

## TORNEAMENTO DE SILÍCIO POLICRISTALINO COM FERRAMENTA DE DIAMANTE

**Carlos R. Pagotto**

**Jaime G. Duduch**

Laboratório de Engenharia de Precisão

Departamento de Engenharia Mecânica – EESC – USP

Rua Dr. Carlos Botelho, 1465 CEP 13560-970 São Carlos – SP

**Resumo.** Neste trabalho, uma amostra de silício policristalino foi torneada com ferramenta de diamante a fim de verificar se esta técnica pode ser usada como uma opção viável à produção de lentes anesféricas para a região infravermelha do espectro eletromagnético. Foram feitos cortes interrompidos com uma profundidade de corte ( $d$ ) fixa de  $10\mu\text{m}$  e taxas de avanço ( $f$ ) que variaram de  $2,5\mu\text{m}$  a  $10\mu\text{m}$ . O ombro não cortado e a superfície usinada foram estudados usando-se o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Os resultados mostram que, para taxas de avanço menores do que  $4,0\mu\text{m}$ , sempre foi obtida a usinagem no regime dúctil. Isto corresponde a uma espessura crítica de corte de  $234\text{ nm}$ , a qual está na mesma ordem dos valores obtidos para o silício monocristalino observados na literatura.

**Palavras-chave:** Silício policristalino, Infravermelho, Torneamento, Ferramenta de diamante

### 1. INTRODUÇÃO

A fabricação de elementos ópticos infravermelhos é o campo da óptica que está em maior crescimento. A tecnologia para novas fontes a laser, sistemas de comunicação através de fibra óptica, dispositivos para visão noturna e etc, faz com que o estudo de dispositivos infravermelhos cresça de maneira rápida. Para dar suporte a este crescimento, é necessário o uso de lentes e espelhos de materiais apropriados e o silício é um dos materiais mais usados para este tipo de aplicação (Moss, 1997; Leung, Lee & Lu, 1998; Wong, 1981).

A usinagem com ferramenta de diamante permite, por exemplo, a produção de perfis de fase difrativos possibilitando o projeto de um sistema de lentes com uma quantidade menor de elementos. Como exemplo, duas lentes objetivas tipo Petzval (anesféricas) são designadas para aplicações infravermelhas para médio e longo comprimento de onda. A substituição de várias lentes esféricas para duas lentes anesféricas controla, neste caso, as aberrações esféricas e cromáticas (Moss, 1997). As aberrações dependem do arranjo geométrico das superfícies ópticas e da dispersão dos materiais ópticos. No caso dos sistemas infravermelhos, as aberrações ocorridas no eixo óptico ou próximas a ele são de extrema importância pois esses sistemas são usualmente designados para cobrir um campo de visão pequeno.

A consequência direta do uso de superfícies anesféricas é a retirada de, no mínimo, uma das aberrações ou até mais. Vários sistemas de lentes anesféricas corretoras foram desenvolvidos por pesquisadores como Wassermann & Wolf, 1948, etc. O projeto de lentes para visão a Laser e sistemas de CD players são bons exemplos de resultados práticos do método de trabalho originado do trabalho de Wasserman & Wolf, 1948. A “Fig.1 a) e b)” mostra o resultado desse trabalho (Hudson Jr, R.D., Haisma, J. et al, 1983/84).

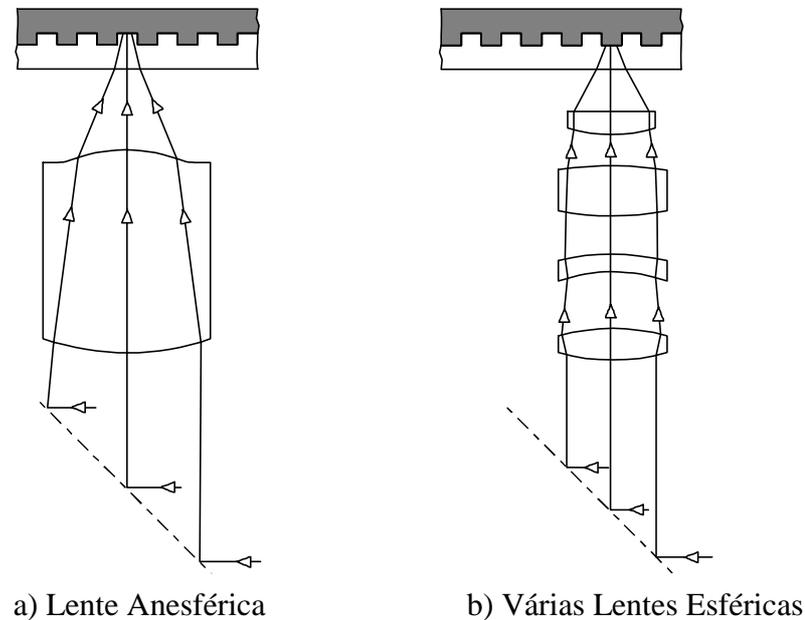


Figura 1- Sistema óptico para CD player (Haisma, J. et al, 1983/84).

