



TESTES EM TORNEAMENTO COM FERRAMENTA DE DIAMANTE E MICROINDENTAÇÃO VICKERS EM VIDROS ÓPTICOS

Carlos R. Pagotto¹, Jaime G. Duduch², Helder A. T. Silva³

Escola de Engenharia de São Carlos – USP

Departamento de Engenharia Mecânica

Laboratório de Engenharia de Precisão

(1) pagottor@sc.usp.br , (2) jgduduch@sc.usp.br , (3) helderts@sc.usp.br

São Carlos, SP, Brasil

Renato G. Jasinevicius

SOCIESC-IST/ Centro de Mecânica de Precisão de Joinville

rgvicius@sociesc.com.br – Joinville, SC, Brasil

Resumo. *Os processos mecânicos de remoção de material aplicados a materiais frágeis normalmente geram defeitos superficiais. No caso da fabricação de componentes ópticos torna-se necessário que o processo produza uma superfície livre de danos (como por exemplo, trincas) que implicariam na diminuição do desempenho do componente. Neste trabalho, foram realizados testes preliminares de microindentação Vickers e torneamento com ferramenta de diamante em vidros soda-lime-silicate chamados de “windows glasses”. Os resultados demonstraram que este material, apesar de frágil, apresenta plasticidade restrita para microindentação com cargas pequenas assim como para condições de corte submicrométricas. Observou-se, portanto, que o modo dúctil ocorreu para determinadas faixas de profundidade e espessuras de corte.*

Palavras-chave: vidros ópticos, microindentação, torneamento com diamante

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, vem sendo dada uma ênfase especial ao torneamento de materiais frágeis. Isto ocorre devido à crescente demanda por produtos no campo da óptica reflexiva e transmissiva (Blackley & Scattergood, 1991; Pagotto, 1998; Schroeter, 1997). Dentro os materiais que compõe a lista de materiais frágeis possíveis de serem torneados com ferramenta de ponta única de diamante encontram-se os vidros ópticos. Vidros podem ser aplicados na fabricação de espelhos para telescópios de Raio-X, na fabricação de lentes, na indústria opto-eletrônica, etc *.

A princípio, estes materiais não eram apropriados para serem usinados através de processos de torneamento, por serem facilmente destruídos quando se tentava cortá-los com ferramentas com geometria definida. Contudo, vidros nem sempre manifestavam a fratura frágil como modo predominante de remoção quando usinados em condições de corte inferior a 1µm de profundidade. As informações obtidas em ensaios de microindentação (apesar de estáticos) com cargas na ordem de alguns gramas e com profundidade de penetração em torno

de 1 μm proporcionaram embasamento experimental para explicar, de forma aproximada, os resultados obtidos no torneamento (Chao, 1991).

Baseando-se nestas constatações se tornou evidente a possibilidade de usinar vidro dentro de um regime predominantemente dúctil. Para que isso ocorra, a profundidade de corte aliada às condições do processo (geometria da ferramenta, velocidade de corte, avanço, refrigeração, etc.) devem ser cuidadosamente escolhidas, objetivando-se a remoção de material através de deformação plástica ao invés de fratura frágil (Jasinevicius, 1998).

Os testes de microindentação também podem ser usados para demonstrar a extensão da deformação plástica que precede o desenvolvimento de fratura frágil sobre uma ferramenta de diamante, bem como para determinar certas propriedades do material como dureza e resistência à fratura (Leung *et al.*, 1998).

Neste trabalho, foram realizados testes preliminares de microindentação Vickers (H_v) e torneamento com ferramenta de diamante no vidro B270*. Os testes de microindentação foram realizados para se verificar a dureza deste vidro, bem como para se investigar o comportamento do material, através do estudo das trincas, sob determinada tensão. O teste de torneamento foi usado para verificar o comportamento dúctil/frágil sob condições de corte consideradas críticas.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Testes de microindentação, variando-se a carga, foram realizados com o intuito de se obter a microdureza do vidro B270, e para se verificar sob quais destas cargas inicia-se o aparecimento de fratura no vidro. O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) foi utilizado para avaliar as indentações e o acabamento superficial da amostra. As propriedades do vidro B270 são mostradas na Tabela 1. O código B270 é usado pelo fabricante para um vidro silicato modificado chamado de “window glass” que contém, basicamente, em % de peso, 72% SiO_2 , 1% Al_2O_3 , 10% CaO , 14% Na_2O , 2% MgO .

