

FIDELIDADE DA REPLICAÇÃO DE LENTES POLIMÉRICAS INJETADAS EM INSERTOS DE COBRE ELETROLÍTICO USINADOS POR ULTRA-PRECISÃO COM FERRAMENTA DE DIAMANTE

José Ricardo Camilo Pinto, jrcamilo@ifsp.edu.br¹

Renê Mendes Granado, rmgra@ime.uerj.br²

Renato Goulart Jasinevicius, renatoj@sc.usp.br³

Giuseppe Antonio Cirino, gcirino@ufscar.br⁴

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP-Câmpus Votuporanga. Av Jerônimo Figueira da Costa, 3014. CEP 15503-110. Votuporanga - SP,

² Instituto de Matemática e Estatística – CTC-UERJ. Rua São Francisco Xavier, 524. CEP 20550-013. Rio de Janeiro – RJ,

³ Lab. Eng. Precisão – Departamento de Engenharia Mecânica – EESC-USP. Av Trabalhador Sãocarlense, 400. CEP 13566-590. São Carlos – SP,

⁴ Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – CCET-UFSCAR. Rodovia Washington Luis Km 235 - SP 310. CEP 13565-905. São Carlos – SP.

Resumo: O objetivo deste trabalho foi analisar a precisão geométrica e acabamento óptico do microcomponente com características submicrométricas injetado em molde usinado com ferramenta de diamante monocristalino. As cavidades das lentes nos insertos em cobre eletrolítico foram torneadas com ferramenta de diamante mono cristalino sendo que os melhores valores da rugosidade foram obtidos com profundidade de usinagem de $1\mu\text{m}$ e a taxa de avanço de $1\mu\text{m}/\text{rev}$. As lentes de diâmetro igual a 3 mm e altura de 1 mm foram moldadas por injeção em polimetilmetacrilato óptico (PMMA). As amostras foram medidas por perfilometria óptica e os resultados apresentaram boa precisão no molde, boa fidelidade de replicação da lente e baixa rugosidade no inserto e na lente. As diferenças entre os valores de rugosidade S_a referente ao inserto, e S_q a lente foram 3,07 nm e 4,41 nm, respectivamente.

Palavras-chave: ferramenta de diamante, usinagem de ultra-precisão, elementos ópticos difrativos, micro injeção, polimetilmetacrilato.

1. INTRODUÇÃO

A miniaturização de partes e componentes desempenha um importante papel na economia nos dias atuais, permitindo o desenvolvimento e produção de nova e altamente sofisticada tecnologia em vários campos industriais como medicina, bioquímica, automotiva e telecomunicações. Métodos de fabricação de materiais poliméricos em micro escala têm sido muito pesquisados nos últimos anos, tanto na indústria quanto na academia.

O processo de moldagem por micro injeção está cada vez mais sendo investigado utilizando microestruturas fabricadas através de usinagem de ultraprecisão (SCHNEIDER et al., 1999). Esta tecnologia permite a reprodução de microestruturas em polímero, cerâmica e metal (BRINKSMEIER e PREUß, 1999; PIOTTER et al., 2002). Um fator decisivo para a qualidade óptica dos componentes injetados é o uso de moldes e insertos fabricados usando a tecnologia de torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante, onde pequenos componentes podem ser produzidos (diâmetros de 1 a 5 mm), com precisão de forma $< 1\mu\text{m}$ e rugosidade superficial de $R_a < 10\text{ nm}$ (BAUER et al., 2000).

A usinagem de ultraprecisão ou torneamento com ferramenta de diamante é uma tecnologia que elimina quase todas as etapas com processos convencionais (retificação, lapidação e polimento) para fabricação de elementos ópticos difrativos. A grande vantagem deste processo em relação aos tradicionais é a capacidade de gerar superfícies complexas denominadas anesféricas. Isto se deve ao fato que no torneamento é possível determinar e controlar a trajetória da ferramenta. Exigências de acabamento superficial na ordem de dezenas de nanômetros (10^{-9} m ou $0,001\mu\text{m}$) e precisão forma na faixa de μm a sub- μm são geralmente obtidas com esse processo (RUPRECHT et al., 2002).

2. EXPERIMENTAL

O tipo de microestrutura selecionada para este estudo foi uma lente anesférica como mostrado na Fig. (1).

