que no caso das lentes com altura constante.

6.3 – Análises Paraxiais

6.3.1 – Modulação de fase para microlente de Fresnel com altura constante

A função de modulação de fase para lentes delgadas da FIGURA 6. 37 foi calculada pelo programa computacional LF 2010. Como o módulo de fase é estabelecido em função da espessura da microlente que, no caso, é constante, a amplitude da função também será constante em todo o diâmetro da microlente.

FIGURA 6. 37 – Função de transmitância calculada no LF2010 da microlente de Fresnel com altura constante de 10 μm .

6.3.2 – Modulação de fase para microlente de Fresnel com altura Variável

A função de transmitância para lentes delgadas com altura variável da FIGURA 6. 38 foi calculada pelo programa computacional LF 2010. Em virtude de a modulação de fase ser estabelecida em função da espessura da microlente que, no caso, é variável, a amplitude da função também será variável, como demonstrado no gráfico, isto é, a amplitude da função de fase é menor no centro da Fresnel e maior nas extremidades da microlente quando atinge o máximo no pico da última zona.

A descontinuidade vista no gráfico é decorrente do método de Fresnel, pois em uma mesma linha vertical existem dois pontos, um é o final da zona e o outro, o começo da próxima.

FIGURA 6. 38 - Função de transmitância calculada no LF2010 da microlente de Fresnel com altura variável

6.3.3 – FTM e Distância Focal

Somente foi possível realizar a análise de FTM para a microlente de Fresnel convexa, pois o banco óptico usado possuía apenas 300 mm de comprimento na régua e, conforme descrito na revisão bibliográfica, não é aplicável a avaliação de lentes em cascata, desde que as aberrações em uma lente possam compensar a de outras a ela alinhadas e, por esta razão, não se tornam independentes. Entretanto, para avaliar a distância focal pode-se combinar outra lente de forma a reduzir o foco e realizar a análise na bancada. Então, a única avaliação realizada na lente de Fresnel com altura constante foi a de sua distância focal, que teve de ser investigada com o uso combinado de uma lente padrão para reduzir o foco e estimar, por cálculos, o foco verdadeiro, que ficou em 480 mm.

A análise do foco para a microlente de Fresnel com altura variável convexa ficou em 70 mm. Portanto, foi possível avaliar o FTM, que é apresentado na TABELA 6. 4. Foram realizadas 5 medidas e o *software* calculou o desvio padrão. Os resultados para a microlente de Fresnel com altura variável foram de 85,2% para 25 lp/mm, 67,5% para 50 lp/mm e 71,2% para 75 lp/mm.

O prof. Dr. Sérgio Carlos Zílio (2010) afirma que a pequena oscilação de inversão entre os resultados de 50 lp/mm e 75 lp/mm é normal em análises de elementos ópticos difrativos, pois se o objeto examinado fosse refrativo, a tendência sempre seria de queda (ZÍLIO S. C., Informação verbal fornecida no IFSC – USP, Outubro de 2010).

Comparando os resultados das lentes manufaturadas na tese com as lentes descritas na revisão bibliográfica da TABELA 4. 3, nota-se que os do presente trabalho são muito

superiores em comparação, por exemplo, com as lentes comerciais Canon® 28-70 mm f/2.8L e as lentes plásticas produzidas por Silva (2002). Entretanto, os valores de FTM para lentes de vidro produzidas pelo instituto de Física foram muito semelhantes aos desta obra, que ficaram somente abaixo da lente padrão para calibração que acompanha estação de testes do banco óptico.

Silva (2002) usou a técnica de polimento para diminuir a rugosidade superficial do seu inserto de aço. Sabe-se que isto causa grandes erros de forma e, conseqüentemente, aberrações ópticas, que diminuem a qualidade da lente justificando os baixos valores de FTM encontrados em sua dissertação.

Os altos valores de FTM encontrados para a microlente de Fresnel com altura variável convexa se deve à técnica de torneamento de ultraprecisão, que possui particularidades de modo a conferir o grande desempenho, tais como: 1- mancais do eixo-árvore aerostáticos que garantem a precisão de giro, rigidez axial e radial compatíveis com o nível de precisão a que o equipamento se propõe (10 nm de precisão de posicionamento). 2 - Controle Numérico Computadorizado (CNC) que permite controlar simultaneamente e de forma precisa os deslocamentos dos eixos X e Z da máquina monitorada por transdutores interferométricos a laser, com realimentação ao controlador. 3 - deslocamentos dos carros da máquina são suportados por guias hidrostáticas de alta rigidez, que permitem a movimentação suave em escala nanométrica, de forma que o atrito mecânico se torne desprezível.

Portanto, pode-se concluir que os fatores citados interferiram, positivamente e de forma significativa, na obtenção de microlentes anesféricas livres de aberrações (vide interferogramas de franjas) e com alta qualidade óptica.

TABELA 6. 4 - FTM da para a microlente de Fresnel convexa com altura variável injetada.

Técnica de Fabricação	Microlente / FTM	25 lp/mm	50 lp/mm	75 lp/mm
Molde:				
Torneamento				
de	Fresnel de altura	85,2%	67,5%	71,2%
ultraprecisão.	variável convexa	±1,9	±3,2	±4,5
Réplica:				
microinjeção				

A análise de FTM não foi procedida na microlente de Fresnel com altura variável côncava porque o operador não sabia realizá-la.

6.3.4 – Transmitância do PMMA - DH ECL – P

A transmitância do PMMA - DH ECL – P foi avaliada em um espectrofotômetro no laboratório do IFSC e os dados inseridos no gráfico da FIGURA 6. 39. Foi examinada a faixa do comprimento de onda, que vai do ultravioleta 350 nm até o infravermelho 1000 nm. Nota-se que a transmitância sofreu um pico no comprimento de 350 nm quase chegando a 100% de transmissão e, logo após, uma queda indicando transmitância de 60% para $\lambda=380\text{nm}$. Para os comprimentos de onda da luz na faixa do espectro visível e região infravermelha a transmitância ficou em aproximadamente 90 %.

FIGURA 6. 39 – Transmitância medida no espectrofotômetro do PMMA DH ECL – P usado nos ensaios

6.4 – Simulações

Este tópico destina-se a realizar estudos analíticos numéricos com o auxílio do Mold Flow, que é *software* de análises por elementos finitos CAE (Computer Aided Engineering) da Autodesk®, e compará-los aos resultados experimentais.

Para que os resultados não fiquem repetitivos serão expostos apenas os valores críticos, isto é, as condições mais extremas, que são as de n. 1 e n. 6, de modo a conferir a sensibilidade do simulador nas escalas macroscópicas e microscópicas.

6.4.1 – Tempo de preenchimento

O resultado do tempo de preenchimento exibe a posição dos intervalos da frente de escoamento enquanto a cavidade do molde é preenchida. O tempo de preenchimento calculado pelo método de elementos finitos da FIGURA 6. 40 apresentou o valor máximo de 1,6 segundos para a parte mais longe do bico de injeção. Cada contorno de cor representa as partes do molde que estão sendo preenchidas ao mesmo tempo. No início da injeção, os resultados são azuis e os últimos lugares que foram preenchidos são dados pela coloração vermelha.

FIGURA 6. 40 – Tempo de preenchimento máximo

Consequentemente, após analisar o tempo de preenchimento, pode-se calcular o tempo de ciclo. O tempo de ciclo simulado na FIGURA 6. 41 ficou próximo ao dos experimentais, com valores próximos a 41,63s. Estes números de preenchimento, recalque, resfriamento e abertura do molde foram muito importantes para conduzir os experimentos a obter bons resultados, conforme será discutido nas próximas seções.

