

# Caracterização óptica estrutural de superfícies geradas em polímero óptico (PMMA) através de torneamento com ferramenta de diamante

*Renê Mendes Granado  
Robson Alves de Oliveira  
Renato Goulart Jasinevicius*

**RESUMO.** Este trabalho apresenta os resultados de um estudo experimental para a avaliação da integridade superficial do Polimetilmetacrilato (PMMA), através da usinagem com ferramenta de diamante. A operação usada nos testes foi torneamento de face. Parâmetros de corte, taxa de avanço e profundidade de usinagem, foram variados. Duas ferramentas, com raios de ponta diferentes, foram usadas nos ensaios de corte sendo que as amostras usinadas com menor raio de ponta apresentaram melhor acabamento superficial. Detalhes da superfície gerada tais como danos e fidelidade do perfil da aresta da ferramenta foram avaliados através de Microscopia Eletrônica de Varredura. Resultados de transmitância medidos nos comprimentos de onda de 600 e 900nm foram comparados com resultados relatados na literatura de lentes de PMMA injetadas, demonstrando ser bastante próximos.

**Palavras-chave:** Ferramenta de diamante. Torneamento de ultra precisão. Transição dúctil-frágil. Polimetilmetacrilato.

## 1. INTRODUÇÃO

O uso da usinagem de ultraprecisão na fabricação de componentes produzidos a partir de materiais poliméricos, tem sido objeto de muitas pesquisas. A aplicação de polímeros ópticos pode ser observada em diferentes segmentos desde componentes ópticos a dispositivos eletrônicos, e sua produção está intimamente relacionada à fabricação de

microcomponentes através de técnicas de replicação, onde a reprodução em larga escala de microestruturas e microlentes podem ser viabilizadas através dos processos de microinjeção e termoformagem ou moldagem a frio (Blough et al, 1997). Devido a alta precisão dimensional e excelente qualidade superficial exigida, os componentes poliméricos para estas finalidades, são também produzidos pelo processo de acabamento por usinagem. Em muitos casos, o processo de usinagem é economicamente viável na fabricação de componentes poliméricos, devido à complexidade da geometria e/ou são produzidos em baixa escala. Para Carr e Feger (1993), os processos tradicionalmente usados para a produção de componentes poliméricos, não oferecem a precisão exigida para estas novas aplicações. O torneamento com ferramenta de diamante de ponta única possibilita a fabricação de componentes com geometrias complexas, dimensões micrométricas, precisão e acabamento final sem necessidade de outra operação. As pesquisas em usinagem têm sido direcionadas para as condições de corte e geometria da ferramenta ideais para cada tipo de material, visto que as condições reológicas de cada polímero terão influência fundamental no mecanismo de formação do cavaco e superfície final desejada (Saito, 1981). Normalmente é esperado que uma baixa velocidade e um raio de ponta grande irão produzir pequena rugosidade. Isto é comum no caso de corte de metais (Ávila et al, 2003). Entretanto, é importante mencionar que na usinagem de ultraprecisão as propriedades e microestrutura do material têm influência na superfície final (Jasinevicius et al, 2003). Isto não é diferente no caso de materiais poliméricos e, de acordo com Ávila et al (2003), durante a usinagem de um polímero, também as propriedades do material exercem importante influência na qualidade final. O polimetilmetacrilato é usado aproximadamente em dois terços de todos os componentes ópticos. Boa estabilidade óptica, fácil usinabilidade, dureza e resistência a intempéries, são algumas características deste material. Este polímero apresenta transparência igual a finos vidros ópticos, tendo transmitância em torno de 92% e índice de refração de 1,49 (Bauer, Müller e Petzold, 2000). De acordo com pesquisas realizadas na usinagem de materiais poliméricos (Xiao e Zhang, 2002), a qualidade e precisão da superfície final do material, é afetada pela presença de irregularidades tais como: rugosidade excessiva, trincas, marcas da ferramenta e queima da superfície. Isto ocorre como resultado das características de corte, geometria da ferramenta e propriedades do material. Devido à severidade dos danos originados na usinagem de materiais

poliméricos, alguns procedimentos devem ser cuidadosamente aplicados para garantir resultados aceitáveis, tais como: velocidade de corte, profundidade de usinagem, velocidade de avanço e geometria da ferramenta. A caracterização das amostras usinadas teve como objetivo estabelecer parâmetros que permitam verificar a qualidade óptica obtida no torneamento de ultra precisão com ferramenta de diamante, comparada a lentes injetadas em PMMA.