A fabricação de superfícies através de técnicas convencionais (lapidação e polimento) é apropriada para pequenos grupos de superfícies esféricas, mas não oferece alta repetibilidade para outras formas. A dificuldade de se fazer lentes e espelhos com superfícies anesféricas pode ser superada com o torneamento com ferramenta de diamante. Entretanto, materiais frágeis como as cerâmicas, vidros e cristais são difíceis de serem usinados devido à sua baixa tenacidade à fratura, levando o material à fratura frágil numa escala micrométrica.

Certas máquinas-ferramenta são consideradas adequadas para controlar certas condições de corte e permitem a usinagem no regime dúctil. Neste regime, podem ser obtidas superfícies esféricas e anesféricas com alta qualidade e livres de trincas (Blake & Scattergood, 1990).

Neste trabalho, o torneamento com ferramenta de diamante do silício policristalino é estudado como uma opção viável à produção de lentes anesféricas para o espectro infravermelho. Foram feitos experimentos usando-se uma máquina para o torneamento com ferramenta de diamante ASG 2500 Rank Pneumo\*, usando-se uma ferramenta de diamante com um raio de ponta de 1,13 mm e ângulo de saída  $-5^\circ$ . Os cortes interrompidos foram feitos com uma profundidade de corte ( $d$ ) de  $10\ \mu\text{m}$  e várias taxas de avanço entre  $2,5\ \mu\text{m}$  e  $10\ \mu\text{m}$ . O ombro não cortado e a superfície usinada foram examinados usando-se o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Os resultados mostram que, para as condições de corte usadas, a espessura crítica do cavaco ( $t_c$ ) para a formação de trinca é  $234\ \text{nm}$  e, com uma taxa de avanço de  $4,0\ \mu\text{m}$ , é obtida uma superfície usinada espelhada.

## 2. MODELO DE CORTE

O modelo de corte foi gerado por uma ferramenta de diamante de ponta arredondada através do estudo da região do ombro não cortado. Como tem sido mostrado por alguns pesquisadores (Blake & Scattergood, 1990; Blackley & Scattergood, 1991; Leung, Lee & Lu, 1998), para dadas condições de corte há uma profundidade de corte crítica ou espessura do cavaco  $t_{ef} = t_c$  abaixo da qual a fratura não ocorre (Blake & Scattergood, 1990). Quando  $t_{ef} < t_c$  a resposta dúctil ocorre ao longo do raio de ponta da ferramenta. Quando  $t_{ef} > t_c$  há a ocorrência de fratura, resultando numa zona danificada.

Blackley & Scattergood (1991) mostram que  $t_c$  é dado por:

$$t_c = (W_d \cdot f) / R_p \quad (1)$$

Onde  $W_d$  é a largura dúctil,  $f$  é a taxa de avanço por revolução e  $R_p$  é o raio de ponta da ferramenta de diamante;  $f$  é muito pequeno comparado com  $W_d$  e  $R_p$  (Blackley & Scattergood, 1991).

## 3. EXPERIMENTO

Para o teste de torneamento foi usada uma bolacha de silício policristalino de 50 mm de diâmetro e 5 mm de espessura. A peça foi colada em um suporte de alumínio e fixada usando-se a placa de vácuo do gerador de superfícies do ASG 2500 (“Fig.2”).