FIGURA 6. 41 – Tempo de ciclo

6.4.2 – Confiança de preenchimento

Às vezes, a confiança de preenchimento não prediz pequenas injeções, mas também expressa se a peça a ser moldada possuirá boa qualidade. Isto ocorre em função das condições da fase de preenchimento da injeção, que indicam quais são inadequadas para serem recalçadas durante a fase de recalque.

A FIGURA 6. 42 mostra 100% de confiança de preenchimento para as seguintes condições: (a) n. 1 com 400 BAR de pressão de injeção e (b) n. 6 com 1340 BAR de pressão. De acordo com o simulador, toda a lente é preenchida, entretanto, como visto nos gráficos de fidelidade, sabe-se que os microcanais das lentes de Fresnel tiveram grandes dificuldades para serem vazados para dentro das microcavidades. Então, isto indica que o simulador possui grande sensibilidade na escala macroscópica, mas necessita de melhorias na escala microscópica.

FIGURA 6. 42 – Confiância de preenchimento (a) Condição n. 1 (b) condição n. 6

Portanto, quando a cavidade não é preenchida, mudanças no projeto deverão ser feitas das seguintes propriedades: local de injeção, escolha do polímero ou condições do processo. Consequentemente, para assegurar boa qualidade do acabamento da peça, deve-se ter certeza de que o plástico preencherá toda a cavidade.

6.4.3 – Qualidade de preenchimento

A previsão da qualidade exposta na FIGURA 6. 43 estima a qualidade esperada na aparência da peça e de suas propriedades mecânicas. Na imagem (a) tem-se a qualidade alta esperada para a condição de n. 1 com 57,5%, e, na (b), o valor de 7,3%. Esta baixa qualidade deve ter sido causada pelo alto recalque da peça, que provoca tensões residuais trincando a superfície nas áreas em vermelho e amarelo.

FIGURA 6. 43 – Previsão da qualidade de preenchimento da peça (a) Condição n. 1 (b) condição n. 6

6.4.4 – Queda de pressão

A queda de pressão é um dos fatores usados para determinar a confiança de preenchimento. Se a queda de pressão for maior que 80% do valor da máxima pressão de injeção da máquina, a confiança de preenchimento ficará amarela. Entretanto, se a queda de pressão atingir 100% da pressão configurada no programa, a cor da confiança de preenchimento se tornará vermelha.

A FIGURA 6. 44 mostra a queda de pressão que aconteceu durante o preenchimento das microlentes. As cores de cada parte da peça do modelo representam a queda de pressão do local de injeção até o preenchimento total da peça. Esta é a pressão necessária para forçar o material para escoar em cada ponto descrito pelas cores.

Os valores simulados para a queda de pressão foram os mesmos para todas as condições de injeção com 180 BAR na cor vermelha, que fica na parte mais afastada do bico de injeção e 0 BAR no próprio bico.

Essa é a razão da diferença entre as regiões A e B analisadas nos estudos dos gráficos de fidelidade. De acordo com o gráfico, na cor verde da região A da microlente tem-se uma queda de 90 BAR e, na região B, na cor amarela há maior queda de pressão com 135,2 BAR.

FIGURA 6. 44 – Queda de pressão durante o preenchimento

6.4.5 – Temperatura na frente de escoamento, do substrato e de refrigeração

A temperatura na frente de escoamento mostra a temperatura no centro da seção transversal que o polímero está, quando atinge um ponto específico, sendo indicada por colorações diferentes.

A temperatura na frente de escoamento não deve cair mais do que 5°C durante a fase de preenchimento. Grandes quedas indicam que o tempo de injeção está muito longo ou que existem áreas de incerteza de preenchimento. Inversamente, em áreas em que a frente de escoamento aumenta diversos graus pode ocorrer degradação do material ou até mesmo defeitos superficiais.

A FIGURA 6. 45 mostra a temperatura da frente de escoamento da condição de n. 6, que está com 244,9 °C na bucha de entrada e, ao escoar pela cavidade do molde, verifica-se que houve ascensão de 0,4 °C no final do preenchimento ficando com 245,3 °C. Esta ligeira elevação na temperatura acontece em função do atrito e também das forças de cisalhamento que geram energia na forma de calor. Portanto, pode-se dizer que o pequeno aumento constatado na temperatura não será suficiente para degradar o material.

Para os outros parâmetros de injeção, os resultados foram semelhantes.

FIGURA 6. 45 – Temperatura na frente de escoamento

Logo após, foi estudada a temperatura média do substrato, que é usada para indicar a média ponderada da temperatura na seção transversal da espessura da peça após o preenchimento.

A temperatura do polímero fundido não muda apenas com o tempo e a distância da bucha de entrada, mas também com a espessura da peça por todo o ciclo de moldagem por injeção. A temperatura do substrato possui significado físico maior do que uma simples média de temperatura do polímero enquanto ocorre o escoamento. Representa também a energia que é transportada através de um determinado local.

A temperatura do substrato é a média ponderada da temperatura do perfil de velocidade quando o polímero está fluindo, e a média simples quando o fluxo para. É desejável ter um projeto do molde em que a distribuição de temperatura, durante o preenchimento, seja uniforme, pois se o gradiente de temperatura for muito grande, a peça poderá retrair-se desigualmente causando o seu empenamento.

A análise da temperatura do substrato é um caminho alternativo para investigar a distribuição do escoamento. Áreas com fluxo contínuo (convecção térmica), tipicamente, possuem temperatura maior no substrato. Antagonicamente, a temperatura cai rapidamente quando o fluxo fica estacionário em uma determinada área.

Se a máxima temperatura do substrato for próxima à temperatura de degradação, deverão ser mudadas as condições do processo de injeção ou o projeto da peça deverá ser refeito na parte da análise que possui pontos superaquecidos.

O gradiente de temperatura do substrato, no momento final da injeção, para todas as condições executadas nos experimentos está na FIGURA 6. 46, tendo-se uma média de

temperatura de 247,3°C na haste da lente e de 244,5 °C na própria lente, totalizando o gradiente de temperatura na peça inteira de apenas 5,7 °C.

FIGURA 6. 46 – Temperatura do substrato no final do preenchimento

A FIGURA 6. 47 exibe o resultado da variação do tempo de resfriamento que o polímero demora a solidificar em diversas regiões da peça, e também o tempo médio para a peça consolidar-se inteiramente.

Áreas que possuem coloração vermelha contêm valores positivos e demoram mais a resfriar em relação à média da peça inteira. As áreas que estão no gráfico com coloração azul são dadas em valores negativos, portanto refrigeraram-se mais rapidamente.

Então, na imagem, a parte da peça em que está a microlente resfria mais rapidamente, o que se deve à sua espessura delgada.

Portanto, realmente pode-se concluir que os dados experimentais corroboraram os da simulação. Tentativas de diminuir o tempo de resfriamento causaram ruptura da peça na parte vermelha do resultado simulado, pois nesta região demanda-se que o tempo seja maior para que o produto seja inteiramente solidificado.

FIGURA 6. 47 – Variação do tempo de resfriamento

6.4.6 – Pressão de injeção e força de fechamento do molde

A pressão na cavidade de injeção mostra a variação da pressão de injeção em função do tempo durante as fases de preenchimento, recalque, resfriamento e ejeção.

O resultado da pressão de injeção na cavidade do molde é muito útil para verificar se existem picos de pressão que indicam sinal de desequilíbrio e para corrigi-lo basta mudar a localização do canal de alimentação “*gate*”.

O gráfico da FIGURA 6. 48 (a) foi construído no *software* de elementos finitos para moldagem por injeção com objetivo de obter a pressão de injeção na cavidade do molde durante todo o ciclo da condição de injeção de n. 1. O gráfico da imagem (b) representa a pressão da cavidade durante o ciclo de moldagem para a condição de n. 6. Nos dois diagramas o pico de pressão foi idêntico ao do recalque selecionado.

