

ESTUDO DA MECÂNICA DA FRATURA APLICADA À USINAGEM DIAMANTADA NO MODO DÚCTIL EM MATERIAIS FRÁGEIS

Leonardo Enta

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Avenida Sete de Setembro, 3165 - Curitiba/PR, Brasil - CEP 80230-901. Departamento de Engenharia Mecânica.
leoent@uol.com.br

Paulo A. C. Beltrão

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR
beltrao@utfpr.edu.br

Resumo: *Com o grande desenvolvimento tecnológico, assistiu-se ao progresso da engenharia de ultraprecisão. Materiais frágeis, tipicamente as cerâmicas, possuem propriedades mecânicas de grande interesse industrial, contudo, em condições normais de usinagem, esses materiais possuem baixa usinabilidade e a superfície usinada é caracterizada pela presença de microtrincas. O trabalho tem como objetivo principal o estudo da usinabilidade dos materiais frágeis em regime dúctil. Foram realizados ensaios de microindenteamento, nanoindenteamento e nanoriscamento em três diferentes tipos de vidros, quais sejam: vidro soda-lime, vidro verde 90 e vidro borossilicato. Foram obtidos valores de dureza e módulo de elasticidade para o vidro borossilicato e confirmou-se a presença do efeito do tamanho no indenteamento (ISE) para esse material. Foram determinados os intervalos de carga e profundidade de corte crítica para o qual ocorre a transição do regime dúctil para o frágil, sob duas velocidades de avanço da ferramenta diamantada. Os riscos foram observados em microscopia ótica, para verificação da transição dúctil-frágil e do padrão de trincas formado. Esses valores são comparados entre si e explicados de acordo com propriedades mecânicas dos materiais.*

Palavras-chave: *Materiais frágeis, Vidros, Indenteamento, Nanoriscamento, Usinagem no modo dúctil.*

1. INTRODUÇÃO

Com o grande desenvolvimento tecnológico em diversas áreas do conhecimento, assistiu-se ao progresso da engenharia de ultraprecisão, juntamente com o avanço das técnicas de usinagem. Produtos fabricados pela usinagem de ultraprecisão têm por características apresentarem tolerâncias dimensionais muito estreitas, rugosidades superficiais da ordem de algumas dezenas de nanômetros, pois, na maioria das vezes, são produtos de grande responsabilidade, com utilização em diversas áreas do conhecimento: componentes ópticos, mecânicos, biomédicos e eletrônicos.

Materiais frágeis, tipicamente as cerâmicas, possuem propriedades de grande interesse prático industrial, como, por exemplo, sua elevada dureza, estabilidade térmica, alta resistência a ambientes químicos hostis, transparência ótica, condutibilidades elétricas, dentre outras. Contudo, em condições normais de usinagem, esses materiais possuem baixa usinabilidade, sendo a superfície usinada caracterizada muitas vezes pela presença de lascas e microtrincas, provenientes do mecanismo de fratura frágil, sendo necessárias etapas posteriores de lapidação e/ou polimento, que necessariamente demandam tempo.

O fenômeno da usinagem dúctil em materiais frágeis foi observado recentemente, quando materiais frágeis foram submetidos ao processo de corte utilizando pequenas cargas (da ordem de

algumas gramas) e pequenas profundidades de corte (da ordem de micrômetros). Isso foi possível graças ao desenvolvimento das máquinas ferramentas cada vez mais rígidas, com menores índices de vibrações e controles precisos da ordem de micrômetros de avanços e profundidades de corte. Verifica-se, nesse caso, deformação plástica nos dois lados do canal usinado, com ausência do padrão de trincas apresentado em condições normais de corte.

Testes de indenteamento podem ser utilizados para investigar os efeitos da deformação elasto-plástica na escala micrométrica. (Beltrão, 2001). Ensaios de riscamento utilizando um indenteador diamantado fornecem informações do comportamento dos materiais em operações de usinagem (Lawn, 1975). O comportamento dos materiais sob ensaios de indentação e riscamento diferencia-se devido à presença de uma força tangencial nesse último. Um modelo computacional foi desenvolvido por Van Mier (1996) e é apresentado na Figura 1.