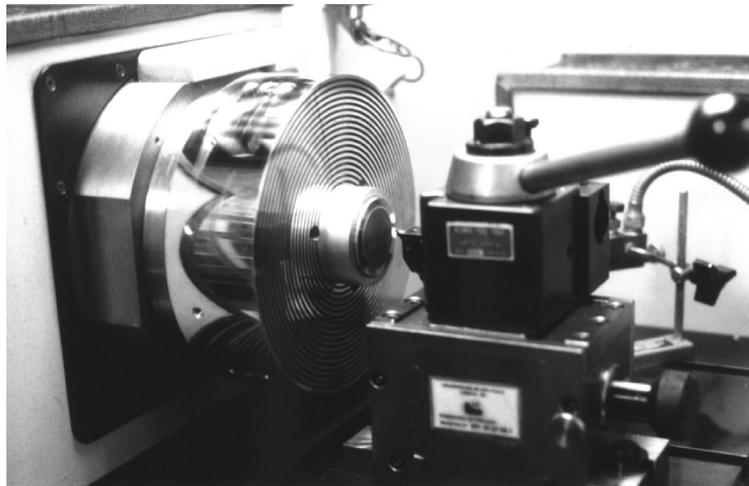


Figura 2 – Peça de silício policristalino em suporte de alumínio fixado na placa de vácuo do gerador de superfícies ASG2500.

A ferramenta de diamante usada foi uma Contour Fine Tooling\*\* com número de série 31562, tipo CO45N. A “Fig. 3” mostra micrografia da aresta de corte da ferramenta nova usada no experimento. A temperatura da sala foi mantida em  $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$  e o fluido refrigerante usado foi o Alkalisol 900 (solvente orgânico, desenvolvido pela ALKALLIS BRASIL\*\*\*, incolor, inerte, praticamente atóxico). A geometria da ferramenta é: 1,136 mm de raio de ponta, ângulo de saída de  $-5^\circ$  e ângulo de folga de  $12^\circ$ .

Após a fixação da bolacha de silício policristalino na placa de vácuo, foram feitos vários passes com avanço de  $10 \mu\text{m}$  como uma forma de retirar trincas remanescentes do processo de serramento da bolacha; porém após a remoção de  $210 \mu\text{m}$  de material, ainda se observou este

tipo de trinca. A "Fig. 4" mostra micrografia da superfície da bolacha de silício policristalino antes do corte. Após esta preparação, foram feitos vários cortes interrompidos usando-se as condições de corte dadas na "Tabela 1".

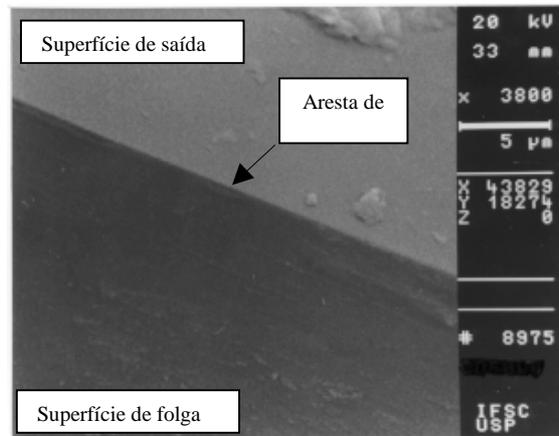


Figura 3- Micrografia do MEV que mostra a aresta de corte da ferramenta de diamante nova CO45N

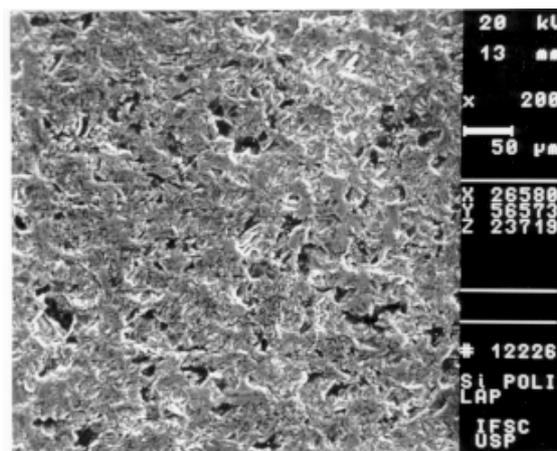


Figura 4- Superfície serrada da bolacha de silício policristalino

Tabela 1. Condições de corte

Profundidade de corte d (µm)	0
Taxa de Avanço f (µm)	2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 7; 10

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O ombro não cortado e a superfície usinada do silício policristalino foram observados no MEV a fim de identificar a transição frágil/dúctil sob condições de corte específicas, "Tabela 1". O MEV mostra se o corte ocorreu de forma dúctil ou parcialmente frágil.