(a)

(b)

FIGURA 6. 48 – Pressão de injeção durante o ciclo de moldagem: (a) condição n. 1, (b) condição n. 6

Obtidas as pressões de injeção, foi possível calcular a pressão de fechamento do molde. O gráfico da FIGURA 6. 49 (a) mostra a força de fechamento do molde durante o ciclo de injeção com 2,4 toneladas no recalque da condição n. 1 e, na imagem (b), 9,8 toneladas de recalque na condição n. 6.

A força de fechamento do molde é derivada do valor do gradiente de pressão distribuído na cavidade do molde da peça. Portanto, é a força resultante advinda do preenchimento e da pressão de recalque que atuam no sentido de abrir o molde.

A força de fechamento do molde nunca deve exceder 80% do limite da máquina. A PRIMAX 100R – CONTROLMASTER 8 da marca ROMI® possui força de fechamento de 100 toneladas, portanto nenhum parâmetro ultrapassou a marca de 80 TON.

(a)

(b)

FIGURA 6. 49 – Força de fechamento do molde: (a) condição n. 1, (b) condição n. 6

6.4.7 – Retração no volume da peça

O resultado de retração volumétrica mostra em cada área o percentual de redução do volume original que acontece durante a fase de resfriamento do componente.

Como era de se esperar, o gráfico da FIGURA 6. 50 (a), que foi simulado na condição de n. 1, teve maior porcentagem de retração (8,775%). Na imagem (b), designada para a condição de n. 6, a retração foi menor, ou seja, 8,64%. A diferença de retração entre as duas condições ocorre por causa da diferença de pressão de injeção e recalque entre as duas condições. Na condição de n.6, a retração volumétrica foi uniforme em toda a área da lente (cor azul) o que influencia no baixo empenamento da peça no local.

FIGURA 6. 50 – Retração volumétrica (%) (a) Condição n. 1, (b) Condição n. 6

6.4.8 – Rechupe

As marcas de rechupe são estimadas para adquirir o cálculo das profundidades do rechupe mostradas em sua legenda ao lado da FIGURA 6. 51, que expõe este fenômeno na parte posterior da haste da peça, não aparecendo na área de localização da microlente. As marcas de rechupe são geradas normalmente nas seções da peça mais espessas, ou opostos aos locais com nervuras e buchas.

FIGURA 6. 51 – Rechupe na haste da peça

6.4.9 – Camada superficial “skin”

A previsão de orientação das cadeias na camada superficial “skin” da FIGURA 6. 52 (a) mostram como as moléculas do PMMA são alinhadas na parte externa da peça de acordo com o cálculo numérico executado pelo Mold Flow. Na imagem (b) tem-se o alinhamento das cadeias poliméricas no substrato ou núcleo da peça. Nota-se que o alinhamento agora é perpendicular ao direcionamento anterior.

FIGURA 6. 52 – Orientação das cadeias moleculares: (a) Camada superficial “skin”, (b) No substrato ou núcleo

O efeito do alinhamento das cadeias na camada superficial foi verificado também experimentalmente corroborando com os testes numéricos conforme observado na FIGURA 6. 53 (a) que foi revelado o direcionamento das cadeias na fotografia de uma das lentes produzidas. Ampliando a imagem na FIGURA 6. 53 (b), constata-se o aparecimento de microvórtices no escoamento do PMMA, que são melhores vistos na FIGURA 6. 53 (c). Os microvórtices surgiram em função do efeito fonte, já explicados na FIGURA 3. 15. O fenômeno não foi evidenciado nos cálculos numéricos do simulador CAE. Portanto, novamente os cálculos numéricos mostram que são aproximações em escalas macroscópicas.

FIGURA 6. 53 (a) Lente reproduzindo o efeito de alinhamento das cadeias poliméricas na camada superficial (b) Avaliação no MEV das linhas de fluxo e o respectivo alinhamento das cadeias poliméricas, revelando o aparecimento de microvórtices no escoamento da camada superficial (c) Microvórtices ampliados

A espessura da camada superficial foi avaliada cortando-se uma parte do material extrudado para fora do molde, conforme a FIGURA 6. 54 (a). O corte da seção de PMMA ampliado no MEV da FIGURA 6. 54 (b) mostra que a espessura da camada superficial “skin” formada neste caso foi de 659,75 μm .

FIGURA 6. 54 – (a) PMMA extrudado. (b) Avaliação no MEV da espessura da camada superficial

6.4.10 – Linha de soldagem

As linhas de soldagem são formadas quando duas frentes de escoamento se encontram.

A presença de linhas de solda indica fraqueza na estrutura, ou até mesmo formação de defeitos na superfície podendo ser notadas visualmente causando a rejeição da peça. Portanto, deve-se evitar a formação de linhas de solda na peça, nas partes estruturais, ou que devem ser apresentadas lisas, sendo apenas permitidas nos galhos.

A FIGURA 6. 55 (a) mostra a linha que se formou na análise numérica e é apontado onde se formou experimentalmente.

A FIGURA 6. 55 (b) indica a foto obtida no projetor de perfil da linha de soldagem formada na microlente convexa de Fresnel com altura variável.

O escoamento unindo-se para formar a linha de solda é melhor analisado na FIGURA 6. 55 (c), na qual verifica-se as típicas ondulações que se formam quando um escoamento encontra-se com outro.

(a)

(b)

(c)

FIGURA 6. 55 – Linhas de soldagem analisadas no: (a) Software CAE (b) Resultado experimental avaliado no projetor de perfil (c) e Perfilômetro óptico

6.5 - Desgaste da ferramenta de diamante

A FIGURA 6. 56 (a) mostra a ferramenta de Torneamento Padrão Rank Pneumo 51mm, após o uso na microusinagem da operação de faceamento indicando o desgaste de flanco da aresta de corte que ocorreu no processo de microusinagem e a FIGURA 6. 56 (b) aponta fragmentos de cavaco de cobre que ficaram aderidos à superfície da ferramenta confirmando a formação da aresta postiça de corte (APC).

FIGURA 6. 56 - Ferramenta de Torneamento Padrão Rank Pneumo (a) Aresta desgastada (b) Desgaste de flanco e aresta postiça de corte (APC)

A aresta postiça de corte é constituída de partículas de material usinado que se acumulam na superfície de saída da ferramenta. A aresta postiça aderente à aresta de corte se deforma e se encrua, aumentando sua resistência mecânica e fazendo, às vezes, o papel de aresta de corte. A aresta postiça cresce gradualmente até romper-se bruscamente. Parte da aresta postiça que rompe é carregada com o cavaco e parte adere à peça, prejudicando sensivelmente seu acabamento superficial. Ao romper-se, a aresta postiça arranca partículas da superfície de folga da ferramenta, gerando grande desgaste de flanco, mesmo em velocidades muito baixas. A aresta postiça de corte é extremamente prejudicial para a ferramenta, pois gera seu desgaste precoce. Além disso, a presença da aresta postiça de corte prejudica o acabamento superficial, porque a aresta que se forma tende a possuir o formato arredondado, o que prejudica a ação do cisalhamento.

A FIGURA 6. 57 (a) exibe a superfície de saída da **ferramenta de meio raio - raio mão esquerda** da Contour® após o uso na microusinagem dos insertos de Fresnel. São

apontados os cavacos de cobre eletrolítico que se soldaram na superfície de saída da ferramenta de corte formando a aresta postiça de corte APC.

A FIGURA 6. 57 (b) foi obtida após pouco uso da ferramenta de corte e já mostra a grande quantidade de cavaco de cobre que aderiu à superfície de folga e de saída da ferramenta.