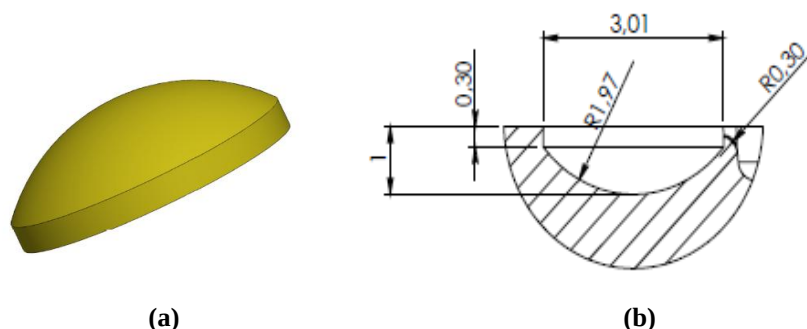


Figura 1. Lente anesférica: (a) ilustração (b) dimensões da lente anesférica.

Para a moldagem de microcomponentes, o fator mais importante é a viscosidade do polímero. A viscosidade do polimetilmetacrilato (PMMA) é maior que a do que a maioria dos polímeros no mesmo intervalo de temperatura. Isso requer que o polimetilmetacrilato seja injetado mais lentamente, a uma maior pressão, e que os canais de alimentação e injeção do molde possam ser projetados com maiores dimensões. As temperaturas do molde e da rosca de plastificação, também são mais elevadas em relação a outros materiais. Além da reduzida contração linear, outras vantagens do polimetilmetacrilato é a alta transmissão óptica e índice de refração e birrefringência baixos. As lentes foram confeccionadas em polimetilmetacrilato, cujo nome comercial é PLEXIGLAS® V825, fabricado pela empresa Altuglas International.

O equipamento utilizado fabricado pela empresa Dr. Boy GmbH & Co. KG é uma injetora horizontal, série 22M, que corresponde às necessidades do processo de produção pretendido.

Neste trabalho os insertos foram fabricados em cobre eletrolítico livre de oxigênio de alta condutividade. O uso do cobre eletrolítico livre de oxigênio de alta condutividade como material para os insertos deve-se ao fato do mesmo ser compatível com o material da ferramenta de corte, permitindo facilmente a usinagem e geração de superfícies espelhadas, com bom acabamento para fins ópticos, sem a necessidade de processos de polimento posteriores.

A usinagem do perfil da lente nos insertos foi realizada na máquina geradora de superfícies anesféricas marca RANKO PNEUMO, modelo ASG 2500, equipada com comando numérico computadorizado, marca ALLEN-BRADLEY, modelo CNC 8200. Foi utilizada ferramenta de diamante monocristalino, marca CONTOUR FINE TOOLING®, modelo HCO 10 m LGC, com $\gamma = 0^\circ$ e $\rho = 0^\circ$, cujo perfil pode visto na Fig. (2).

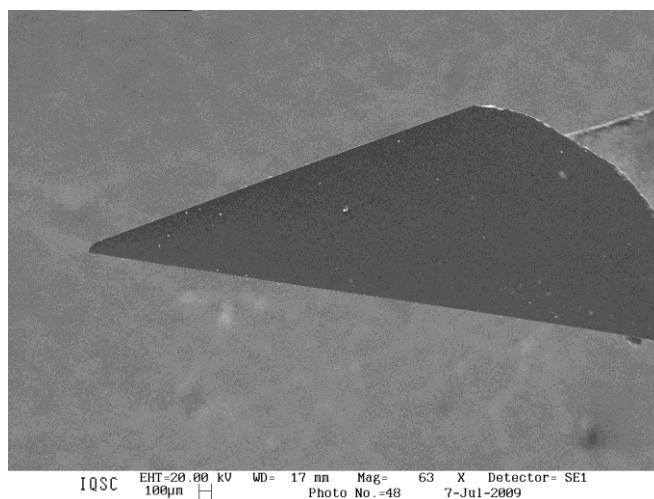


Figura 2. Fotomicrografia feita através da MEV da ferramenta de diamante monocristalino CONTOUR, modelo HCO 10m LGC.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No torneamento de face para determinar a melhor condição de usinagem da cavidade do molde foram adotadas taxas de avanço de 1, 2, 3, 5 e 10 $\mu\text{m}/\text{rev}$, com profundidade de usinagem de 1 μm , pois a variação deste valor não

influencia os resultados da rugosidade, e 1000 rpm constante. Os valores de rugosidade, S_a e S_q , definidos respectivamente como a rugosidade média e rugosidade média quadrática, são mostrados na Tab. (1).