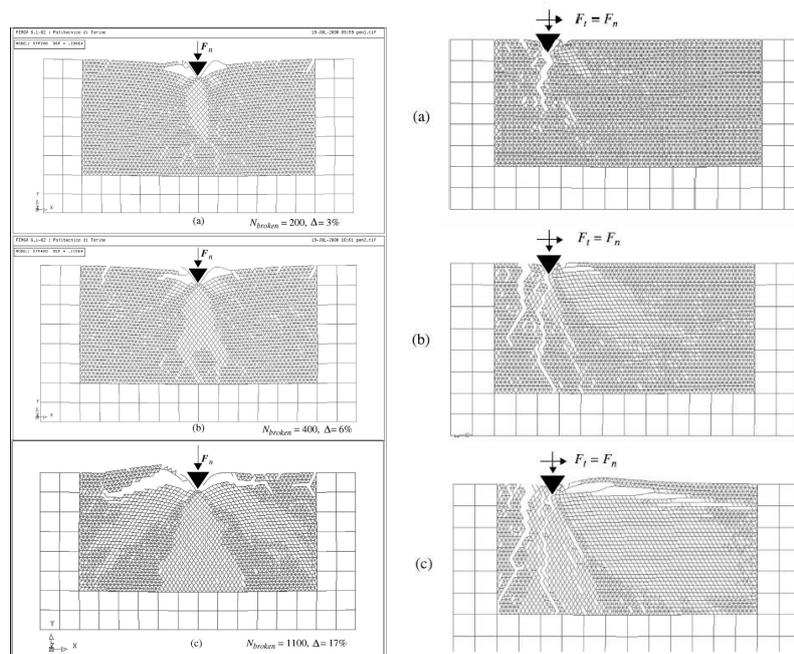


Figura 1 – Simulações de indenteamento e riscamento sob análise do modelo Reticulado (Chiaia, 2001).

Houérou *et al.* (2003) afirmam que ainda não há relações bem estabelecidas entre a composição dos vidros, condições ambientais e suas propriedades mecânicas no comportamento dos mesmos sob ensaios de riscamento, sendo que há poucos artigos publicados nesse contexto.

Portanto, faz-se necessário um estudo detalhado da usinabilidade dos materiais frágeis em regime dúctil, analisando os parâmetros influentes no processo e relacionando-os com as suas propriedades mecânicas.

2. METODOLOGIA

Três vidros comerciais foram selecionados para esse estudo, quais sejam: vidro comercial soda-lime (vidro incolor com aplicação diversa), vidro verde 90(vidro com aplicação diversa, com destaque para o ramo automotivo) e o vidro borossilicato (com aplicação em vidraria de laboratório e utensílios domésticos, sob o nome comercial “Pyrex”). As amostras de vidro possuíam seção quadrada de dimensões 30x30x4mm aproximadamente e foram submetidas aos ensaios nos seus respectivos estados de fornecimento sem passar por qualquer tipo de tratamento térmico, apenas uma limpeza com álcool etílico para remoção de eventuais impurezas superficiais.

A Tabela 1 mostra a composição química aproximada de cada um dos vidros e a Tabela 2 algumas de suas propriedades mecânicas.

Tabela 1 – Composição aproximada dos vidros (em % do peso)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	B ₂ O ₃
Vidro Incolor	72,4	0,7	0,1	0,02	8,6	4	13,6	0,31	0,2	-
Vidro Verde 90	72	0,69	0,91	0,02	8,6	3,9	13,5	0,2	0,15	-
Vidro Borossilicato	78	2	-	-	-	-	6,5	-	-	13

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos vidros

	Vidro Incolor	Vidro Verde	Vidro Borossilicato
Dureza (GPa)	6,58	6,88	6,63
Módulo de Elasticidade E (GPa)	70,87	72,26	63,51
Tenacidade à fratura (MPa m ^{1/2})	0,68	0,76	0,78

Os ensaios de nanoindentação e nanoriscamento foram realizados com o equipamento Nanoindenter XP[®] (MTS Nano Instruments, Knoxville, TN), pertencente ao Laboratório de Propriedades Nanométricas da UFPR.

Para os ensaios de nanoindentação, o equipamento foi programado para as seguintes cargas máximas: 250mN (~25gf), 100mN (~10gf), 50mN (~5gf) e 10mN (~1gf), utilizando a ponta diamantada Berkovich (pirâmide regular de base triangular). As amostras foram submetidas a nove repetições, devido à dispersão natural dos resultados em torno de um valor médio.

