

## AVALIAÇÃO DA MICROMOLDAGEM ATRAVÉS DE Prensagem A Frio DE MICROESTRUTURAS GERADAS ATRAVÉS DE TORNEAMENTO COM FERRAMENTA DE DIAMANTE

Paulo Nuno Pereira Dias, [pnpdias@yahoo.com.br](mailto:pnpdias@yahoo.com.br)  
Renato Goulart Jasinevicius, [renatogj@sc.usp.br](mailto:renatogj@sc.usp.br)

Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, C.P. 359, CEP 13566-590, São Carlos, São Paulo, Brazil

**Resumo:** Para muitas aplicações, a reprodução em larga escala de microestruturas e microlentes podem ser viabilizadas através de técnicas de microinjeção e/ou moldagem a frio. Os moldes demandam superfícies com acabamento superficial com qualidade óptica e opcionalmente as paredes da microestrutura necessitam ser ligeiramente inclinadas e livres de rebarbas para facilitar a desmoldagem. Neste trabalho será investigada a conformação através da prensagem a frio de microestruturas geradas em um molde de cobre eletrolítico. Para os testes serão usados diferentes microgeometrias geradas através de torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante. Após a fabricação do molde, testes de moldagem a frio foram realizados. O objetivo desse trabalho é avaliar o desempenho do processo de moldagem a frio de uma resina acrílica. Será avaliado aspectos relacionados a interações entre a superfície do micromolde e o polímero em termos de i) secção transversal resultante; ii) a rugosidade; iii) a profundidade máxima alcançada durante a prensagem, iv) fidelidade de reprodução de micro perfis pertencente ao arranjo de microcomponentes e v) a uniformidade das estruturas obtidas. Os parâmetros foram analisados na fabricação tanto do molde em cobre quanto da replica em resina acrílica. Nossos resultados confirmaram que é possível reproduzir com boa fidelidade microestruturas tridimensionais através da prensagem a frio e a custo bastante reduzido. Observou-se que tanto arestas delgadas e superfícies acabadas foram reproduzidas.

**Palavras-chave:** Micromoldagem, microestruturas, moldagem a frio, resina acrílica, torneamento com ferramenta de diamante

### 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de peças micromecânicas e/ou microópticas fabricadas em materiais resistentes, tem demandado, por um lado, profundos conhecimentos das técnicas de fabricação e mecanismos de remoção de material e, por outro, amplos conhecimentos sobre projeto, manufatura e garantia de qualidade.

Atualmente microcomponentes que possuem microestruturas tais como arranjos de microlentes, estão sendo produzidos em quantidades crescentes para aplicações ópticas, médicas e científicas. Dentre as novas aplicações dadas ao torneamento de ultraprecisão encontramos a fabricação desses microcomponentes para fins de reprodução em escala.

Essas microestruturas podem ser geradas através do torneamento ou *fly-cutting* com ferramentas de diamante. Estes processos são utilizados para obtenção de ranhuras lineares ou estruturas periódicas de micro-prismas.

A confecção de microestruturas com qualidades ópticas pode ser obtida por diversos processos, um deles, a litografia onde um perfil desejado é obtido através da remoção sucessiva de camadas através de ataque químico. No entanto, o torneamento com ferramenta de diamante com ângulos pré-definidos se demonstra muito eficaz quando usado para este fim, pois ele oferece a vantagem de também gerar superfícies com geometrias complexas (Flucke et AL., 2007, Chen et al., 2007).

Todavia, como a escala de operação encontra-se na ordem de micrômetro para submicrômetro, o efeito de propriedades do material em mecanismos de microusinagem é considerado extremamente importante. Hocheng e Hsieh, (2004) mostram que a usinagem de materiais policristalinos envolve aspectos interessantes relatados para interação ferramenta/material.

Para muitas aplicações, a reprodução em larga escala de microestruturas e microlentes podem ser viabilizadas através de técnicas de microinjeção, termoformagem e moldagem a frio (Guo et al., 2007).