Tabela 1. Valores das rugosidades S_a e S_q na usinagem dos insertos.

PROF. USINAGEM(μm)	AVANÇO ($\mu\text{m}/\text{rev}$)	RUGOSIDADE S_a (nm)	RUGOSIDADE S_q (nm)
1	1	17,87	24,43
1	2	18,85	25,22
1	3	20,17	26,11
1	5	29,05	38,65
1	10	148,62	175,75

Os resultados mostram que os melhores valores da rugosidade $S_a = 17,87$ nm e $S_q = 24,423$ nm foram obtidos na usinagem com o avanço de $1 \mu\text{m}/\text{rev}$. O gráfico da Fig. (3) ilustra a variação da rugosidade em função do avanço.

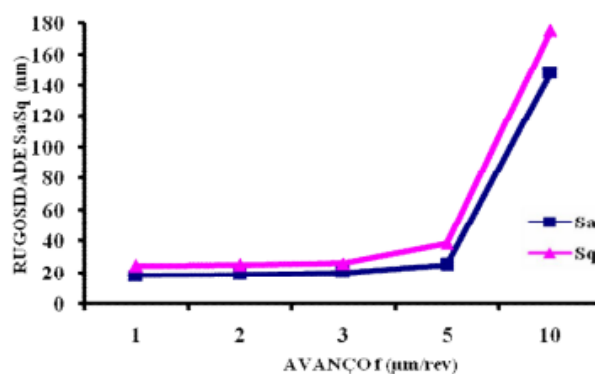


Figura 3. Variação da rugosidade em relação ao avanço.

Na Fig. (4) (a) é apresentada a perfilometria em 3D da topografia da superfície usinada com avanço $f = 1 \mu\text{m}/\text{rev}$ e profundidade de usinagem $a_p = 1 \mu\text{m}$ e, em (b) a rugosidade desta superfície.

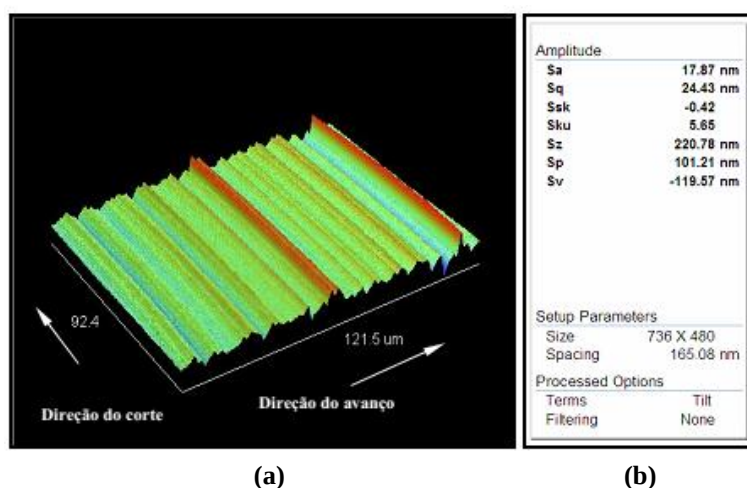


Figura 4. (a) Perfilometria da superfície usinada com ferramenta de diamante e (b) Valores da rugosidade S_a e S_q .

Na Fig. (5) (a) a imagem feita através da microscopia óptica da superfície do inserto da lente anesférica mostra a microestrutura com o contorno dos grãos do material. Em (b) pode ser visto as marcas da ferramenta várias vezes no mesmo grão, evidenciando que o passo $f = 1 \mu\text{m}$ usado no experimento é menor que o tamanho médio do grão,

ocasionando que o corte seja realizado dentro deste. Os contornos dos grãos influenciam no acabamento da superfície usinada por conterem impurezas decorrente do processo de fundição durante a solidificação do material.