Para os ensaios de nanoriscamento, foi utilizada a ponta Berkovich com orientação de ponta de 180° (ou seja, a ponta da pirâmide voltada para o sentido do risco) e a distância de risco foi de 500µm. A carga variou linearmente de 0g no início do risco até 40g no final. Duas velocidades de deslocamento da ferramenta foram utilizadas: 5µm/s e 10µm/s. Para garantir a reprodutibilidade, as amostras foram submetidas a três riscos para cada condição descrita.

As indentações e os riscos foram observados com o microscópio ótico JenaVert (Carl Zeiss Jena, Germany), pertencente ao Laboratório Integrado de Materiais da UTFPR. Foram registradas fotomicrografias de todos os riscos sob ampliações de 12,5 e 25 vezes. Alguns detalhes que mereciam destaque foram ampliados 62,5 vezes.

3. RESULTADOS

A dureza H e o módulo de elasticidade E determinados no nanoindentamento dependem da análise da curva da carga aplicada em função da profundidade do indenteador conforme equações propostas por Brotzen *et al.* (1998). A curva da carga aplicada é apresentada na Figura 2.

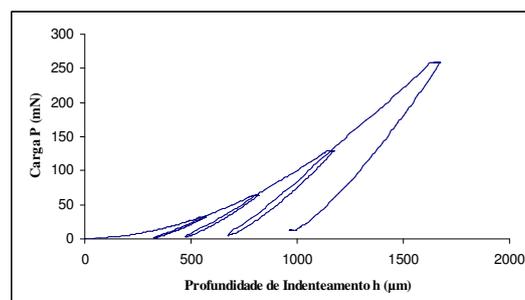


Figura 2 – Gráfico representando a carga aplicada pela profundidade do nanoindentamento para o vidro Borossilicato.

A Figura 3 mostra uma fotomicrografia das nanoindentações, juntamente com o gráfico das durezas médias obtidas para cada carga aplicada.