Os moldes demandam superfícies com acabamento superficial com qualidade óptica e opcionalmente as paredes da microestrutura necessitam ser ligeiramente inclinadas e livres de rebarbas para facilitar a desmoldagem.

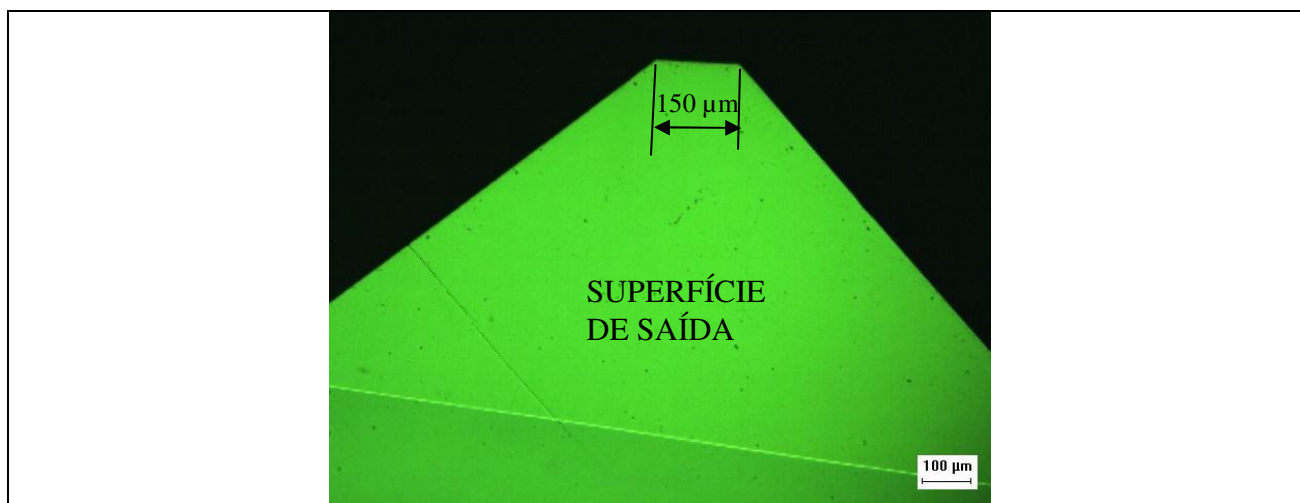
Aliado a isso, elas devem ser produzidas em materiais duros para resistir ao desgaste devido aos milhares de ciclos a que estão submetidos (Kalima et al., 2008; Kim e Kang, 2003).

Outro aspecto interessante é que se de um lado as tecnologias de fabricação de microestruturas buscam novos materiais para melhorar a vida útil dos moldes, por outro se busca também injetar novos materiais. A exemplo disso a literatura recente mostra o interesse crescente em se produzir componentes com microestruturas através de micro-injeção e replicação de pos metálicos e cerâmicos, além de outros materiais como os polímeros, por exemplo, polimetilmetacrilato (PMMA). Isto abre novas oportunidades de integração em pesquisas e desenvolvimento.