Tabela 1 – Propriedades do Vidro B270

fonte: Edmund Industrial Optics

Temperatura de Amolecimento ($^{\circ}\text{C}$)	Coefficiente de Expansão Linear ($\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)	Densidade (g/cm^3)	Módulo de Elasticidade (GPa)
521	8.2	2.55	71.5

Os testes de microindentação Vickers foram realizados em uma pastilha de vidro polida com 25,81mm de diâmetro. As cargas, em gf, utilizadas para este teste foram 10, 25, 50, 100 e 200, com tempo de carregamento (tempo de manutenção da carga na peça) de 15s. Para cada uma destas cargas, foram feitas cinco impressões, tirando-se a média das durezas assim como o valor médio das diagonais de impressão. O equipamento de microdureza utilizado para este experimento foi o (BUEHLER Micromet 2100[®] Microhardness).

A dureza, H , é definida como a carga aplicada, P , dividida pela área de contato, A , entre o indentador e o corpo de prova, isto é, $H = P/A$. Esta área é definida através da geometria piramidal do indentador. No caso de uma base piramidal Vickers, a área de contato é $A = D^2/2\text{sen}(\theta/2)$, onde $\theta = 136^{\circ}$ é o ângulo entre as faces opostas e D é o comprimento da diagonal de impressão. Deste modo, o número de dureza Vickers é dado por $H_v = 1854.4P/D^2$ onde P é dado em gramas e D em μm . A microdureza Vickers do vidro B270 foi calculada através da declividade, m , de uma função ajustada linearmente através de interpolação da

curva $D^2 \times P$ (Fig. 1): $H_v = 1854.4/m$, em Kg/mm^2 ou $H_v = (9.81 \times 10^{-3})(1854.4/m)$ em GPa. O erro de H_v é de aproximadamente 2% (Ziemath & Herrmann, 2000).

A ferramenta de corte usada no teste de torneamento foi uma CO45NG** com raio de ponta 1.13665 mm, ângulo de saída -5° e ângulo de folga 12° . A máquina utilizada foi o torno de ultraprecisão ASG 2500 ***. A pastilha de vidro foi fixada à placa do torno através de um suporte de alumínio. A fixação do vidro ao suporte foi feita com esmalte sintético de maneira que a pastilha de vidro fique completamente presa ao dispositivo de fixação. A rotação do eixo árvore foi de 1000 rpm. O procedimento de corte usado foi o faceamento e o fluido refrigerante usado foi o óleo sintético solúvel em água Alkalisol 900****. A pastilha de vidro torneada foi analisada através de micrografias do MEV e Microscopia Óptica. A Tabela 2 mostra as condições de corte usadas neste experimento.

Tabela 2 – Condições de corte para o vidro B270.

rotação (rpm)	1000
avanço a ($\mu\text{m}/\text{rev.}$)	1
profundidade de corte p (μm)	0.5; 0.6; 0.7; 0.8

3. RESULTADOS

A microdureza Vickers medida do vidro B270, para cargas variando entre 0 e 200g (1.96N) é $H_v = (6,5 \pm 0.02)$ GPa ($H_v = 662 \text{ Kgf/mm}^2$).

A diagonal de microindentação, D , aumentou quase que linearmente com o aumento da carga, como pode ser visto na Fig. 1.

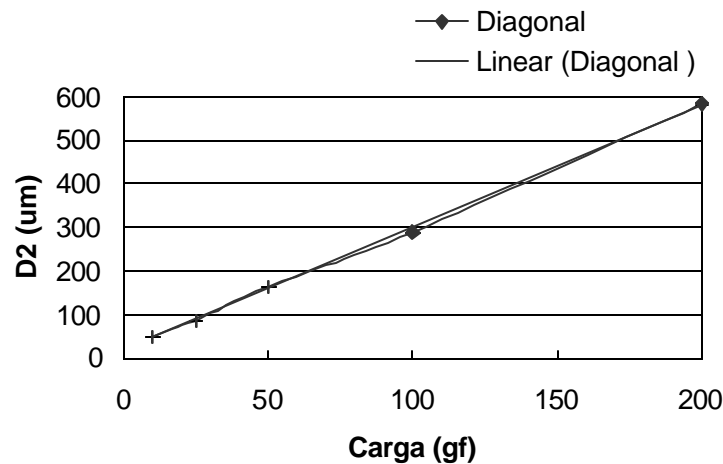


Figura1. Diagonal de microindentação ao quadrado D^2 versus carga de penetração.