Na sequência, a FIGURA 6. 57 (c) foi registrada após várias horas de uso da ferramenta de corte de diamante e removida a APC para indicar o grande desgaste sofrido pela ferramenta em virtude da ação da microusinagem e a formação da aresta postiça de corte.

FIGURA 6. 57 – Ferramenta de corte da Contour®: ferramenta de meio raio - raio mão esquerda (a) (b) Adesão do cavaco formando a aresta postiça de corte (c) avarias da aresta de corte

Materiais dúcteis são os principais propiciadores na aparição da aresta postiça de corte. O principal motivo da formação da APC neste trabalho deve-se à variação da velocidade de corte, pois em operação de faceamento esta velocidade varia de 0 à máxima velocidade em função do diâmetro e da rotação da máquina. Velocidades de corte baixas são alguns dos principais fatores que facilitam o mecanismo de formação. Em grandes velocidades, a temperatura de corte cresce ocorrendo a recristalização do material do cavaco e fazendo com que não mais se forme a aresta em razão de não haver mais a possibilidade de encruamento dos mesmos em materiais dúcteis.

6.6 - Análise do Cavaco

A interação mecânica ferramenta/peça pode resultar em diferentes tipos de deformações em materiais metálicos, assim como modos associados de remoção de material. Segundo SHAW (1984), no torneamento com diamante, o contato entre a ferramenta e a peça geralmente resulta na formação de cavaco por meio da separação do material da peça. Referido processo de separação do material envolve um cisalhamento plástico intenso e uma ruptura dúctil do material pela ponta da ferramenta. Portanto, o escoamento plástico é o modo predominante de remoção de material no torneamento com diamante. Com profundidades de usinagem muito pequenas, a formação do cavaco tem uma estreita relação com o grau de afiação da aresta de corte. Quando a aresta não está muito afiada pode ocorrer apenas deformação plástica do material. Por outro lado, a quantidade de tensões introduzidas no material é minimizada quando se usam ferramentas afiadas.

A FIGURA 6. 58 (a) mostra um cavaco típico de cobre eletrolítico usinado com a ferramenta CONTOUR[®] com $f = 2,5 \mu\text{m/rev}$ e $a_p = 3 \mu\text{m}$, o cavaco apresentado possui forma contínua do tipo fita.

A parte superior do cavado da FIGURA 6. 58 (b) exhibe a estrutura lamelar em forma de lamelas justapostas.

Para BLACK (1979), a deformação na usinagem é quase independente das condições de corte, e não ocorrem mudanças significativas na forma de espaçamento periódico da estrutura lamelar quando também se variam, em diversas magnitudes, a velocidade de corte. Por tal razão, pode-se excluir que a taxa de deformação influi no início do cisalhamento localizado. Logo após o início do cisalhamento localizado, a deformação nas bandas de cisalhamento pode ser determinada pela liberação da energia elástica armazenada no meio. Se isto for verdade, pode haver um mecanismo de desenvolvimento do cisalhamento localizado, que é independente da velocidade de corte.

Outro fato importante a ser observado na FIGURA 6. 58 (c) é a continuidade de formação do cavaco na sua parte posterior. Nota-se que a deformação plástica foi contínua, devido ao fato do material ser puro, o que reflete em um ótimo acabamento superficial da peça. Assim, se o material tivesse partículas duras em sua composição (impurezas, inclusões, etc.) como visto na revisão da literatura, a obtenção de melhores acabamentos superficiais no torneamento de ultraprecisão seria limitada.

FIGURA 6. 58 – (a) Cavaco em forma de fita de cobre eletrolítico usinado com ferramenta de diamante $f = 2,5 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 3 \mu\text{m}$ (b) Parte superior do cavaco exibindo a estrutura lamelar em forma de lamelas justapostas (c) Parte inferior do cavaco exibindo a deformação plástica imposta pela ferramenta de corte de diamante

Capítulo 7 – Conclusões

Com o elevado crescimento dos negócios em microeletrônicos que fazem uso de displays LCD, monitores, câmeras digitais, scanners, sensores e outros, tornou-se necessária a miniaturização dos EODs em escalas micrométricas com a vantagem de se economizar material, energia, portabilidade e tempo nos processos de fabricação. Para isso, foi constatado que a replicação por moldagem é a tecnologia chave para a manufatura em escala de microcomponentes.

A demanda trouxe novos desafios no que se refere à manufatura de microelementos ópticos difrativos de precisão. Conforme o mercado destes dispositivos se torna cada vez mais promissor, as empresas não fornecem dados sobre sua fabricação, por causa das patentes dos processos, meio de subsistência das companhias.

Portanto, foi necessário realizar uma investigação pública profunda no assunto.

Para isso, foi indispensável fazer estudos intensos para conhecer os diversos tipos de materiais para molde e réplicas que foram usados na construção dos μ EODs.

Para fabricar os insertos com as geometrias dos μ EODs desejadas, foi necessário selecionar, estudar e caracterizar quatro tipos diferentes de processos determinísticos que foram executados nos moldes de cobre eletrolítico e aço inoxidável.

Na execução das análises metrológicas qualitativas e dimensionais, foi imprescindível usar técnicas de perfilometria óptica e microscopia eletrônica de varredura em função da escala dos μ EODs construídos no trabalho.

Esta tese visou empregar, com o uso de um centro de usinagem CNC de três eixos, técnicas de microforjamento, microfresamento com fresa de ponta esférica e combinação de

ambos os processos para manufaturar arranjos de microlentes esféricas, com o objetivo de baixar os custos dos dispositivos.

Calcular a força necessária para conformar a superfície do cobre eletrolítico foi insuficiente para conduzir o processo ao sucesso. Foi constatado que a recuperação elástica do sistema existente no processo de microforjamento dificultou a calibragem para a construção de todos os arranjos de microlentes esféricas, porém após sucessivas atividades de calibração das técnicas usadas, concluiu-se que o processo de melhor destaque foi o de uso único do microforjamento, por causa dos baixos índices de aberração encontrados na frente de onda do interferograma, e pela excelente integridade superficial obtida, exibindo baixos valores de rugosidades que chegaram próximos aos valores do punção usado, alcançando $R_a = 262,84$ nm, $R_q = 325,43$ nm e $R_t = 2,34$ μ m nos arranjos de empacotamento $\phi=78,5\%$ e 1mm de abertura.

Para os arranjos de empacotamento completo os valores da rugosidade foram mais elevados em função da interatividade das lentes adjacentes do conjunto com $\phi=100\%$, que chegaram até mesmo a causar microfraturas na estrutura das microlentes para os arranjos com abertura de 2 mm, por causa do grande recalque provocado pelo punção. Portanto, ficou estabelecido que, para evitar a formação de microtrincas na estrutura, é preciso usar baixos valores de recalque com o objetivo de obter microlentes com maior qualidade.

A fidelidade dos arranjos de microlentes esféricas foi avaliada apenas no processo de moldagem por injeção, em função da dificuldade de analisar, no perfilômetro óptico, as réplicas de PMMA, já que havia dispersão da luz nos ensaios, não sendo possível analisar contundentemente todas as condições injetadas. Porém, sabe-se que sua geometria não propicia dificuldade no preenchimento e, com os poucos dados obtidos, estima-se que todas as réplicas ficaram acima de 95%, pois, conforme demonstrado nas imagens das réplicas, no MEV foram reproduzidos inclusive os microdefeitos causados pelo microfresamento no topo das microlentes.

Já para a construção dos moldes de Fresnel, foi necessário o completo estudo e entendimento da técnica de torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante que facilitou a produção de superfícies complexas que não poderiam ser feitas com o uso dos métodos tradicionais, como o polimento e a lapidação.