## 2. METODOLOGIA

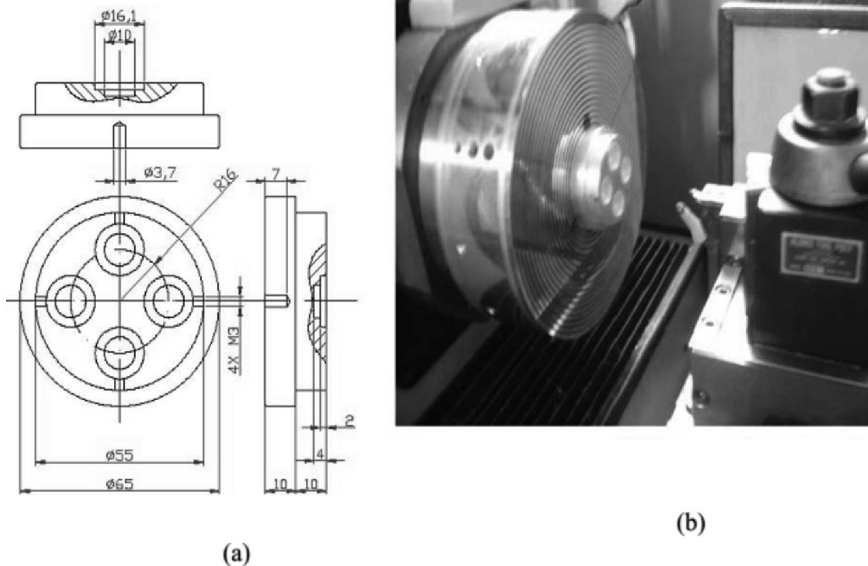
Polimetilmetacrilato (PMMA) foi usado como material de teste. As amostras obtidas de uma barra com 16mm de diâmetro, foram cortadas na espessura de 5mm, pré usinadas em torno convencional, posteriormente polidas para eliminar distorções do faceamento inicial, e deixar as superfícies regulares. As amostras foram montadas em um dispositivo especial, fabricado em alumínio, mostrado na figura 1. Este dispositivo permite usinar quatro peças por vez, tendo como vantagem a eliminação das marcas da ferramenta no centro das amostras uma vez que as peças são fixadas fora do centro. As condições de corte (avanço e profundidade de usinagem) e aplicadas nos ensaios estão descritas na tabela (1). A direção de corte foi no sentido axial, de fora para dentro e foram faceadas em ambos os lados. Cuidado especial foi tomado para quando a peça fosse colocada no dispositivo para usinar a segunda face, esta ficasse posicionada a fim de que as

Parâmetros	Valores
$f$ ( $\mu\text{m}/\text{rev}$ )	5, 10, 15 e 20
$a_p$ ( $\mu\text{m}$ )	4 e 10
$n$ (rpm)	1000
$r_p$ (mm)	2 e 4
$\gamma$ ( $^\circ$ )	5
$\alpha$ ( $^\circ$ )	0

Tabela 1 - Parâmetros de corte.

marcas do avanço da ferramenta fossem o mais coincidentes possível. Uma máquina geradora de superfícies anesféricas marca Rank Pneumo, modelo ASG 2500, equipada com comando numérico marca Alen-Bradely, modelo 8200, foi usada para faceamento das amostras. A temperatura ambiente foi mantida em  $21^{\circ} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ .

Foi usado óleo sintético solúvel em água, com função de lubrificar e refrigerar, direcionado em forma de névoa sobre a peça/ferramenta (MQF < 60 ml/hora). A morfologia dos cavacos e topografia das superfícies foram avaliadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Zeiss, modelo DSM 960, operado a 20Kv. O índice de refração foi medido em um refratômetro, marca Karl Zeiss, e a transmitância nos comprimentos de onda de 600 e 900nm foi medida em um espectrofotômetro. A rugosidade superficial das superfícies usinadas foi analisada no perfilômetro, marca Taylor Hobson, modelo CCI 3000.



**Figura 1** - Dispositivo especial para usinagem das amostras (b) Montagem na placa do torno.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Influência das condições de usinagem

##### 3.1.1 Influência da Taxa de Avanço ( $f$ )

A tabela 2 apresenta os resultados de rugosidade ( $R_t$  e  $R_a$ ) em função da variação taxa de avanço ( $\mu\text{m}/\text{rev}$ ). Os valores representam uma média da rugosidade das quatro amostras usinadas simultaneamente. Pode-se observar que os valores de rugosidade para avanços de 5 e 10  $\mu\text{m}/\text{rev}$  não apresentaram grande variação, havendo sim, redução no valor da rugosidade: tanto  $R_t$  quanto  $R_a$ . Essa diferença pode ser atribuída a pequenos danos na superfície tais como micro trincas geradas durante a usinagem. A figura 2 apresenta uma micrografia feita através de MEV da superfície

Taxa de Avanço ( $\mu\text{m}/\text{rev}$ )	$R_t$ (nm)	$R_a$ (nm)
5	360,8	35,4
10	331,2	34,5
15	651,8	64,5
20	489,2	55,6

Tabela 2 - Influência da taxa de avanço sobre o acabamento da superfície.