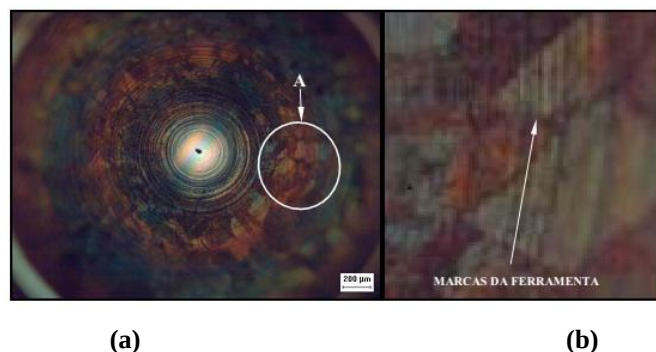


Figura 5. Microscopia óptica de superfície. (a) Contornos dos grãos na cavidade anesférica. Magnificação: 200X. (b) Detalhe A ampliado mostra as marcas da ferramenta no mesmo grão.

As cavidades dos inserts foram analisadas através de MEV e perfilometria óptica, antes e depois do processo de injeção. A perfilometria óptica do inserto antes da injeção é apresentada na Fig. (6), sendo o centro da cavidade do inserto mostrado em (a). Em (b) são apresentados os parâmetros de rugosidade, cujo valor de S_a é 23,81 nm e S_q é igual a 29,96 nm. Estes valores são superiores aos obtidos nos testes preliminares de usinagem mostrados na tab. 2 ($S_a = 17,83$ nm e $S_q = 24,43$ nm), acarretando diferença de $S_a = 5,98$ nm e $S_q = 5,54$ nm, consideradas desprezíveis. O aumento da rugosidade da cavidade do inserto pode ser decorrente de alguns fatores como: trajetória da ferramenta ou arranhões decorrentes do contato do cavaco com a superfície. O perfil da cavidade apresenta contorno bem delineado como mostrado em (c) indicando a fidelidade da curva em relação à trajetória da ferramenta.

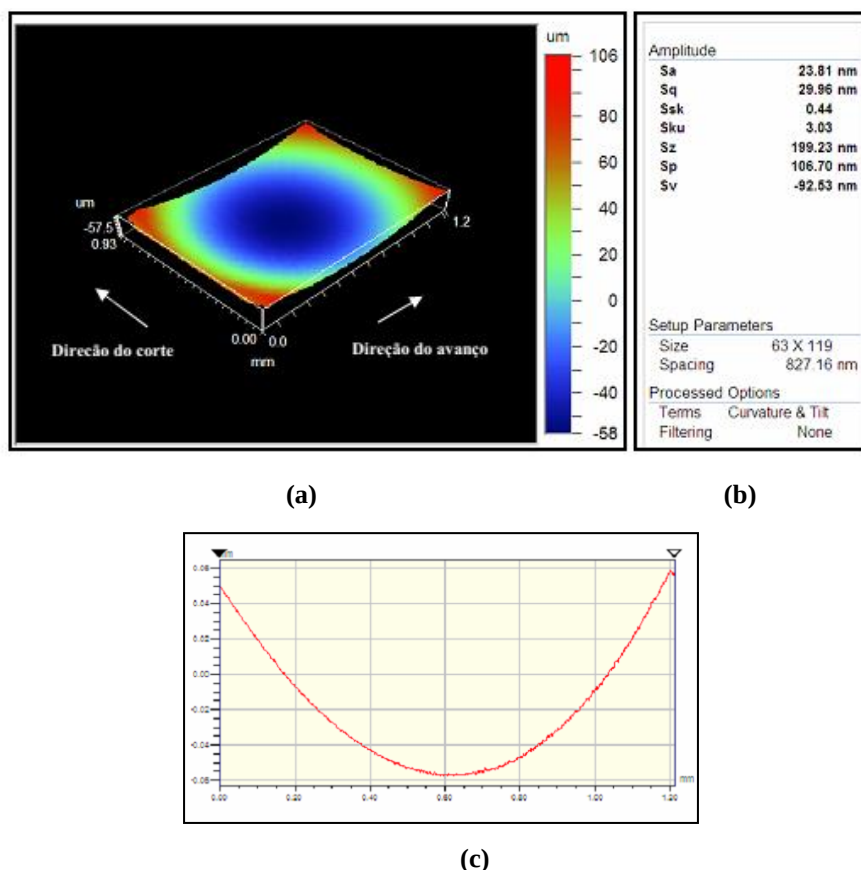


Figura 6. Inserto antes do processo de injeção: (a) centro da cavidade da lente anesférica, (b) valores da rugosidade S_a e S_q do inserto antes da moldagem e (c) perfil da cavidade do molde na direção do avanço.