Foi necessário desenvolver o código computacional na linguagem VB denominado LF2010 para auxiliar a construção do projeto das microlentes anesféricas de Fresnel, que permitiu dimensionar as geometrias, calculando seu foco, diâmetro de abertura, volume, área superficial e também a modulação de fase para cada microlente.

Então, fazendo-se uso de geometria de corte da ferramenta adequada foi possível construir 3 tipos de geometria para molde, sendo construído ao todo 5 moldes para efeitos de estudo, 2 destinados para investigar a termomoldagem e 3 usados na moldagem por injeção. Na microlente de Fresnel com altura constante foi comprovado o aparecimento no torneamento de ultraprecisão do fenômeno conhecido como “*stick slip*” que foi sanado na microlente de altura variável removendo-se do projeto de Fresnel a componente de velocidade de avanço no curso transversal do carro no eixo X.

A ótima integridade superficial conseguida nos moldes de cobre eletrolítico, pelo método de torneamento de diamante conduziu a valores de rugosidade da ordem de $R_a = 16,61$ nm, $R_q = 21,4$ e $R_t = 971,95$ μ m na parte plana do molde para a microlente de Fresnel com altura constante. As respectivas réplicas ficaram com valores menores ainda com $R_a = 10,2$ nm, $R_q = 13,56$ e $R_t = 363,06$ μ m na parte plana da peça. Portanto, as microlentes atendem os requisitos ópticos exigidos para trabalharem no espectro infravermelho, podendo até mesmo ser usadas em tecnologias de vanguarda, pois atualmente equipamentos como o “*blu-ray*” estão fazendo uso de comprimento de onda azul que possui $\lambda = 405$ nm, ou seja, a rugosidade R_q exigida nesse caso é da ordem de 20,25 nm e a microlente injetada ficou abaixo deste valor indicando a possibilidade de se trabalhar com comprimentos de onda até mesmo no ultravioleta.

Entretanto, os melhores valores de integridade superficial conseguidos foram os obtidos com a técnica de polimento com pasta de diamante realizado nos insertos planos de aço inoxidável, pois os mesmos não poderiam ser usinados com ferramenta de diamante para obter acabamento superficial óptico, logo os números de rugosidade foram $R_a = 7,02$ nm $R_q = 9,05$ nm e $R_t = 225,19$ nm.

Na replicação das microlentes de Fresnel ficou constatado que as peças produzidas na micromoldagem resfriam mais rapidamente do que na moldagem convencional, acarretando a retração do volume do material e, ao mesmo tempo, a sua solidificação antes mesmo que aconteça a penetração para dentro das microcavidades. Isto acontece em função do pequeno volume de polímero que resulta na alta razão superfície/volume típico da moldagem de micropeças.

Adicionalmente, as geometrias de Fresnel possuem cantos vivos dificultando ainda mais a fidelidade na replicação.

Para a microlente de Fresnel com altura constante, a razão superfície/volume foi de $195,967 \text{ mm}^{-1}$ o que conduziu aos piores resultados de fidelidade de replicação que ficaram na

faixa de 80% a 85% para as últimas cinco zonas (25 a 30) na região B, que é a região que mais sofre com o fenômeno de perda de pressão por atrito no escoamento.

De qualquer modo, para componentes ópticos de precisão, a funcionalidade óptica ainda é o fator mais importante para fabricantes e consumidores, então talvez esta diferença de fidelidade não prejudique a funcionalidade da microlente produzida para certos tipos de uso.

Portanto, ficou provado que a razão superfície/volume influi de forma significativa no preenchimento dos μ EODs inferindo que as lentes de Fresnel com altura variável com relação de $41,15 \text{ mm}^{-1}$ são favorecidas no preenchimento por tal fenômeno, na maioria das condições de injeção ficando acima de 95% para as últimas 5 zonas (35 a 40) na região B.

Foi também constatado que as lentes com altura constante possuem razão superfície/volume maior em relação às análogas de altura variável. Isto influencia significativamente na fidelidade, de modo que o material se mantém aquecido durante o preenchimento acarretando os melhores resultados de fidelidade.

Na termomoldagem, o fenômeno relacionado à razão superfície/volume foi indiferente, pois as variações nas dimensões das cristas foram muito pequenas, da ordem alguns nanômetros, constatando-se que a fidelidade no processo foi de aproximadamente 100% para todas as zonas de Fresnel nas duas geometrias construídas, mas vale ressaltar que para usar tal técnica são necessários tempos de ciclos de até 40 vezes maiores que a moldagem por injeção.

Investigações paraxiais também foram feitas usando-se um espectrofotômetro e um banco óptico. Nos resultados, a transmitância da luz no acrílico foi de aproximadamente 90% em toda a região do espectro visível e também as faixas próximas ao infravermelho.

Altos valores de FTM foram encontrados para a microlente de Fresnel com altura variável convexa com 85,2 % para 25 lp/mm, 67,5% para 50 lp/mm e 71,2% para 75 lp/mm. Este resultado se deve à técnica de torneamento de ultraprecisão que possui particularidades de modo a conferir o grande desempenho na fabricação de moldes com pequenos erros de forma.

A simulação por elementos finitos CAE foi usada para auxiliar nos estudos de modo a conferir a sensibilidade do método de cálculo numérico do simulador nas escalas macroscópicas e microscópicas. A plataforma usada foi o Mold Flow 2010 da Autodesk®.

Nos testes numéricos foi calculado o tempo de preenchimento que ficou em 1,6 segundo, resultado próximo ao experimental obtido.

Conclusões

Outro fator avaliado foi confiança de preenchimento, que mostrou ser muito eficiente na escala macroscópica, entretanto, na escala microscópica, o *software* deixou a desejar, pois foi indicado na área da microlente confiança de 100%, enquanto os gráficos de fidelidade diziam o contrário. Portanto, na microescala o programa não possui grande sensibilidade.

A análise previu a qualidade de preenchimento, que no caso da condição de injeção de n. 1 ficou com 57,5 % de alta qualidade e, na condição de n. 6, apenas 7,3%. A baixa qualidade na condição de n. 6 deve ter sido causada em função do alto recalque da peça, que provoca tensões residuais trincando a superfície.

A simulação da queda de pressão mostrou diferenças na região A e B analisadas. Ficou constatada queda de 90 BAR na região A e de 135,2 BAR na região B. Esta diferença certamente foi o principal causador da desigualdade dos gráficos de fidelidade influenciando diretamente nas condições de preenchimento entre as duas regiões avaliadas.

A simulação da temperatura da frente de escoamento da condição de n. 6 mostrou que houve acréscimo de 0,4 °C durante o preenchimento indicando que as forças de cisalhamento geraram energia na forma de calor

Os cálculos numéricos para força de fechamento do molde não excederam o limite da máquina usada nos testes experimentais, pois o maior valor obtido foi de 9,8 toneladas na condição n. 6.

A investigação da retração no volume da peça indicou que, na área da superfície da lente, a retração foi uniforme não ultrapassando de 1,83% para a condição de n. 1, que foi a de menor pressão de recalque. A uniformidade da retração na área da microlente é importante para que seja evitado o fenômeno de empenamento.

O cálculo do rechupe revelou que houve rechupe apenas na parte posterior da haste da peça e, portanto, não afetou a superfície da lente.

A orientação das cadeias poliméricas foi examinada experimentalmente e numericamente. Macroscopicamente notou-se que os resultados simulados na camada superficial corroboraram com os conseguidos experimentalmente e a orientação das cadeias no núcleo possuíam orientação perpendicular em relação aos da superfície. Entretanto, foi possível observar a formação de microvórtices na camada superficial da peça, detalhe que não foi previsto pelo programa.