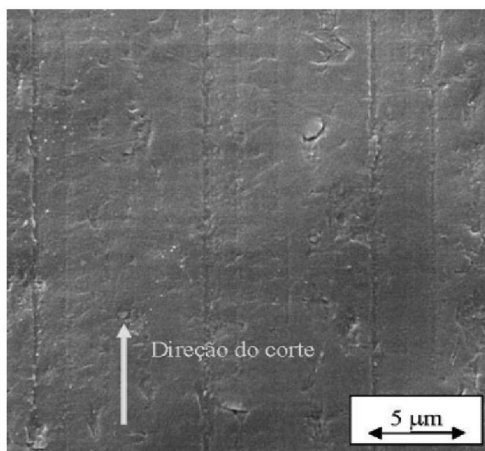


Figura 2 - Imagem feita através de MEV mostrando pequenos danos gerados no interior da ranhura durante o corte (Ampliação 3000x).

gerada com avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{rev}$ . Pode-se observar que há presença de micro fraturas ao longo da ranhura gerada pelo passo da ferramenta, pois não há indícios de imperfeições da aresta gerando rugosidade secundária na superfície.

### 3.1.2 Influência da profundidade de usinagem ( $a_p$ )

Para se avaliar a influência da profundidade de usinagem decidiu-se pela escolha da taxa de avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{rev}$ , pois além de ter apresentado valores similares de rugosidade em relação ao avanço de 5  $\mu\text{m}/\text{rev}$ , a taxa de remoção é maior. Os resultados apresentados na tabela 3 mostram que a condição com 10  $\mu\text{m}$  para profundidade de usinagem também apresentou melhores resultados de rugosidade ( $R_t$  e  $R_a$ ). Esses valores representam uma média da rugosidade das quatro amostras usinadas simultaneamente.

Profundidade usinagem ( $\mu\text{m}$ )	$R_t$ (nm)	$R_a$ (nm)
4	436,8	47,1
10	331,2	34,5

**Tabela 3** - Influência da profundidade de usinagem ( $a_p$ ) sobre o acabamento da superfície.

### 3.1.3 Influência dos Raios de Ponta ( $f=10 \mu\text{m}/\text{rev}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$ )

Em função desses resultados nos testes anteriores, decidiu-se pela escolha dessa condição de corte para análise da influência da geometria da ferramenta. A tabela 4 apresenta os valores de rugosidade em função da variação do raio de ponta da ferramenta. Esperava-se que a rugosidade fosse menor para raios de ponta maiores, o que não ocorreu. Atribui-se essa inversão devido, possivelmente, ao valor do ângulo de folga da ferramenta que era de  $5^\circ$  e normalmente se usa  $12^\circ$  para usinagem de metais para evitar o efeito do contato da superfície de folga com a superfície gerada. Esses valores representam uma média da rugosidade das quatro amostras usinadas simultaneamente.

## 3.2 Análise da Superfície

Como interessa para nós uma comparação das propriedades ópticas da peça acabada com resultados de injetadas, decidimos analisar a superfí-

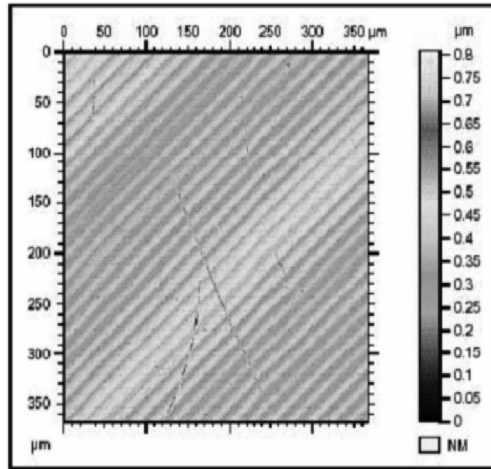
cie com  $f=10$  e  $ap=10$ . A homogeneidade de tons de verde da imagem caracterizam pouca influência das condições de usinagem em possíveis desvios decorrentes de ondulações na superfície.