A "Fig. 5" mostra uma superfície usinada com taxa de avanço de 7,0 µm. Neste caso, são observados na superfície da bolacha de silício danos superficiais e trincas. Com uma taxa de

avanço de  $5,0 \mu\text{m}$ , "Fig. 6", o número e o tamanho dos "pits" diminuíram na superfície e no ombro não cortado. É importante salientar que, neste caso, o regime dúctil é mais predominante embora um pequeno número de trincas ainda seja observado. A "Fig. 7" mostra que a superfície usinada apresenta ranhuras igualmente espaçadas sem a ocorrência de trincas para uma taxa de avanço de  $4,0 \mu\text{m}$ . Aqui, a superfície usinada está na forma totalmente dúctil, embora alguns "pits" podem ser encontrados no ombro não cortado.

Usando-se a "Eq. (1)", para esta condição de corte e geometria de ferramenta específicos, a espessura crítica de corte estimada foi  $t_c = 234 \text{ nm}$ . Este valor está de acordo com os valores encontrados por outros pesquisadores para o silício monocristalino (Blake & Scattergood, 1990; Blackley & Scattergood, 1991; Puttick et al., 1995). Nesta condição de corte, a rugosidade medida através do perfilômetro por contato mecânico Form Talysurf  $R_a = 11,7\text{nm}$ , deixando a superfície da peça com aparência especular.

A "figura 8" mostra uma curva  $R_a \times f$ , onde pode-se notar o aumento da rugosidade  $R_a$  com o aumento do avanço para o torneamento do silício policristalino nas condições de corte da "Tab.1".

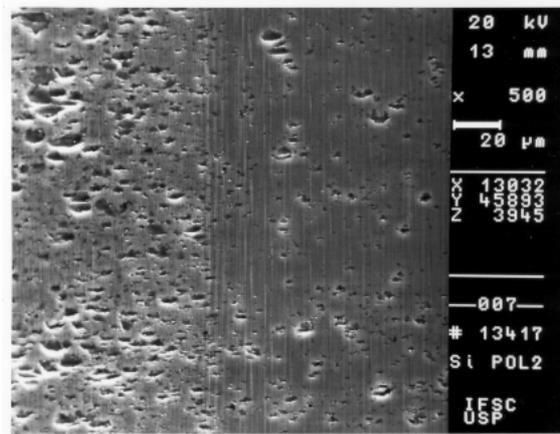


Figura 5- Ombro não cortado do silício policristalino;  $f = 7,0\mu\text{m}$ .

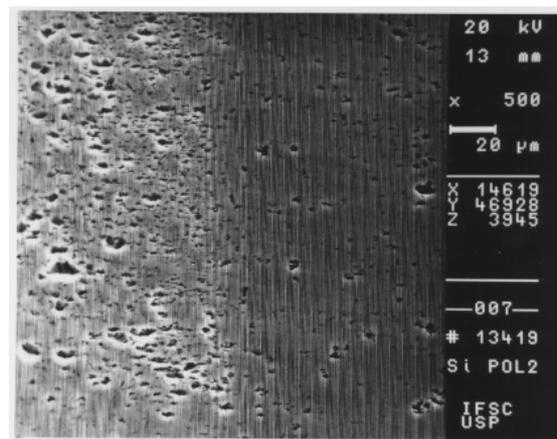
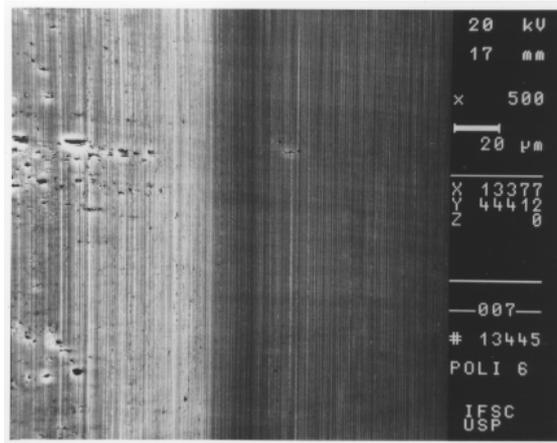


Figura 6- Ombro não cortado do silício policristalino;  $f = 5,0\mu\text{m}$ .