Nas microlentes foram formadas linhas de soldagem examinadas no projetor de perfil e no perfilometro óptico, porém fora da área útil da lente. O programa também detectou que as linhas apareceriam, entretanto, errou a localização do resultado.

Foi investigado o desgaste da aresta de corte da ferramenta e verificou-se a formação da aresta postiça de corte que era constituída de partículas de material usinado que se acumulam na superfície de saída da ferramenta. Após muito uso da ferramenta averiguou-se desgaste de flanco na aresta, o que, conseqüentemente, repercutiu no pior acabamento superficial dos últimos moldes construídos, que foram os da lente de Fresnel com altura variável.

Os cavacos formados de cobre eletrolítico tiveram sua formação contínua do tipo fita com estrutura lamelar em forma de lamelas justapostas na parte superior. Na inferior, exibiu-se a deformação plástica imposta pela ferramenta de corte de diamante.

Portanto, após inúmeras análises e estudos, pode-se concluir que é possível reproduzir diversos tipos de μ EODs com métodos de produção em massa da moldagem por injeção tomando-se cuidado com as variáveis do processo, geometria da peça e características do material a ser replicado.

Sugestões para Trabalhos futuros

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

1. Simular resultados de transmissão da luz em programas do tipo Oslo da lambda research[®];
2. Investigar melhor a espessura da película “*skin*” formada durante a injeção nas micropeças;
3. Fabricar outros microcomponentes com a combinação da óptica refrativa e difrativa em apenas um elemento (lente híbrida);
4. Realizar a injeção com atmosfera controlada (gás inerte) para evitar degradação do polímero;
5. Usar aço inoxidável SAE 304 para verificar se acabamento superficial do inserto fixo fica melhor que o SAE 420;
6. Realizar alguma deposição (níquel ou cromo) no molde de cobre para aumentar sua dureza e consequentemente aumentar a resistência ao desgaste mecânico e químico;
7. Usar esferas para microforjamento com menor valor de rugosidade;
8. Fabricação de elementos ópticos refrativos para comparação de resultados;
9. Analisar as lentes para verificar o aparecimento das aberrações de birrefringência, esféricas, coma, astigmatismo com equipamentos mais precisos do que a análise no interferograma;
10. Puncionar uma geometria com superfície anesférica para construir arranjos de microlentes livre de aberrações esféricas;
11. Tratar termicamente as lentes para realizar alívio de tensões internas, Isso faz com que desapareçam as franjas interferométricas acompanhadas pela deformação do material. Silva 2002, tratou suas lentes durante uma hora a uma temperatura de 110 °C;
12. Fabricar elementos ópticos difrativos na escala nanométrica;
13. Usar o programa computacional denominada LF2010 para investigar o torneamento com ferramenta de diamante de microlentes de Fresnel em semicondutores;

14. Pós - Polimento eletrolítico para melhoria da rugosidade de modo que as tecnologias de vanguarda sejam atendidas e melhoradas até chegar ao nível atômico.
15. Construir molde de micoprismas cúbicos (FIGURA 7. 1) e piramidais (FIGURA 7. 2).

(a)

(b)

FIGURA 7. 1 – Micoprismas cúbicos (a) Projeto em CAD. (b) Caracterização no MEV de um macroprisma.

FIGURA 7. 2 – Micoprismas piramidais com base triangular.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM) “Metals Handbook Desk Edition” ASM International Handbook Committee, by Joseph R. Davis, ed. 2, p. 2571.

AKIKO ROCHA NISHIMOTO “Simulação numérica da injeção de termoplásticos em moldes” – Estudos comparativos de alguns modelos computacionais.” (2001). 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

BLOUGH, C. G.; ROSSI, M.; MACK, S. K.; MICHAELS, R. L. “Single-point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements.” *Applied optics*, v. 36, n. 20, p. 4648-4654, jul. 1997.

BAUER, H. D.; EHRFELD, W.; PAATZSCH, T.; SMAGLINSKI, I.; WEVER, L. “*Advanced Micromolding of Optical Components*” In M. E. Motamedi, Goering, R., (Eds.), *Miniaturized Systems with Micro-Optics and MEMS*, v. 3878, p. 261-270. Santa Clara, CA, USA: SPIE, 1999.

BÄUMER, S. “**Handbook of plastic optics**” Alemanha, Ed. WILEY-VCH verlag GmbH & Co. KGaA, 2005, p. 189.

BLACK, J. T. (1979). “Flow stress model in metal cutting”. *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, v. 101, p. 403-415.

BLASS, A. “**Processamento de Polímeros**” Santa Catarina: EdUFSC, 1995, p. 252.

BORN, M.; WOLF E. “**Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light**” United Kingdom, Cambridge university press, 1999, 7 expanded ed, p. 952.

BRENNER, K. H., KUFNER, S., MOISEL, J., MULLER, A., SINZINGER, S., AND TESTORF, M. “*Application of Three-Dimensional Micro-Optical Components Formed by Lithography, Electroforming, and Plastic Molding*” *Applied Optics*, v.32, n.32, p. 6464-6469, Nov.1993.

BRINKSMEIER, E.; PREUSS, W.. Complex surface – applications and generation by diamond machining. Proc. 12th Annual meeting ASPE, Norfolk, Virginia, USA, p.33-36, (1997).

BRYDSON, J. A. “**Plastics Materials.**” Boston, MA: Butterworth-Heinemann, 1995.

CALLISTER, W. D. “**Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais uma abordagem integrada**” Ed. LTC, p. 702, 2006.

C-MOLD DESIGN GUIDE, 1994. A Resource for Plastics Engineers, AC Technology, Ithaca, New York.

CHAO-CHANG A. C., SHI-CHI K. “A Study of Two-Stage Micro Injection Compression Molding Process for Diffractive Optical Lens”, **Key Engineering Materials** vol. 364, p.1211-1214, 2008.

CHOU, S. Y.; KRAUSS, P. R.; RENSTROM, P. J. “*Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers*” **Applied physics Letters** v. 67, n. 21, p. 3114-3116, nov. 1995.

CRAWFORD, R. J. “**Plastics Engineering**” Pergamon Press, 1987, p. 350.

DANNBERG, P.; BIERBAUM, R.; ERDMANN, L.; BRAUER, A. “*Wafer Scale Integration of Micro-Optic and Optoelectronic Elements by Polymer UV Reaction Moulding*,” In M. R. Feldman, Grote, J.G., Hibbs-Brenner, M.K., (Eds.), *Optoelectronic Integrated Circuits and Packaging III*, v. 3631, p. 244-251, San Jose, CA: SPIE, 1999.

DAVIS, A. “*Microstructured Optics for LED Applications*” <http://www.display-optics.com>, 2002.

De CHIFFRE, L.; LONARDO, P.; TRUMPOLD, H.; LUCCA, D. A.; GOCH, G.; BROWN, C. A.; RAJA, J. HANSEN, H. N.. “Quantitative characterization of surface texture”. *Annals of the CIRP*, v. 49, n. 2, 2000, p. 635 – 652.

DOMENICALI, P.; FANTONE, S. D. “*MTF Metrology for high-NA microscope objectives*” *Biophotonics*, vol. 16, n. 7, set. 2009, p. 22 -24.

FIELD, M. & KAHLES, J. F. (1971) “Review of Surface Integrity of Machined Components”, *Annals of the Cirp*, v. 20, n. 2, p. 153-163.

FOREST, C. R. “*An Ultra-High Throughput Mutational Spectrometer for human genetic diseases*” 2007. 243 p. Ph.D. thesis. Massachusetts Institute of Technology MIT.