Número	Raio da ponta (nm)	Ra (nm)	Rq (nm)	Rt (nm)	Rz (nm)
1	2	29,8	34,5	303	128
2	2	51,9	78,6	627	399
3	2	46,1	70,7	470	390
4	4	86	124	829	570
5	4	86	122	748	538

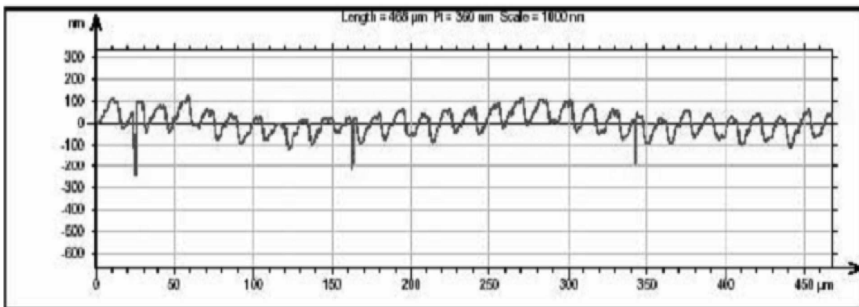
**Tabela 4** - Influência da taxa de avanço sobre o acabamento da superfície.

A figura 3 mostra a superfície usinada em regime dúctil. Segundo Smith (1989), este regime de corte ocorre quando a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do polímero é inferior à temperatura na zona de corte. Polímeros termoplásticos (amorfo), à temperatura ambiente, comportam-se como materiais frágeis, entretanto o calor intrínseco do corte (atrato ferramenta/peça e deformação do material devido ao cisalhamento) altera essa condição para um regime dúctil, onde uma boa superfície final pode ser obtida. A superfície está bem caracterizada pelas marcas do avanço da ferramenta.

Avaliando-se a integridade superficial das amostras usinadas, observou-se que os melhores índices foram obtidos com ferramenta de raio de ponta 2mm, onde a rugosidade  $R_a$  foi de 29,8nm, cujo perfil é mostrado na figura 4. Nas amostras usinadas com ferramenta com o raio de ponta de 4mm, o valor da rugosidade foi de 86nm, contrário à teoria, onde o aumento do raio tende a diminuir a rugosidade. Entretanto, diferente de materiais metálicos, na usinagem de materiais poliméricos as propriedades químicas e reológicas (temperatura de transição vítrea, temperatura de fusão cristalina, peso molecular, viscosidade e taxa de relaxação) do material exercem influência na integridade superficial e precisão final (CARR e FEGER, 1993), e que podem estar relacionados com o valor obtido.



**Figura 3** - Espectro da superfície obtido por meio do Talysurf CCI 3000. Amostra usinada com  $f = 10\mu\text{m}/\text{rev}$ . e  $a_p = 10\mu\text{m}$ .



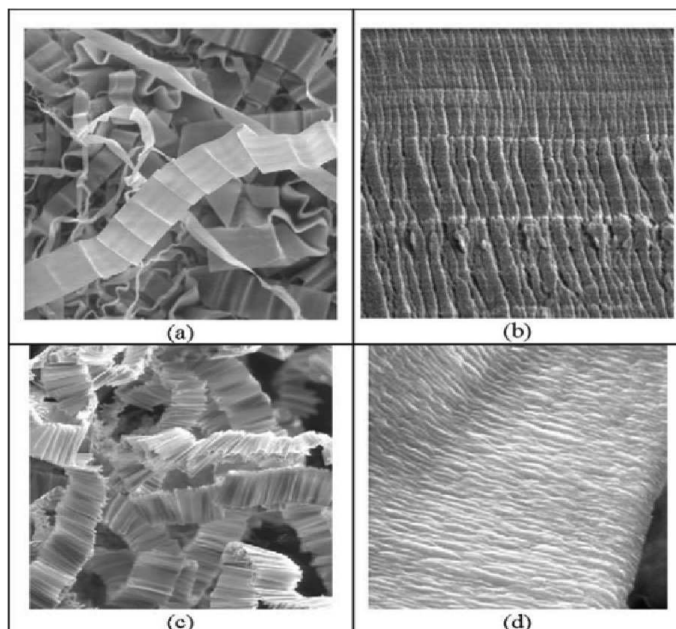
**Figura 4** - Perfil obtido no Talysurf CCI 3000, com  $R_a = 29,8\text{nm}$ .