A Fig. 2 mostra micrografias feitas através de MEV das marcas impressas pelo microindentador Vickers. A Fig. 2(a) mostra a marca deixada pela carga de 10gf (0.0981N) onde trincas anelares ocorreram ao redor da marca de microindentação.

Na Fig. 2(b) não se verificou a ocorrência de trincas radiais ao redor da impressão do indentador para cargas de 25gf (0.24N) e 50 gf. Em cargas de 100gf (0.98N) e acima (Fig. 2c e Fig. 2d) verifica-se a ocorrência de trincas radiais significativas (indicadas por setas) iniciando-se a partir dos cantos da impressão Vickers, sugerindo fratura frágil do material.

Não se estudou, neste trabalho, a ocorrência de trincas médias e laterais. Portanto sabe-se a existência desse tipo de trinca em microindentação Vickers de vidro (Chao, 1991; Lawn & Wilshaw, 1975; Hamidouche *et al.*, 1994). As trincas radiais, bem como as trincas médias e laterais podem também ser observadas na usinagem de vidro. Por este motivo é que se pode dizer que os testes de microindentação Vickers, apesar de totalmente estáticos, proporcionam embasamento experimental para explicar os resultados obtidos no torneamento, pois estuda os mecanismos de deformação, formação de trincas e a influência da carga normal (profundidade de penetração)(Chao, 1991).