A microscopia eletrônica de varredura, Fig. (7) (a), mostra a cavidade usinada antes de ser injetada, onde a exemplo da Fig. (5) (a), pode ser visto o contorno dos grãos. Em (b) a cavidade da lente anesférica após o processo de injeção.

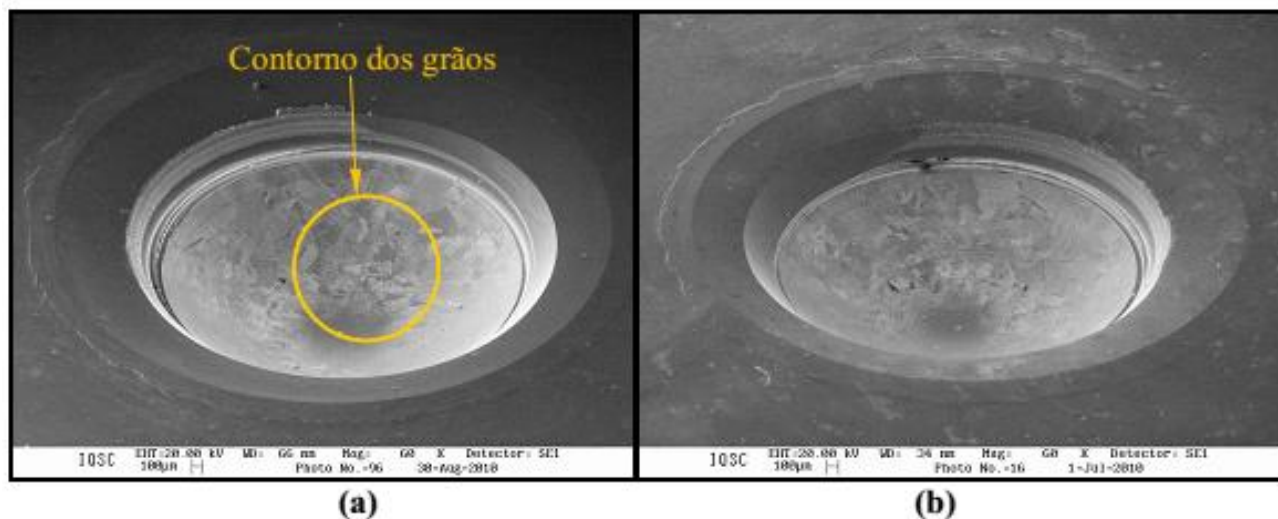


Figura 7. Fotomicrografia feita através de MEV da cavidade do inserto da lente anesférica. (a) Antes do processo de injeção. Magnificação: 60X. (b) Após o processo de injeção. Magnificação: 60X.

A perfilometria tridimensional da superfície da lente, Fig. (8) (a) gerou os parâmetros S_q de 25,85 nm e S_a de 20,74 nm de rugosidade relacionados em (b). Estes valores comparados com a rugosidade $S_q = 29,96$ nm e S_a de 23,81 nm obtidas na perfilometria do inserto antes do processo de injeção, mostrada na Fig. (6) (b), resultam nas diferenças de 4,11 nm e 3,07 nm entre o molde e a réplica, que são consideravelmente pequenas para o processo.

Embora a superfície do inserto seja usinada com ferramenta de diamante, esta pode apresentar marcas periódicas da ferramenta como mostrado na microscopia óptica da superfície do inserto, conforme Fig. (5) (b). Esses defeitos podem resultar em desempenho óptico reduzido, tais como a dispersão e distorção. O processo de moldagem por injeção pode reduzir estas marcas e consequentemente a rugosidade, pois vai havendo o preenchimento de massa nas microcavidades da superfície, sendo que este fato pode estar relacionado com os resultados obtidos.