O objetivo desse trabalho é avaliar o desempenho do processo de moldagem a frio em resina acrílica. Será avaliado aspectos relacionados a interações entre a superfície do micromolde e o polímero em termos de i) secção transversal resultante; ii) a rugosidade; iii) a profundidade máxima/mínima alcançada durante a moldagem, iv) fidelidade de reprodução de micro perfis pertencente ao arranjo de microcomponentes e v) a uniformidade das estruturas obtidas. Os parâmetros analisados na fabricação tanto do molde em cobre quanto da replica em resina acrílica. Nossos resultados confirmaram que é possível reproduzir com boa fidelidade microestruturas tridimensionais através da prensagem a frio e a custo bastante reduzido. Observou-se que tanto arestas delgadas e superfícies acabadas foram reproduzidas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A máquina-ferramenta utilizada para a realização destas características na peça de cobre foi a Geradora de Superfícies Anesféricas (Aspherical Surface Generator) ASG 2500 da fabricação Rank-Pneumo (atualmente TAYLOR & HOBSON PNEUMO), a qual está disponível no laboratório de usinagem de ultraprecisão da Escola de Engenharia de São Carlos. Esta máquina é projetada tanto para torneamento quanto para retificação de ultraprecisão. A temperatura ambiente foi mantida em  $21^\circ \pm 0,1^\circ\text{C}$ . Utilizou-se ferramenta com ângulo de saída de  $-5^\circ$ , ângulo de folga  $5^\circ$  e ponta de  $150\ \mu\text{m}$  (Figura 1). A ponta da ferramenta apresenta um ângulo de posição secundário de  $2^\circ$ . Cobre eletrolítico e resina acrílica foram usados como materiais de teste. As amostras obtidas de barras de cobre com 25,4 mm de diâmetro, foram cortadas na espessura de 16 mm. Todas as amostras foram pré-usinadas em torno convencional, e posteriormente polidas para eliminar irregularidades do faceamento inicial. As cavidades foram geradas no centro da amostra. As cavidades foram usinadas com avanço de  $1,5\ \mu\text{m}/\text{rev.}$ , as profundidades de usinagem variaram de acordo com a altura das ranhuras que variaram de  $5\ \mu\text{m}$  a  $15\ \mu\text{m}$  e a velocidade do eixo da árvore constante em 1000 rpm. O fluido refrigerante utilizado foi ALKALISOL 9000, com função de lubrificar e refrigerar, direcionado em forma de névoa na interface peça/ferramenta.



**Figura 1. Imagem feita através de microscopia óptica da ponta da ferramenta de diamante usada na confecção das cavidades.**

O polímero usado para moldagem a frio é uma resina acrílica. A receita para moldagem é:

- a) 20g de resina acrílica;
- b) 0,3 ml de Estireno (Redelanse Prod. Indústria Ltda);
- c) 05 gotas de P MEC (Peróxido de Metil Etil Cetona);
- d) 01 gota de acelerador DMA (reduz o tempo de cura para 40 minutos).

Esse composto é misturado e então se molda as cavidades. Ao término da moldagem a frio a amostra acrílica, foi retirada do molde de cobre. A topografia e a rugosidade superficial tanto do molde de cobre, quanto da replica em PMMA, foram analisados em um perfilômetro, marca Taylor Hobson, modelo 120L. O Perfil é então capturado e os dados são lançados em gráfico através do programa de planilha Excel. O microscópio eletrônico de varredura usado para avaliação da cavidade do molde das replicações foi o modelo LEO modelo 440 disponível no CAQI-IQSC-USP. As amostras de polímero replicadas foram metalizadas com ouro para poder gerar as imagens uma vez que o polímero não é condutor.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 a) consiste de um perfil côncavo (prof. 30 micrometros) no centro da amostra seguido de ranhuras do tipo dente de serra (“blaze gratings”) com altura variável de acordo com a largura, como mostra o diagrama esquemático (Fig. 2b) com as respectivas condições construtivas ( $p$  =passo e  $h$  = altura). Desse modo o espaçamento ( $p$ ) e a altura ( $h$ ) são variáveis como mostra a imagem feita através de microscopia eletrônica de Varredura e o perfil gerado pelo perfilmetro mecânico (Fig.2c e 2 d, respectivamente). A Figura 2e consiste de um perfil de ranhuras do tipo dente de serra (“blaze gratings”) com altura constante e a largura variável, como mostra o diagrama esquemático (Fig. 2f) com as respectivas condições construtivas ( $p$  =passo e  $h$  = altura). Desse modo o espaçamento ( $p$ ) é variável e a altura ( $h$ ) constante como mostra a imagem feita através de microscopia eletrônica de Varredura e o perfil gerado pelo perfilmetro mecânico (Fig.2g e 2 h, respectivamente).