FOREST, C. R., SAEZ, M. A., HUNTER I W. “*Microforging technique for rapid, low-cost fabrication of lens array molds*” **Applied Optics** v. 46, n. 36, p. 8668-8673, dez. 2007.

FRESNEL TECHNOLOGIES. “Fresnel Lenses” p. 1-12, 2003.

GILL D. D.. “*Precision replication of co-molded meso and micro optics through injection molding*.” 2002. 202 p. Ph.D. thesis. North Carolina State University, 2002.

GOLDSTEIN, J.I. et al. (1992). “Scanning microscopy and x-ray microanalysis”, second edition, Plenum Press, New York City.

GOODMAN, J.W. “*Introduction to Fourier Optics*”, ed. 2, McGrawHill, p. 441, 1996.

GRIFFITHS, C.A, DIMOV, S. S., BROUSSEAU, E. B., HOYLE, R. T. “The effects of tool surface quality in micro-injection moulding” *Journal of Materials Processing Technology*, v. 189, n. 1-3, p. 418 – 427, 2007.

Referências Bibliográficas

GRIFFITHS, C.A, DIMOV, S. S., BROUSSEAU, E. B., PACKIANATHER, M. S. "The finite element analysis of melt flow behavior in micro-injection moulding" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, v. 222, n. 9, p. 1107 – 1118, 2008.

HANSEN, H. N., CARNEIRO, K., HAITJEMA, H., DE CHIFFRE, L. "Dimensional Micro and Nano Metrology." Annals of the CIRP, v. 55, n. 2, 2006, p. 721 – 743.

HECHT, E. "**Optics**" Nova York, READING : ADDISON-WESLEY, 1974c.,p. 564.

HUANG, C., "Investigation Of Injection Molding Process For High Precision Polymer Lens Manufacturing" 2008. 153 p. Ph.D. thesis. The Ohio State University

JANSEN, K. M. B., VAN DIJK, D.J., AND HUSSELMAN, M.H.. "Effect of Processing Conditions on Shrinkage in Injection Molding," Polymer Engineering and Science, vol. 38, n.5, 1998, p. 838-846.

KALPAKJIAN, S., SCHMID, S. R. "Manufacturing engineering and Technology" Pearson Prentice Hall NJ, 2006, ed, 5^a, p. 1295.

KAMBOUR, R. P., CARAHER, J.C., SCHNOOR, R.C., TODT, M.L., WANG, H.P., e WILLEY, S.J.. "Tensile Stresses in the Edges of Injection Moldings: Roles of Packing Pressure, Machine Compliance, and Resin Compression," **Polymer Engineering and Science**, vol. 36, n. 23, 1996, p. 2863-2874

KAROW, H. H. "**Fabrication Methods for Precision Optics**" Nova York: A Wiley-Interscience publication, 1993, p. 751.

KEMMANN, O., SCHAUMBURG, C., AND WEBER, L.. "**Micro Moulding Behaviour of Engineering Plastics**", In B. Courtois, et. al. (Eds.), Design, Test and Microfabrication of MEMS and MOEMS, vol. 3680, p. 464-471. Paris, França: SPIE, 1999.

KLOCKE, F., RÜBENACH, O. "Ultrasonic-assisted diamond turning of glass and steel" Diamond technology, vol. 3, 2000, p. 227-239.

KÖNIG, W.; WECK, M.; SPENRATH, N. & LUDERICH, J. (1991). "**Diamond machining technology**." (tutorial), 6th I. P. E. S. Sem., Braunschweig, p. 96.

KOREN, N. "Introduction to resolution and MTF curves" Base de Dados no ar desde 2007. Disponível em: < http://www.normankoren.com/Tutorials/MTF.html#MTF_links>. Acesso em: 21 Agosto 2010.

LEARTCHEONGCHOWASAK, S., MEHTA, M., AL-KADI, H., SEQUEIRA, K., SNOW, B., RAGSDELL, K.W., e BAJA, L.. "Robust Parameter Design of the Precision Injection Molding Process," **Advances in Design Automation**, vol. 2, n. 69, 1994, p. 1-6.

LEO, V., CUVELLIEZ, C.H.. "The Effect of the Packing Parameters, Gate Geometry, and Mold Elasticity on the Final Dimensions of a Molded Part" **Polymer Engineering and Science**, vol. 6, n. 15, 1996, p. 1961-1971.

LIN, T.H., ISAYEV, A.I., MEHRANPOUR, M., “Luminance of Injection-Molded V-Groove Light Guide Plates” **Polymer Engineering and Science**, vol. 48, n. 8, 2008, p. 1615-1623.

LIU, C., e MANZIONE, L.T.. "Process Studies in Precision Injection Molding I: Process Parameters and Precision" **Polymer Engineering and Science**, vol. 36, n.1, 1996, p. 1-9.

MANO, E. B. “*Polímeros como materiais de engenharia.*” São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1991, p. 197.

MARK, J. E. “*Physical properties of polymers handbook*” New York, NY, USA, Editora Springer Science, vol. 1, Ed. 2, 2007, p. 1076.

McKEOWN, P.A. (1987). “The role of precision engineering in manufacturing of the future”. **Annals of the Cirp**, v. 36, n. 2, p. 495-501.

MILLER, O. E., McLEOD, J. H., AND SHERWOOD, W.T. “*Thin Sheet Plastic Fresnel Lenses of High Aperture*” **Journal of the Optical Society of America**, v. 41 n. 11, Nov. 1951, p. 807-815.

MULLER, M.; SILVA, J. C. C.; FABRIS, J. L. “Um experimento simples usado na produção de placas de zonas de Fresnel”. CEFET- Paraná. Revista Brasileira de Ensino de Física. v. 27, n. 4, p. 603 – 608, 2005.

MURAKAMI O., KOTAKI M., HAMADA H., “Effect of molecular weight and molding conditions on the replication of injection moldings with micro-scale v-groove features” **Polymer Engineering & Science Volume**, vol. 48, n. 4, 2008, p. 697-704.

NIKOLAJEFF, F., JACOBSSON, S., HARD, S. BILLMAN, A. LUNDBLADH, L. LINDELL, C. “*Replication of continuous-relief diffractive optical elements by conventional compact disc injection molding techniques*” **Applied optics**, v. 36, n. 20, p. 4655-4659, jul. 1997.

OTTEVAERE, H., COX, R., HERZIG, H. P., MIYASHITA, T., NAESSENS, K., TAGHIZADEH, M., VÖLKEL, R., WOO, H. J., THIENPONT, H. “*Comparing glass and plastic refractive microlenses fabricated with different technologies*” **Journal of Optics A: Pure And Applied Optics**, v. 8, n. 7, p. S407-S429, 2006.

PARK, S. J., AND KWON, T.H.. "Optimal Cooling System Design for the Injection Molding Process" **Polymer Engineering and Science**, vol. 38, n.9, 1998, p. 1450-1462.

PAUL, E., EVANS, C.J., MANGAMELLI, A., MCGLAUFILIN, M.L. & POLVANI, R.S. “*Chemical aspects of tool wear in single point diamond turning.*” **Precision Engineering**, v. 18, p. 4-19, 1996.

PIOTTER, N. B., BENZLER, T., HANEMANN, T., WOLLMER, H., RUPRECHT, R., AND HAUSSELT, J. "Innovative Molding Technologies for the Fabrication of Components for Microsystems," In N. Courtois, et. al. (Eds.), Design, Test and Microfabrication of MEMS and MOEMS, v. 3680, p. 456-463, Paris, France: SPIE, 1999.

RIEMER, O. “A Review on Machining of Micro-Structured Optical Molds” Key Engineering Materials v. 364-366, p.13-18, 2008.