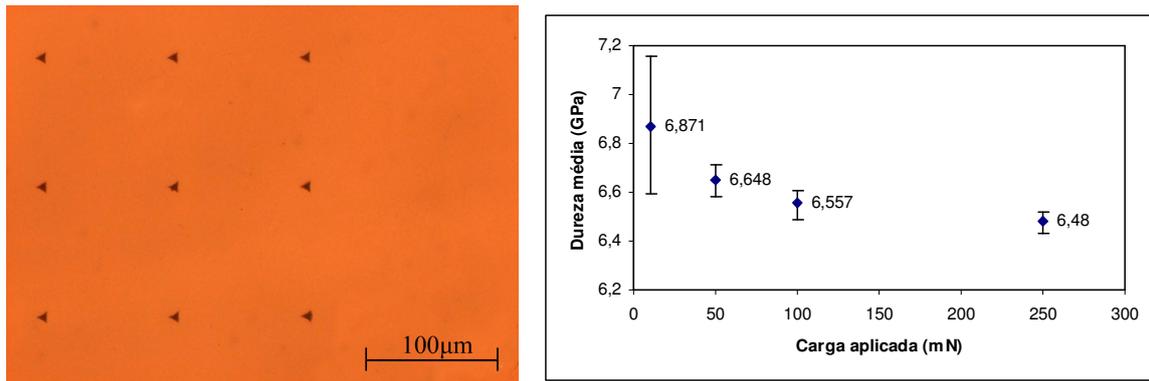


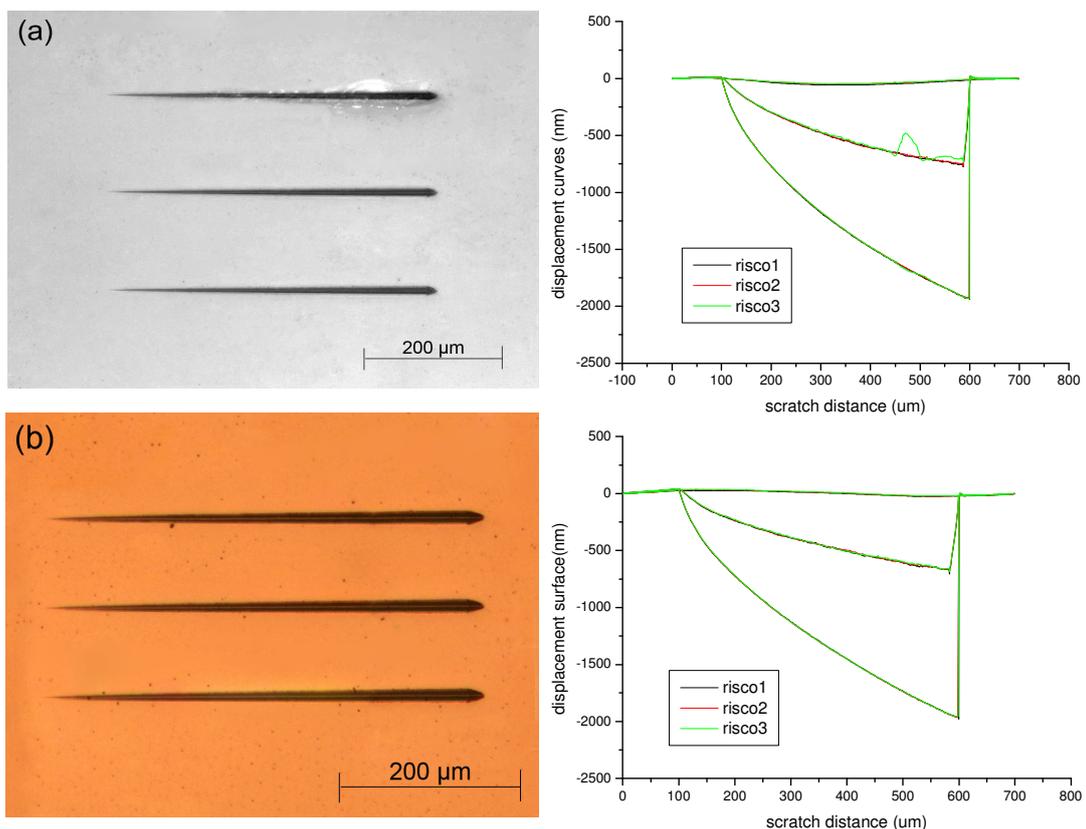
Figura 3 – Fotomicrografia e gráfico de dureza do vidro borossilicato para diferentes cargas aplicadas.

A Tabela 3 apresenta os valores de dureza e módulo de elasticidade obtidos para o vidro Borossilicato no ensaio de nanoindenteamento.

Tabela 3 – Dureza média e módulo de elasticidade para o vidro Borossilicato

Dureza Média GPa (Desvio Padrão)	Módulo Elasticidade E GPa (Desvio Padrão)
6,639 (0,1692)	63,5172 (0,6636)

A Figura 4 mostra as microfotografias dos riscos sob velocidade de 5 μm/s feitas através de Microscopia ótica nas três amostras juntamente com seus respectivos gráficos de profundidade em função da distância percorrida pelo indenteador. Os sulcos apresentam-se suaves durante todo seu comprimento, e profundidades de aproximadamente 1,8 μm são atingidas sem formação de trincas.



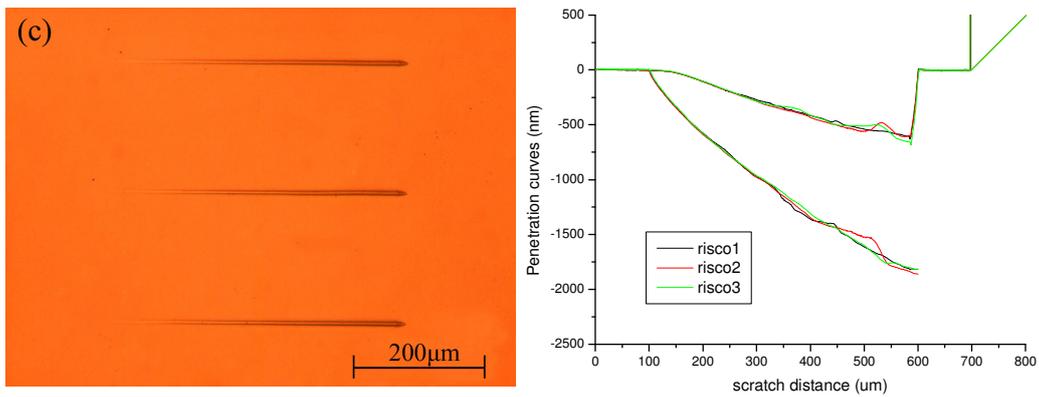


Figura 4 – Fotomicrografias da vista superior dos riscos, e gráficos penetração em função da distância de risco para (a) vidro incolor (b) vidro verde (c) vidro borossilicato, com indenteador Berkovich e carga variando de 0 – 40g.. Ampliação de 12,5X.