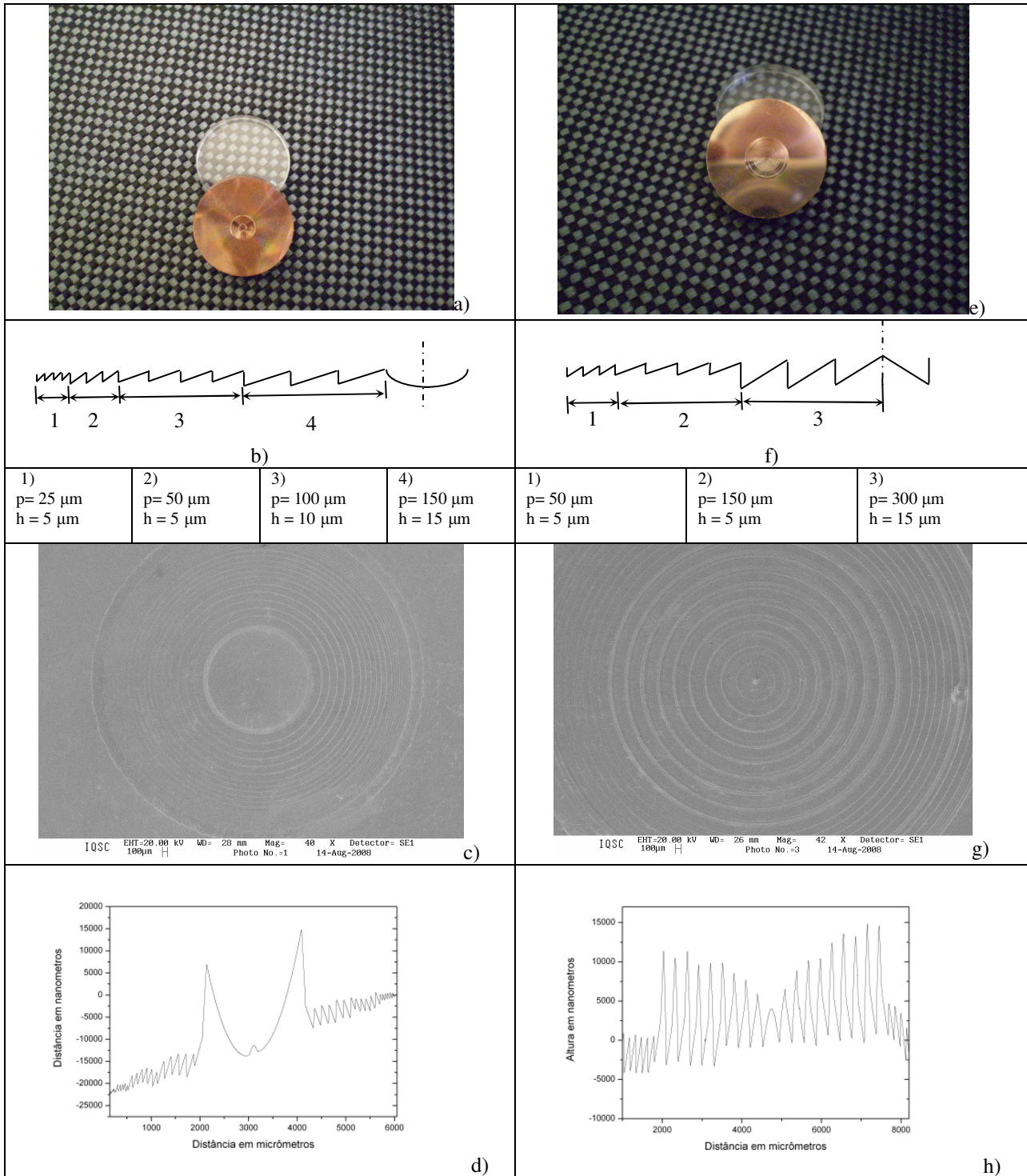