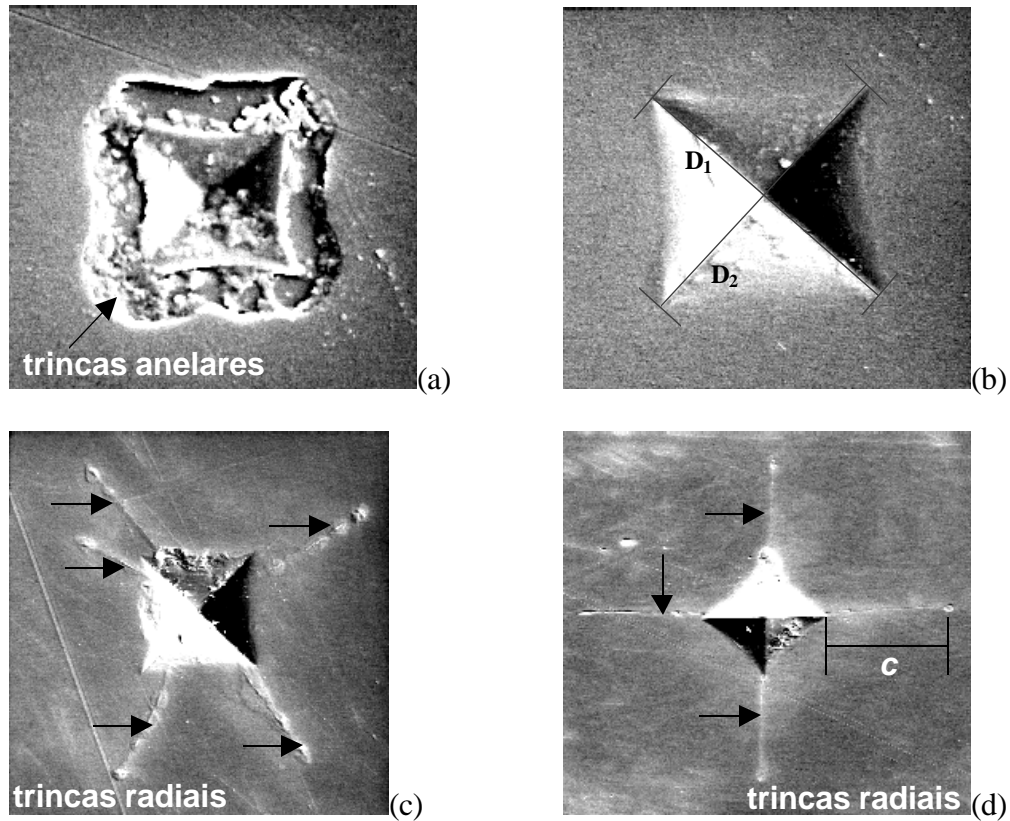


Figura 2: Microindentações Vickers do vidro B270: (a) micrografias indicando trincas anelares (ou de aresta) em cargas 10gf, 10000x; (b) MEV mostrando que em cargas 25gf e 50gf não se observou a presença de trincas radiais na microindentação, 7000x; (c) trincas radiais decorrentes de microindentação em cargas de 100gf, 2000x; (d) trincas radiais em cargas de 200gf, 1000x.

As Fig. 3(a) e (b) apresentam micrografias feitas através de Microscopia Óptica onde são mostrados detalhes de ranhura dúctil ($a = 0.5$ e $0.6\mu\text{m}/\text{rev.}$) e transição dúctil/frágil ($a = 0.7\mu\text{m}/\text{rev.}$), respectivamente, da superfície do vidro torneada nas condições descritas na Seção 2.

Na Fig. 4(a) percebe-se a região totalmente fraturada (parte escura) e a usinagem dúctil representada por pequenas ranhuras verticais paralelas. A Fig. 4(b) mostra micrografia do MEV onde se pode visualizar, em detalhe, a região torneada de forma totalmente dúctil, mostrada na Fig. 4(a).

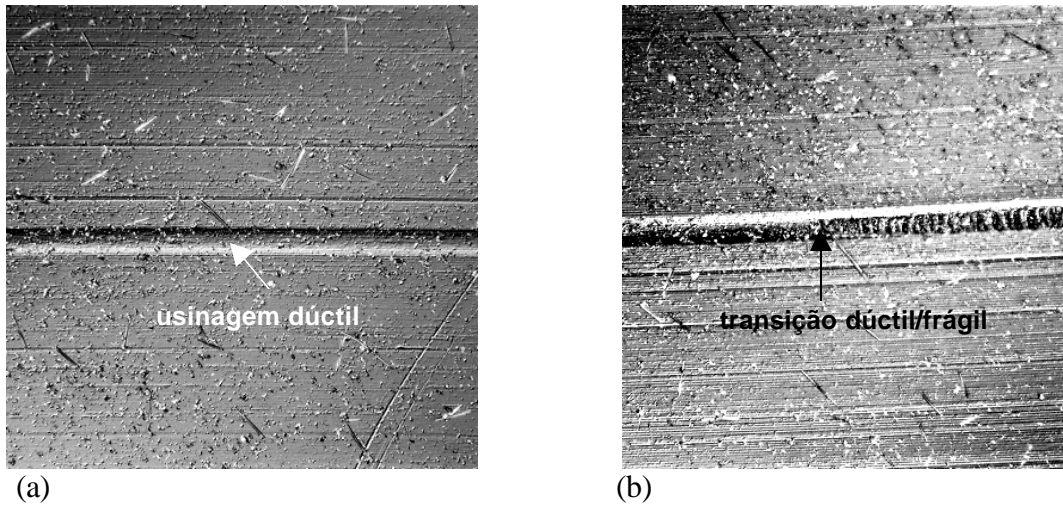


Figura 3: Microscopia Óptica que mostra a possibilidade de se tornear um vidro B270 com ferramenta de ponta única de diamante. (a) detalhe de ranhura dúctil e (b) detalhe de ranhura com transição frágil/dúctil