A Figura 5 mostra as micrografias dos riscos sob velocidade de 10µm/s e seus respectivos gráficos de profundidade em função da distância percorrida pelo indenteador.

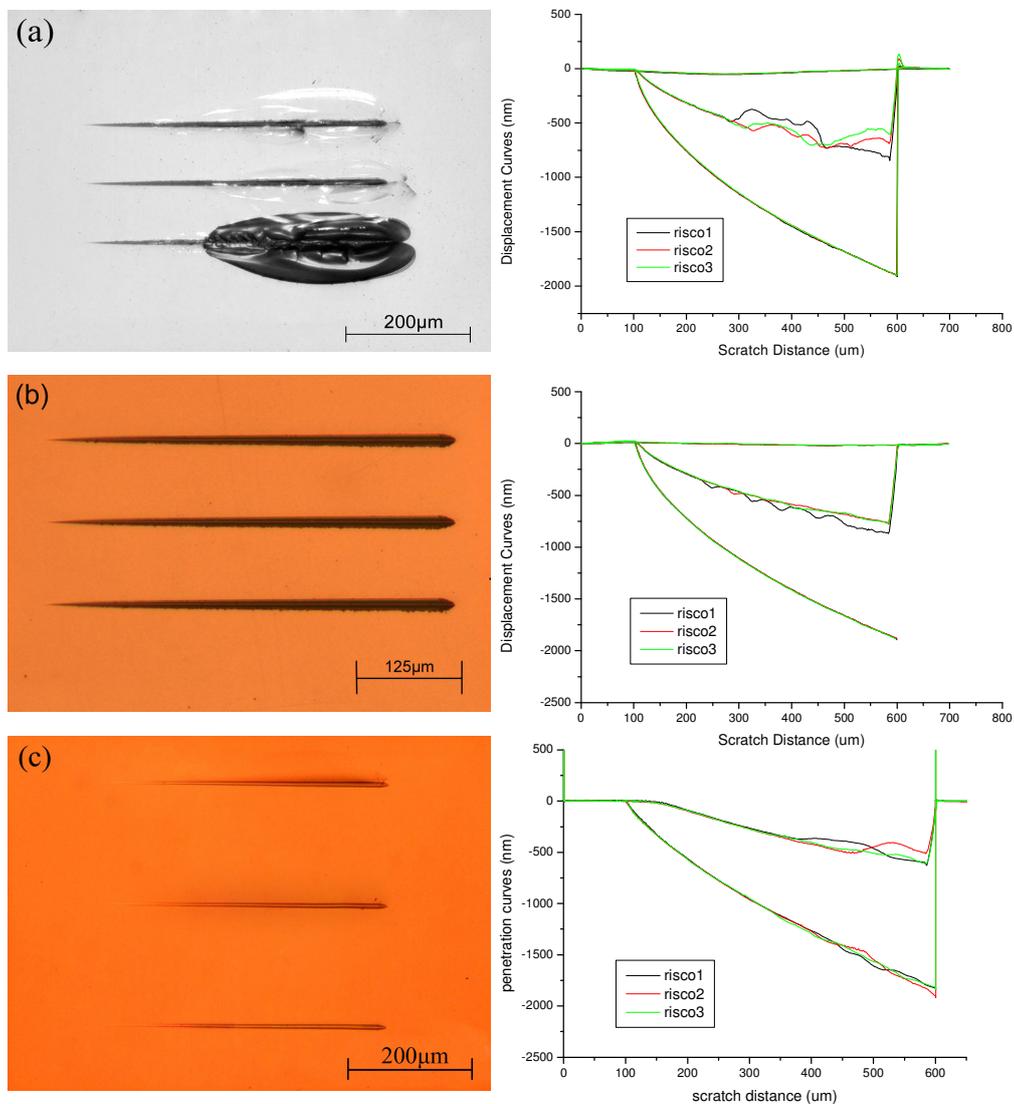


Figura 5 – Fotomicrografias da vista superior dos riscos, e gráficos penetração em função da distância de risco para (a) vidro incolor (b) vidro verde (c) vidro borossilicato, com indenteador Berkovich e carga variando de 0 – 40g.. Ampliação de 12,5X.