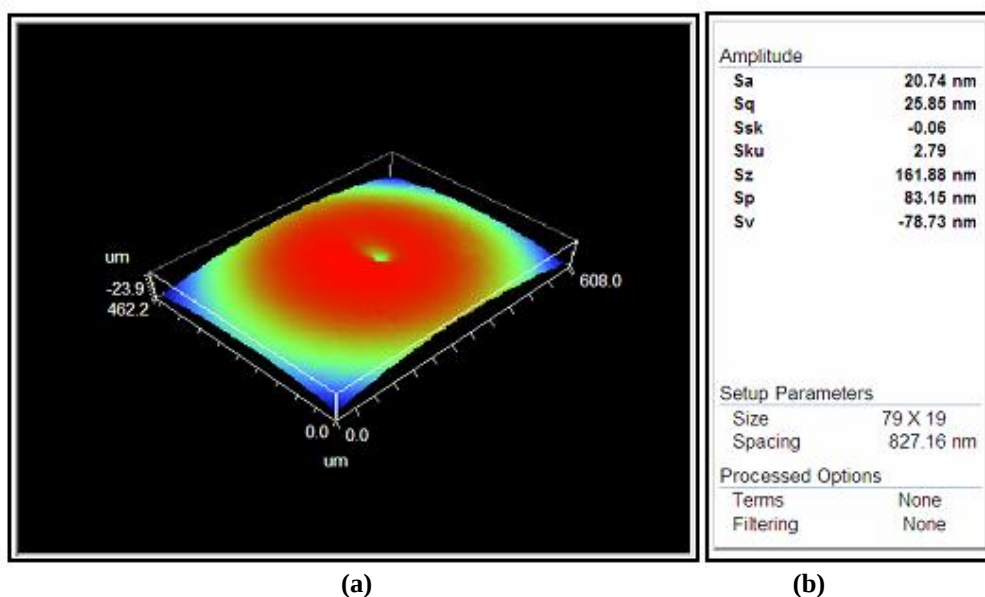


Figura 8. (a) Perfilometria da cavidade da lente anesférica. (b) Parâmetros de rugosidade.

A comparação entre os valores de rugosidade S_a e S_q relacionados ao inserto e a lente é apresentada na Tab. (2). A redução dos valores de rugosidade da lente pode ser decorrente do preenchimento das micro irregularidades superficiais originadas na usinagem, pelo polímero, conferindo a superfície melhor acabamento.

Tabela 2. Comparação entre os valores de rugosidade S_a e S_q da estrutura anesférica.

RUGOSIDADE (nm)	INSERTO (nm)	LENTE (nm)	DIFERENÇA (nm)	VARIAÇÃO (%)
S_a	23,81	20,74	3,07	12,89
S_q	29,96	25,85	4,41	14,71

O gráfico da Fig. (9) mostra a comparação entre as rugosidades dos insertos antes e após a moldagem, sendo que o pequeno aumento dos valores verificado entre as duas condições é decorrente do acúmulo do material injetado na cavidade do inserto durante o processo.

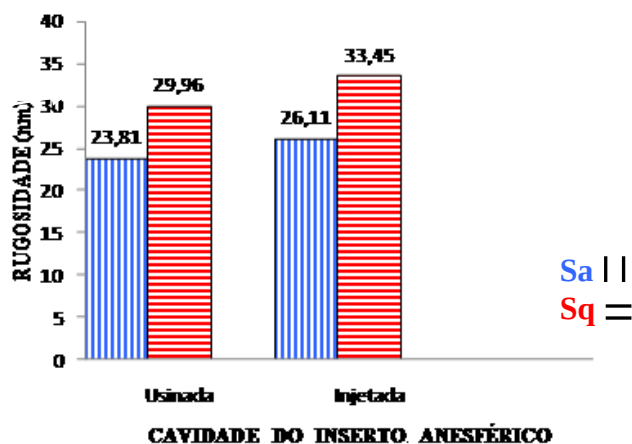


Figura 9. Gráfico de rugosidades do inserto anesférico antes e após a moldagem.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo desta pesquisa foi analisar a replicação de microelementos ópticos poliméricos. Esta investigação inclui a aprendizagem sobre o processo de micromoldagem por injeção, sua capacidade de reproduzir características de pequenas lentes e suas limitações. É possível obter microelementos poliméricos moldados por injeção, com qualidade e precisão óptica, utilizando moldes usinados com ferramenta de diamante monocristalino, onde a redução do custo de produção para a fabricação de moldes e moldagem da lente é fator de suma importância.