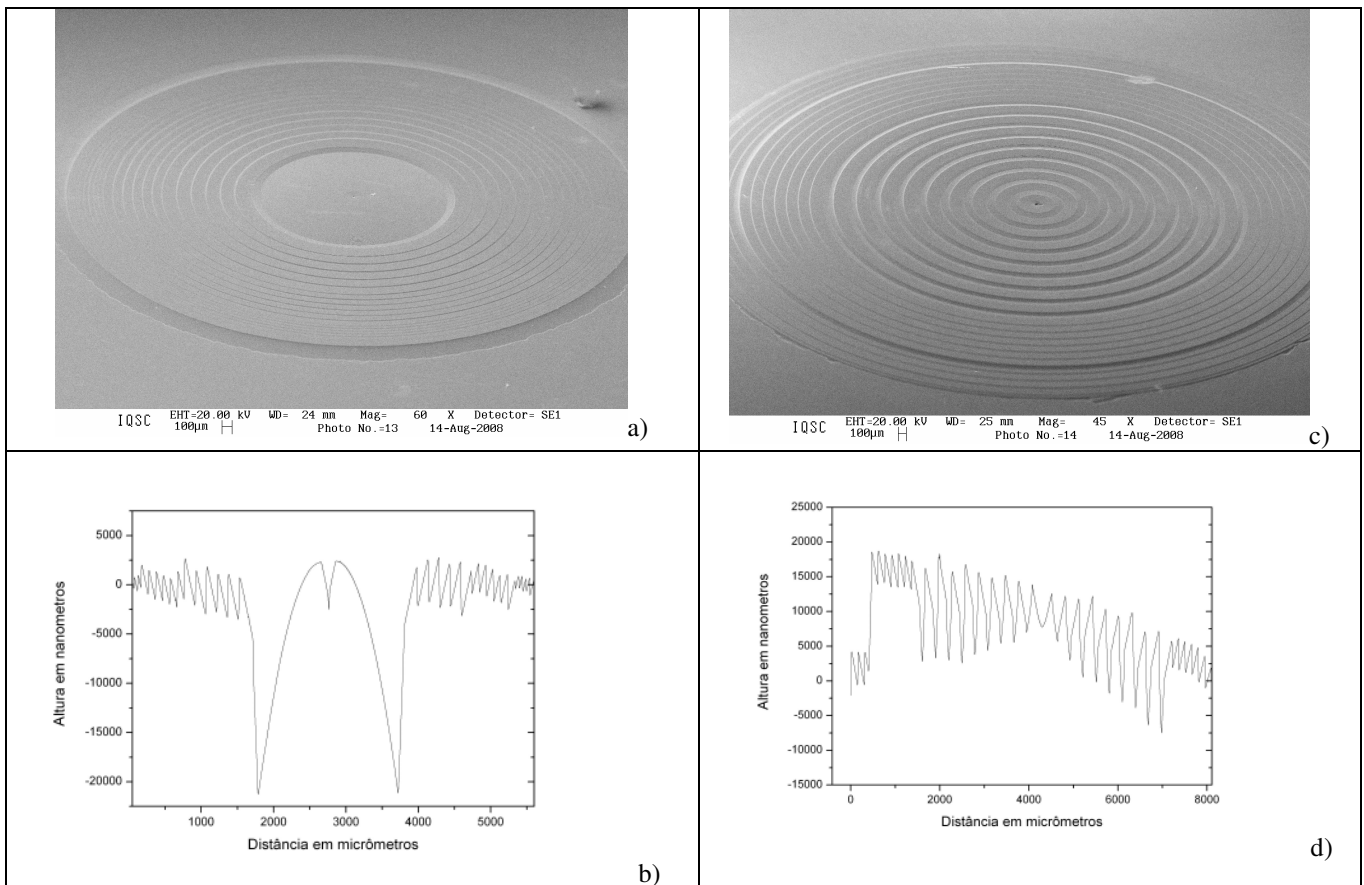