. Figura 7 – Ombro não cortado do silício policristalino;  $f = 4,0\mu\text{m}$

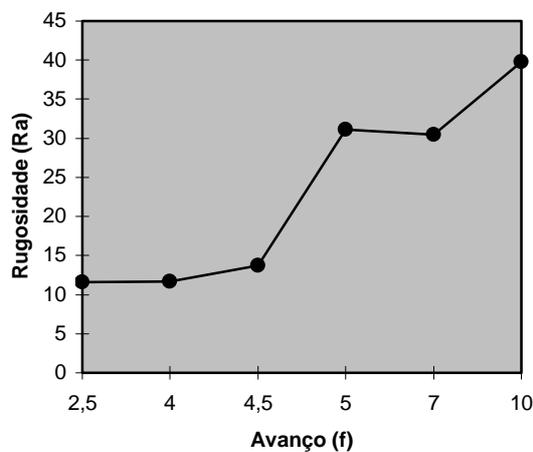


Figura 8 – Gráfico da rugosidade ( $R_a$ ) versus avanço (f) para o silício policristalino.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram feitos vários testes de corte interrompido usando-se diferentes taxas de avanço. O ombro não cortado mostra pequena quantidade de "pits" para taxas de avanço menores que  $4,0\mu\text{m}$ . Os resultados mostraram que, contanto que o modo dúctil seja mantido (uma combinação de taxa de avanço e profundidade de corte) sempre serão obtidas, para o silício policristalino, superfícies especulares, "Fig.9", livres de trincas.

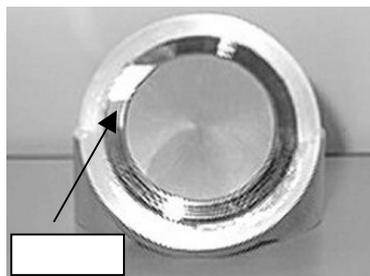


Figura 9 – Superfícies usinada e serrada da bolacha de silício policristalino

## ***Agradecimentos***

O primeiro autor agradece ao suporte financeiro da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao Dr. Renato Goulart Jasinevicius pela ajuda dispensada.

## **REFERÊNCIAS**

- Blackley, W.S., Scattergood R.O.,1991, Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials, *Prec. Engg.*,v.13, p.95-102.
- Blake, P.N., Scattergood,R.O.,1990, Ductile regime turning of germanium and silicon, *Proc. ASME*,v.12, p.249-265.
- Haisma, J. et al., 1983/4, Aspherics, *Philips Technical Review*, v.41, n 10, pp. 285-303.
- Hudson R.D.Jr., 1969, *Infrared system engineering*, cap.5 – Optics, John Wiley and sons, New York.
- Leung, T.P., Lee, W.B., Lu, X.M.,1998, Diamond turning of silicon substrates in ductile-regime, *J. Matls. Proc. Tech.*, v.73, p. 42-48.
- Moss,T.,1997, Diamonds turn out precision optics, *Photonics Spectra*, vol.31 pt.12, p.137-142.
- Puttick, K.E., Whitmore L.C., Zhdan, P., Gee, A.E., Chao, C.L., 1995, Energy scaling transitions in machining of silicon by diamond, *Tribology Intl.*, v.28, pp. 349-355.
- Wasserman G.D., Wolf, E., 1949, On the theory of aplanatic aspheric systems, *Proc. Phys. Soc.*, v.62, pp. 2-8.
- Wong,C.J.,1981, Fracture and wear of diamond cutting tools, *J.Engg. Matls. & Tech.*, v.103, p. 341-345.

\* Rank Pneumo Inc., (Taylor Robson Pneumo) Keene, NH, USA and Leicester, Inglaterra.

\*\* Contour Fine Tooling Ltd., Stevenage, Herts., Inglaterra.

\*\*\* Alkallis Brasil Ind. e Com. de produtos químicos LTDA., Guarulhos – S.P.

## **SINGLE POINT DIAMOND TURNING OF POLYCRYSTALLINE SILICON**

**Abstract.** *In this work ,a polycrystalline silicon sample was single point diamond turned in order to verify if this technique can be used as a viable option for the production of aspheric lenses for the infra red (IR) region of the electromagnetic spectrum. Interrupted cuts were made with fixed depth of cut value of 10  $\mu\text{m}$  and varying feed-rates from 2.5  $\mu\text{m}/\text{rev}$ . up to 10 $\mu\text{m}/\text{rev}$ . The uncut shoulder and machined surface were assessed using Scanning Electron Microscopy (SEM). The results show that, for feed-rate smaller than 4.0  $\mu\text{m}/\text{rev}$ , the ductile mode was always obtained. This mean a critical thickness of cut of 234 nm which is in the same order of the values for single crystal silicon observed in the literature.*

**Keywords:** Polycrystalline silicon, infrared, diamond turning