### 3.1 Análise da Formação do Cavaco

O mecanismo de formação do cavaco é de fundamental importância, pois mostra as propriedades do material com relação à integridade superficial, usinabilidade e características de usinagem. Na figura 5 a imagem da microscopia eletrônica de varredura, do cavaco em regime dúctil. Os cavacos formados foram do tipo contínuo, que, de acordo com a literatura (Carr e Feger, 1993), são produzidos quando o ângulo de saída é neutro, indicando uma remoção relativamente fácil do material. Segundo Saito (1981),



este tipo de cavaco é produzido no plano de cisalhamento gerado acima da ponta da ferramenta, e é constituído de pequenas lamelas justapostas, resultado da ação de corte. Isto significa que a deformação plástica ocorreu predominantemente e praticamente nenhuma fratura foi gerada neste regime. Observou-se durante a usinagem que os cavacos curvavam-se na direção anti-horária, resultado da força de cisalhamento ser superior à tensão de ruptura do material (Xiao e Zhang, 2002). Outra característica deste tipo de corte é a existência de marcas de cisalhamento ao longo da superfície do cavaco e a espessura deste ser geralmente maior que a profundidade de corte. Este tipo de cavaco é similar ao produzido na usinagem de metais (Figura 5c e 5d).



**Figura 5** - Comparativo da microfotografia dos cavacos usinados com  $f = 10\mu\text{m}/\text{rev}$ . e  $a_p = 10\mu\text{m}$ ;  $r_p = 2\text{mm}$ . (a) Cavaco tipo contínuo de PMMA (200x). (b) Lamelas formadas na parte superior do cavaco de PMMA (10000x). (c) Cavaco tipo contínuo de Al-Mg (200x). (d) Lamelas formadas na parte superior do cavaco de Al-Mg (10000x). A transmitância obtida em comprimentos de onda entre 600 e 900nm variou entre 91 e 92%, na amostra que apresentou índice de rugosidade de Ra de 29,8nm. Valores menores de transmitância foram encontrados em amostras onde houve a presença mais acentuada de marcas da ferramenta, provavelmente devido a imperfeições do material e/ou planicidade. O índice de refração obtido foi de 1.4935.

#### **4. CONCLUSÕES**

Embora a rugosidade real tenha sido superior à teórica, este estudo demonstra a viabilidade do processo de usinagem do PMMA , para fins ópticos com ferramenta com ponta única de diamante, salientando-se que menores valores de rugosidade superficial em relação ao obtido neste estudo, podem ser conseguidos, com estudos direcionados, parâmetros de corte e geometria da ferramenta, a qualidade do material, o qual, apresentou grande influência sobre os resultados de caracterização óptica. Todavia isso será investigado em futuros trabalhos.

#### **5. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a Taylor Hobson do Brasil Ltda, em especial ao Eng<sup>o</sup> Marcelo Bulhões Montagnani, pelo auxílio nos ensaios de perfilometria mecânica e óptica

#### **6. REFERÊNCIAS**

Avila,M.,et al., 2003 “Surface quality in machining foldable acrylic-based intra ocular lenses”, Dept. Mechanical Engineering, University of California, Berkeley,California.

Bauer, T.,Müller, W.,Petzold, S., 2000, “Optik aus Kunststoff – Möglichkeiten und Grezen”, Jahrbuch für Optik und Feinmechanik, Verlag Schiele & Schön, Berlin, pp.40-44.

Blough, C.G., Rossi, M., Mack, S.K., Michaels, R.L., 1997 “Single point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements”, Appl. Opt., Vol. 36(20), pp. 4648-4654.

Carr, J, Feger, C., 1993, “Ultraprecision machining of polymers”, Precision Engineering, Vol.4, pp.221-235.

Jasinevicius,R.G.,et al., 2003, “Influence of Mechanical and Metallurgical State of an AL-Mg Alloy on the Surface Integrity in Ultraprecision Machining,

Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science, Vol.25(3), pp. 222-228.

Saito, K., 1981, “Fracture Phenomena of High Polymers in Cutting”, Journal of Macromolecular Science, Part B, Vol.19, N°3, pp.459-485.

Silva, A.R., 2002, “Confecção e Caracterização óptica e Estrutural de Lentes Obtidas pelo Processo de Injeção”, Dissertação de Mestrado, Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Smith, E.F., 1989, “3 Single-Point Diamond Turning of Amorphous Thermoplastic Polymers”, M.S.Thesis, Dpt° of Materials Science and Engineering, North Carolina State University, North Carolina.

Xiao, K.Q., Zhang, L.C., 2002, “The role of viscous deformation in the machining of polymers”, International Journal of Mechanical Sciences, Vol.44, pp. 2317-2336.

## **7. DIREITOS AUTORAIS**

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