A usinagem da cavidade dos insertos proporcionou alto grau de acabamento observado nas imagens da microscopia eletrônica de varredura, bem como na avaliação da rugosidade S_a . Embora os valores da rugosidade do inserto e das lentes replicadas tenham ficado acima do esperado para superfícies ópticas, onde é recomendado estar na faixa de 5 a 10 nm, os experimentos apresentaram boa fidelidade de replicação.

5. REFERÊNCIAS

- Bauer, T., Müller, W., Petzold, S., 2000, "Optik aus Kunststoff – Möglichkeiten und Grenzen". In: Jahrbuch für Optik und Feinmechanik, Berlin: Verlag Scheile & Schön, pp. 40-44.
- Brinksmeier, E., Preuß, W., 1999, "Fabrication of Precision Molds", 1st Gen. Meet.- Eur. Soc. for Prec. Eng. and Nanotechnol, Bremen, Alemanha, pp. 420-423.
- Piotter, V., Holstein, N., Merz, L., Ruprecht, R., Hausselt, J., 2002, "Methods for Large Scale Manufacturing of High Performance Micro Parts", Proc. of the 3rd Int. Conf. Eur. Soc. of Prec. Eng., Eindhoven, Holanda, pp. 337-340.
- Ruprecht, R., Gietzelt, T., Müller, K., Piotter, V., Hausselt, J., 2002, "Injection Molding of Microstructured Components From Plastics", Metals and Ceramics Microsystem Technology, Vol. 8, No 4-5, pp. 351-358.
- Schneider, L., Kunzmann, H., Schulz, M., Thiele, K., Weingärtner, I., Hasche, K., Hannemann, J., 1999, "Investigation of the Topography and Optical Behaviour of Microstructured Fresnel Lenses Molds for Injection", 1st Gen. Meet. EUSPEN, Bremen, Alemanha, pp. 462-465.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

REPLICATION FIDELITY OF INJECTED POLYMERIC LENSES IN ELECTROLYTIC COPPER INSERTS BY ULTRA-PRECISION DIAMOND TOOL

José Ricardo Camilo Pinto, jrcamilo@ifsp.edu.br¹

Renê Mendes Granado, rmgra@ime.uerj.br²

Renato Goulart Jasinevicius, renatoj@sc.usp.br³

Giuseppe Antonio Cirino, gcirino@ufscar.br⁴

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP-Câmpus Votuporanga. Av Jerônimo Figueira da Costa, 3014. CEP 15503-110. Votuporanga - SP,

² Instituto de Matemática e Estatística – CTC-UERJ. Rua São Francisco Xavier, 524. CEP 20550-013. Rio de Janeiro – RJ,

³ Lab. Eng. Precisão – Departamento de Engenharia Mecânica – EESC-USP. Av Trabalhador Sãocarlense, 400. CEP 13566-590. São Carlos – SP,

⁴ Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – CCET-UFSCAR. Rodovia Washington Luis Km 235 - SP 310. CEP 13565-905. São Carlos – SP.

Abstract: The objective of this work was to analyze the geometric precision and optical finishing of the microcomponent with submicron characteristics injected in mold machined with monocrystalline diamond tool. The lenses cavities machined on electrolytic copper inserts by monocrystalline diamond tool and very low roughness values was obtained with depth of cut of $1\mu\text{m}$ and the feed rate of $1\mu\text{m} / \text{rev}$. The lenses with a diameter of 3 mm and a height of 1 mm were molded by injection process in optical polymethylmethacrylate (PMMA). The samples were measured by optical profilometry and the results showed good accuracy in the mold, good fidelity of lens replication and low roughness between insert and lens. The differences of roughness values S_a referring to insert, and S_q the lens were 3.07 nm and 4.41 nm, respectively.

Keywords: monocrystalline diamond tool, ultraprecision machining, diffractive optical elements, microinjection, polymethylmethacrylate.