Figura 2. Moldes Gerados através de torneamento. a) cavidade teste 1; b) desenho esquemático das ranhuras; c) imagem de MEV da cavidade; d) perfil gerado pelo perfilmetro; e) cavidade teste 2; f) desenho esquemático das ranhuras; g) imagem de MEV da cavidade; h) perfil gerado pelo perfilmetro.

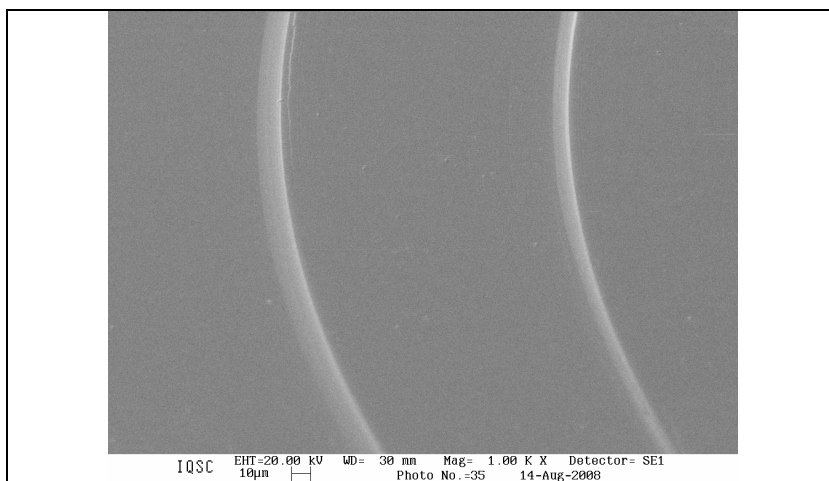


A Figura 3 apresenta imagem feita através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra moldada em resina acrílica. As Figuras 3 (a) e 3 (c) mostra a reprodução da cavidade e o respectivo perfil gerado pelo perfilmetro nas Figuras 3 (b) e 3 (d), respectivamente. As imagens mostram que a replicagem foi muito bem sucedida. Detalhes como o centro da amostra, que apresenta geralmente pequenas imperfeições devido a saída da ferramenta, foram perfeitamente replicadas como mostrado na Figura 3 (b) deve-se ressaltar que essa reentrância é aproximadamente 5 micrometros de profundidade.



**Figura 3. Imagens obtidas através de MEV mostrando a replicagem das cavidades apresentadas nas Figuras 2a) e 2 e), respectivamente; a) replica da cavidade mostrada na Figura 2 a); b) perfil da replica; c) replica da cavidade mostrada na Figura 2e); d) perfil da replica.**

A Figura 4 mostra uma imagem, feita através de MEV, apresentado o detalhe da ranhura reproduzida na resina acrílica. Pode-se observar que o perfil foi finamente replicado na amostra. A rugosidade medida na superfície da cavidade assim como a medida na superfície replicada apresentou valores bastante similares: 15 nm Ra na superfície da cavidade e 23 nm Ra no interior das ranhuras gradadas.



**Figura 4. Imagem obtida através de MEV mostrando que a replicagem das ranhuras não apresentam imperfeições geradas no processo de desmoldagem.**

Essa diferença, apesar de pequena, pode ser justificada através dos seguintes fatores: primeiro seria impossível passar com perfilometro sobre o mesmo espaço onde foi medido na cavidade; segundo porque normalmente o polímero pode sofrer pequenas expansões após processo desmoldagem. Deve-se ressaltar aqui que a cura total do polímero é de aproximadamente 2 horas, sendo que a demoldagem ocorreu após 40 minutos.