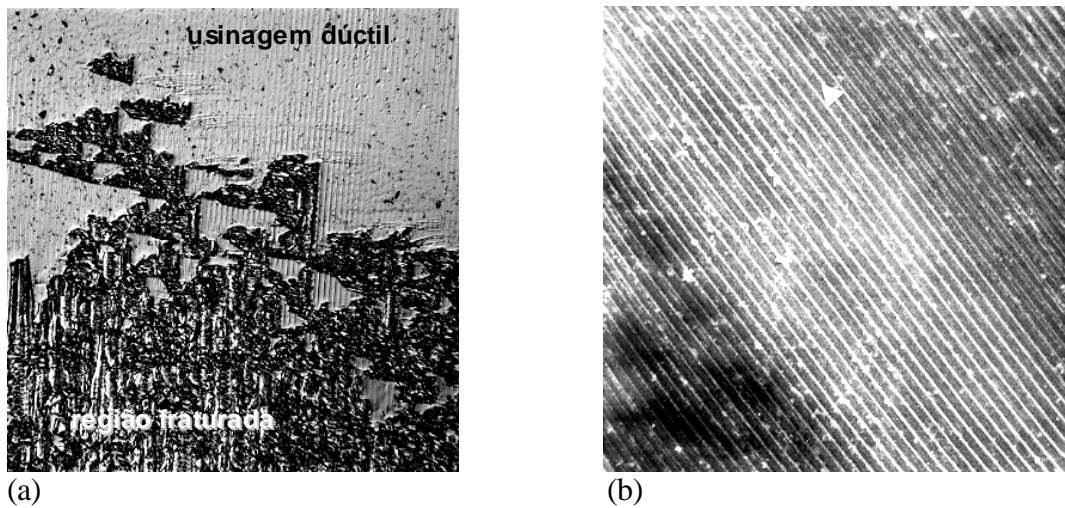


Figura 4: Microscopia Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostrando: (a) Microscopia Óptica da região torneada e fraturada e (b) Microscopia de Varredura da região da pastilha de vidro torneada de forma totalmente dúctil, 2000x.

4. DISCUSSÕES

Nos testes de microindentação Vickers, verificou-se que a dureza do vidro B270 é de 6.5 GPa ou 662 Kgf/mm². Observou-se a presença de trinca anelar em todas as indentações com cargas de 10gf. Não se conseguiu descobrir a causa deste tipo de trinca para cargas tão baixas.

A resistência à fratura aparente em microindentação de vidros deve ser determinada por (Le Bourhis E. & Metayer D., 2000):

$$K_c = c \frac{P}{c^{3/2}} \quad (1)$$

onde P é a carga aplicada (N), χ é uma função da razão elasto-plástica E/H_v e c é o tamanho médio das trincas radiais (Fig. 2d).

$$c = \chi_0 \text{tg}\phi \sqrt{\frac{E}{H_v}} \quad (2)$$

onde ϕ é metade do ângulo do indentador, χ_0 é uma constante adimensional que depende da natureza da deformação e E é o módulo de elasticidade do vidro B270. Para vidros e cerâmicas $\chi_0 \text{tg}\phi = 0.018$ (Sehgal *et al.*, 1995).

Entretanto, o valor da resistência à fratura aparente para o vidro B270 é aproximadamente $K_c = 1,1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ que está de acordo com a literatura (Shackelford, J.F., 1996).

Trabalhos reportados na literatura mostram que a usinagem dúctil de vidro ocorre através de escoamento viscoso a altas velocidades de corte para vários tipos de vidros (Schincker & Döll, 1987; Schincker, 1991). O escoamento viscoso ocorre através do aquecimento da interface ferramenta/peça a uma temperatura acima da temperatura de derretimento T_m (melting temperature) do vidro. A temperatura de derretimento do vidro “soda-lime”, por exemplo, é de 1275°C . Para que a temperatura na interface ferramenta/peça alcance este valor, é necessária uma velocidade de corte extremamente alta e corte a seco, ou seja, usinagem sem fluido refrigerante. Ainda segundo estes pesquisadores, para que haja escoamento viscoso sem a formação de trincas são necessárias profundidades de corte que variem de $0.1\mu\text{m}$ a $1.5\mu\text{m}$, dependendo do tipo de vidro, velocidades de corte de aproximadamente 20m/s e ferramentas de corte com ângulos de saída altamente negativos. No entanto deve-se ressaltar que no processo de usinagem usado pelos pesquisadores (corte radial com ferramenta de ponta única) que simula um processo de retificação, a energia gerada na interface ferramenta/peça é grande o suficiente para provocar escoamento viscoso, que difere do processo de torneamento usado neste trabalho.

Porém, a pastilha de vidro B270 foi torneada à temperatura ambiente com fluido refrigerante e a velocidades de corte bastante baixas de, no máximo, 1.3m/s . Apesar disso, os resultados obtidos foram bastante encorajadores. As profundidades de corte onde ocorreu o torneamento dúctil são submicrométricas. No entanto, o mecanismo de remoção dúctil de material não foi possível de ser determinado com precisão.