RIOLEICA “MTF - Função de Transferência de Modulação” Disponível em: <http://rioleica.com/index.php?option=com_content&view=article&id=61:MTF%20-%20Fun%C3%A7%C3%A3o%20de%20Transfer%C3%A2ncia%20de%20Modula%C3%A7%C3%A3o&catid=36:Tecnicos&Itemid=54>. Base de Dados no ar desde 2007. Acesso em: 5 Jun 2010.

SAHLI, M., MILLOT, C., ROQUES-CARMESA, C., KHAN MALEKB, C., BARRIEREA, T., GELINA J.C., “Quality assessment of polymer replication by hot embossing and micro-injection moulding processes using scanning mechanical microscopy” Journal of Materials Processing Technology, v. 209 n. 18-19, p. 5851 – 5861, 2009.

SCHMIEDERER, D., GARDOCKI, A., KÜHNERT, I., SCHMACHTENBERG, E., “Local Thermo-Oxidative Degradation in Injection Molding” **Polymer Engineering and Science**, vol. 48, n. 4, 2008, p. 717-722.

SCHUBERT, K., BIER, W., LINDER, G., SEIDEL, D. “Profiled Microdiamonds for Producing Microstructures” Precision Machining, 1990, p. 235-239.

SHAW, M. C. (1984). “Metal cutting principles”. Oxford Univ. Press, p. 594.

SILVA, A. R.. “*Confecção e caracterização óptica e estrutural de lentes plásticas obtidas pelo processo de injeção.*” 2002. 80 p. Dissertação (Mestrado em Física) - Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SLOCUM, A. H.; WILLOUGHBY, P. J.; WERKMEISTER, J. B. “*Silicon Insert Molded Plastic (SIMP).*” Precision Micro/Nano Scale Polymer Based Component and Device Fabrication, ASPE Annual Conference in Columbus, Ohio, USA, 2005.

SLOCUM, A.; “**Precision Machine Design**”. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1992, NJ.

SMITH, J. W. “**Modern Optical Engineering**” California, ed. McGraw-Hill, 2000, p. 617.

SOHN, A.; DOW, T. A. “Removal of Form Error in Replicated Optics,” In ASPE Spring Topical Meeting on Precision Fabrication and Replication, v. 19, p. 59-63. Chapel Hill, NC: ASPE, 1999.

SORS, L., BARDÓCZ, L., RADNÓTI, I.. “**Plásticos Moldes e Matrizes**” São Paulo Ed. HEMUS, 19--, p. 489.

TAYLOR HOBSON PRECISION (2000). “The parameter tree of surface roughness”. Taylor Hobson Centre of Excellence.

TITOMANLIO, G., JANSEN, K.M.B.. **"In-Mold Shrinkage and Stress Prediction in Injection Molding"** Polymer Engineering and Science, vol. 36, n. 15, agosto de 1996, p. 2041-2049.

TOFTEBERG, T., AMÉDRO, H., ANDREASSEN, E. "Injection Molding Diffractive Optical Element" Polymer Engineering and Science, vol. 48, n. 11, p. 2134 - 2142, 2008.

THOMAS, G. B., FINNEY, R. L., WEIR, M. D., GIORDANO, F. R. **"Cálculo George B. Thomas"**. Tradução Paulo Boschcov. Revisão Leila Maria V. Figueiredo. 10. ed, vol. 1. São Paulo, Brasil: Pearson Addison Wesley, 2002. 660 p.

WEISSMAN, H. M. "Epoxy Replication of Optics" **Optical Engineering**, v.15, n. 5, p. 435-441, 1976.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **"Plásticos de engenharia tecnologia e aplicações"** São Paulo: Editora Artliber LTDA, 2005, p. 349.

YAN, J.; MAEKAWA, K.; TAMAKI, J. KURIYAGAWA, T. "Micro grooving on single-crystal germanium for infrared Fresnel lenses" Journal of Micromechanics and Microengineering, v. 15, p. 1925-1931, 2005.

YOSHII, M.; KURAMOTO, H.; OCHIAI, Y., **"Experimental Study of the Transcription of Minute Grooves by Injection Molding (II)"**, Polymer Engineering and Science, vol. 38, n.9, Setembro 1998, p. 1587-1593.

ZHANG, H. L., ONG, N. S., LAM, Y. C., "Experimental Investigation of Key Parameters on the Effects of Cavity Surface Roughness in Microinjection Molding" Polymer Engineering and Science, vol. 48, n. 3, p. 490 - 495, 2008.

TAY, B.Y., , LIU, L., LOH, N.H., TOR, S.B., MURAKOSHI, Y. e MAEDA R. "Surface roughness of microstructured component fabricated by μ MIM" Materials Science and Engineering A, vol. 396, n. 1-2, p. 311 – 319, 2005.

ANEXO A – Laudo técnico do Cobre Eletrolítico

CERTIFICADO DE QUALIDADE N° 6482

Cliente.: COML. DANTUBO METAIS E SERVICOS LTDA

Vota Fiscal N.: 00007123

Item	Material	Especificacao
01	BARRED COBRE 050,80 MM - 1 PC	LIGA:110/ELETROLITICO

ANALISE QUIMICA

Item	Cu	Zn	SN	Pb	FE	Ni	P	Si
01	99,96							

Item	N	C	Mo	S	Ag	Zr	B	Ga
01								

ITEM	TI	CR	V	MN	NG	CD	AL	OUTROS
01								

ANALISE MECANICA

Item	Limite de Escoamento	Limite de Resistencia	Alongamento (%)	Resistencia Fadiga	Dureza	Limite de Cisalhamento
01		310 MPA	22		81 HRF	

Observacao.:

campinas, 8 de Outubro de 2009

CONTROLE DE QUALIDADE

APÊNDICE A – Projetos

REVISION HISTORY

REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

SEÇÃO A-A

NAME	DATE
Jaco Paulo	10/26/09
CHECKED	
ENG APPR	
MGR APPR	

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
ANGLES $\pm$ XX°
2 PL $\pm$ XX 3 PL $\pm$ XXX

SOLID EDGE
UGS - The PLM Company

TITLE
COBRE

SIZE	DWG NO	REV
A4		
FILE NAME: cobreopm03.dft		
SCALE: 1:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

REVISION HISTORY

REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

SOLID EDGE UGS - The PLM Company

NAME	DATE	SIZE	DWG NO	REV
DRAWN	João Paulo	10/28/09		
CHECKED				
ENG APPR				
MGR APPR				
TITLE				
INSERTO FIXO				
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGLES ±XX° 2 PL ±XXX 3 PL ±XXXX				
FILE NAME	INSERTO FIXO.dft	SCALE	1:1	WEIGHT
SHEET 1 OF 1				

REVISION HISTORY		
REV	DESCRIPTION	DATE

SOLID EDGE <i>UGS - The PLM Company</i>		TITLE	
		Colbre Prensa	
DRAWN	João Paulo	11/05/09	
CHECKED			
ENG APPR			
MGR APPR			
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGLES °XX'		SCALE	2:1
		WEIGHT:	SHEET 1 OF 1
2 PL #XXX 3 PL #XXX		SIZE	A4
		FILE NAME	colbre_prensa.dft

REVISION HISTORY			
REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

DRAWN	NAME	DATE	SOLID EDGE UGS - The PLM Company	
	José Paulo	10/26/09		
CHECKED			TITLE	
ENG APPR			Suporte Alumínio	
MGR APPR				
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGLES =XX° 2 PL =XXX 3 PL =XXXX			SIZE	REV
			A4	1
FILE NAME SUPORTE ALUMINIO.dft			SCALE	12
2 PL =XXX 3 PL =XXXX			WEIGHT:	SHEET 1 OF 1