#### 4. CONCLUSÃO

Esse trabalho apresentou resultados sobre moldagem a frio de uma resina acrílica em uma cavidade gerada através de torneamento com ferramenta de diamante em uma amostra de cobre eletrolítico. Os parâmetros analisados na fabricação tanto do molde em cobre quanto da réplica em resina acrílica. Nossos resultados confirmaram que é possível reproduzir com boa fidelidade microestruturas tridimensionais através da prensagem a frio e a custo bastante reduzido. Observou-se que tanto arestas delgadas como o acabamento das superfícies foram reproduzidos com ótima fidelidade. A rugosidade Ra da amostra moldada apresentou resultado muito próximo ao valor da amostra usinada. A importância desses resultados remete-nos a possibilidade de se usar a réplica como matriz para reprodução da cavidade através da deposição de níquel. Para isso, seria necessário tornar a superfície da amostra de polímero condutora. Isso seria possível usando equipamento para deposição de filmes de ouro, por exemplo, comumente usado para microscopia eletrônica de varredura. Novos ensaios estão sendo realizados com “pellets” de polímeros usados para injeção de termoplásticos, a saber, Poliestireno (PS) e polimetilmetacrilato (PMMA), usando uma embutidora para Bakelite aplicada a amostras metalográficas.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Chen, Y., Li, L., Yi, A.Y., 2007, “Fabrication of precision 3D microstructures by use of a combination of ultraprecision diamond turning and reactive ion etching process” *J. Micromech. Microeng.* 17 pp.883–890
- Flucke, C. R., Gläbe, R., Brinksmeier, E., 2007, “Manufacturing of moulds for the replication of prismatic microstructures by a novel diamond cutting process” *Industrial Diamond Review*, no. 1, pp.25-30
- Guo, Y., Liu, G., Xiong, Y., Tian, Y., 2007, “Study of the demolding process—implications for thermal stress, adhesion and friction control” *J. Micromech. Microeng.* 17, pp. 9–19
- Hocheng, H., Hsieh, M.L. 2004, “Signal analysis of surface roughness in diamond turning of lens molds” *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44 pp.1607–1618
- Kalima, V., Siitonen, S., Karvinen, P., Suvanto, M., Kuittinen, M., Pakkanen, T. T., 2008, “Semi-crystalline poly(4-methyl-1-pentene) polymers for replication of high aspect ratio diffractive features” *J. Micromech. Microeng.* 18 025020 (9pp)
- Kim, S., Kang, S., 2003, “Replication qualities and optical properties of UV-moulded microlens arrays” *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36 2451–2456

## 6. DIREITOS AUTORAIS

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

### MICRO MOLDING PROCESS EVALUATION OF COLD MOLDING OF MICROSTRUCTURES GENERATED BY SINGLE POINT DIAMOND TURNING

Paulo Nuno Pereira Dias, pnpdias@yahoo.com.br

Renato Goulart Jasinevicius, renatogj@sc.usp.br

*Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, C.P. 359, CEP 13566-590, São Carlos, São Paulo, Brazil*

*Abstract: For many applications, the replication in large scale of microstructures and microlens may viable by means of microinjection and/or cold molding. The molds demand surfaces with low roughness and optical quality and the walls of the micro structure have presented a slight slope and be free of burrs in order to ease the demolding process. In this paper the cold molding process of micro structures generated by single point diamond turning in electrolytic copper Will be investigated. The tests Will generate different microgeometries based upon height and and width value. Afterwards, the mold cavity will be submitted to a replication by means of a cold molding using an acrylic resin. The objective of this work is to evaluate the performance of cold molding. The factors that will be assessed are related to the performance of the cutting tool and the replication of the mold cavity with the polymer resin in terms of i) cross section replication; ii) roughness replication; iii) depth of the replicated feature, iv) replication fidelity of the profile of the micro structures, and; v) the uniformity of the structures obtained. Our results show that it is possible to replicate the fine microstructures tridimensional profile by means of cold molding at a low cost. Fine edges as well as surface finish very well replicated were observed with scanning electron microscope.*

**Key words:** *Micro molding, microstructures, cold molding, acrylic resin, single point diamond turning.*