5. CONCLUSÃO

Conclui-se, então, que os testes preliminares em torneamento do vidro B270 mostraram que existe a possibilidade de se conseguir regime dúctil durante o torneamento quando são utilizadas condições de corte submicrométricas, porém sem a necessidade de altas velocidades de corte e sem ocorrer escoamento viscoso. Sugere-se, para trabalhos futuros, um estudo do mecanismo de remoção de material de vidros B270 em torneamento com ferramenta de ponta única de diamante, a influência das propriedades do material no mecanismo de remoção, bem um estudo detalhado da microindentação Vickers controlando alguns parâmetros tais como temperatura, velocidade de penetração e de remoção do indentador e tempo de aplicação da carga. Com este controle, se poderá estudar de forma mais precisa o mecanismo de formação de trincas causadas pela indentação Vickers.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece ao suporte financeiro da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e ao Bacharel em Ciência da Computação M.Sc. Gedson Faria pela ajuda dispensada.

REFERÊNCIAS

- Blackley, W.S. & Scattergood R. O., 1991, Ductile regime machining model for diamond turning of brittle materials, *Precision Engineering*, vol. 13, n. 2, pp.95-102.
- Chao C.L., 1991, Investigations of the machining of glasses and other normally brittle materials in the ductile regime, Ph.D. Thesis, Cranfield Institute of Technology, Cranfield, Bedford, UK.
- Hamidouche, M., Louahdi, R., Bouaouadja, N., Osmani, H., 1994, The fracture of soda-lime-glass, *Glass Technology*, vol. 35, n. 4, pp. 183-185.
- Jasinevisius, R.G., 1998, Influência da transição de fase sobre os limites de ductilidade observados no torneamento de ultraprecisão do silício monocristalino, Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo.
- Lawn, B., Wilshaw, R., 1975, Review indentation fracture: principles and applications, *J. Mater. Sci.*, v. 10, pp. 1049-1081.
- Le Bourhis, E. & Metayer D., 2000, Indentation of glass as a function of temperature, *Journal of Non-Crystalline Solids*, n. 272, pp. 34-38.
- Leung T.P., Lee, W.B. and Lu, X.M., 1998, Diamond turning of silicon substrates in ductile-regime, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 73, pp. 42-48.
- Pagotto C.R., 1998, Análise do processo de torneamento do silício policristalino, Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo.
- Schinker, M.G. & Döll W., 1987, Turning of optical glasses at room temperature, *Proceedings of SPIE, Germany*, vol. 802, pp. 70-80.
- Schinker, M.G., 1991, Subsurface damage mechanisms at high-speed ductile machining of optical glasses, *Precision Engineering*, vol. 13, n. 3, pp. 208-218.
- Schroeter, R.B., 1997, Usinagem de ultraprecisão de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho, Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Sehgal, J., Nakao, Y., Takahashi H. and Ito, S., 1995, Brittleness of glasses by indentation, *J. Mater. Sci. Lett.*, v.14, pp. 167-169.
- Shackelford, J.F., 1996, *Introduction to materials science for engineers*, ed Horton M., New Jersey, USA.
- Ziemath, E.C., Herrmann, P.C.P., 2000, Densification and residual stresses induced in glass surfaces by Vickers indentations, *J. Non-Cryst. Solids*, v. 273, pp. 19-24.

* Edmund Industrial Optics, Barrington, NJ, USA ([http://: www.edmundoptics.com/](http://www.edmundoptics.com/))

** Contour Fine Tooling Ltd., Stevenage, Herts, England.

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

**** Alkalis Brasil Ind. e Com. de produtos químicos Ltda., Guarulhos, SP.

DIAMOND TURNING AND MICROINDENTATION VICHERS TESTS IN OPTICAL GLASSES

Abstract. *Mechanical processes of material removal of brittle materials typically generate surface damage. In the case of the fabrication of optical components, it becomes essential that the process produce a damage free surface, since any surface damage may affect the performance of the component. In this work, Vickers micro-indentation and diamond turning of soda-cal-silicate (B270) preliminary tests were carried out. Results showed that this material presents restrict plasticity both for small indentation loads and for sub-micron cutting conditions. Ductile mode material removal took place at particular depths of cut and feed-rates.*

Keywords: *optical glasses, microindentation, diamond turning*