Sob essas condições, verifica-se a presença da formação de trincas e a região de transição dúctil-frágil pode ser determinada. A Tabela 4 mostra a faixa de carga e profundidade crítica para cada material e a Figura 6 evidencia essa transição para o vidro soda-lime.

Tabela 4 – Faixa de carga e profundidade crítica de transição dúctil-frágil para os materiais

Material	Carga aplicada(mN)	Profundidade (nm)
Vidro Incolor	133,84 – 180,00	1029,62 – 1232,12
Vidro Verde	95,00– 150,00	800,00 – 1056,12
Vidro Borossilicato	384,00– 400,00	1837,00 – 1985,00

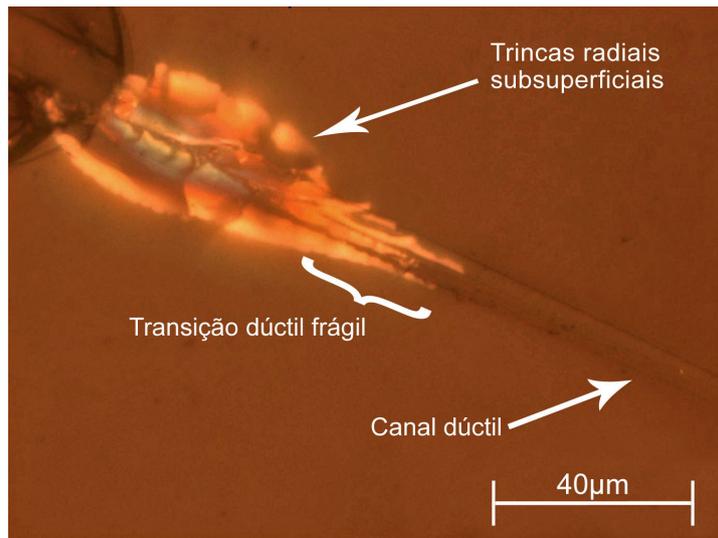


Figura 6 – Detalhe da fotomicrografia da vista superior do risco para vidro incolor, evidenciando o canal dúctil, a transição dúctil-frágil e o padrão de trincas formado. Ampliação de 62,5X.

3. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Verificou-se o fenômeno do efeito do tamanho no indenteamento (Indentation Size Effect – ISE, Figura 3) nas medições de nanodureza, ou seja, o material torna-se cada vez mais duro à medida que se aplicam cargas mais baixas. Para cargas abaixo de certo valor (1gf), a impressão torna-se muito pequena e percebem-se grandes valores de dispersão.

Nos ensaios de nanoriscamento, verificou-se que diferentes velocidades de translação da ponta diamantada acarretam em comportamentos diferenciados dos vidros. À medida que a velocidade aumenta, o processo de remoção de material torna-se mais severo e a nucleação e propagação de trincas ocorre sob menores cargas e profundidades de corte.

Para mesmas condições de ensaio, os vidros exibem comportamentos diferentes entre si. Tem-se, em ordem crescente de usinabilidade: o vidro soda-lime, vidro verde 90 e o vidro borossilicato. Comparando as propriedades mecânicas, observa-se que o vidro verde possui uma dureza superior comparado ao soda-lime (6,88GPa para o vidro verde contra 6,58GPa para o incolor) e sua maior tenacidade a fratura ($0,76 \text{ MPa m}^{1/2}$ contra $0,68 \text{ MPa m}^{1/2}$ para o vidro incolor) podem ser utilizadas para uma explicação do diferente comportamento durante os ensaios. Observou-se que houve um grande lascamento no vidro incolor para velocidade de translação da ponta de $10\mu\text{m/s}$ e sua transição dúctil-frágil foi na faixa de 1029,62 – 1232,12 nm. Para o vidro verde, o mesmo padrão de trincas não foi observado, a transição dúctil frágil foi observada em uma faixa de profundidade inferior (800,00 – 1056,12 nm), contudo essa transição mostrou-se mais suave, com formação de microtrincas ao longo do canal.

O vidro borossilicato apresentou a melhor usinabilidade dentre os três materiais. Para velocidades de 10µm/s, houve apenas formação de trincas no final do canal. Esse comportamento pode ser relacionado à maior tenacidade à fratura comparada aos outros materiais (0,78 MPa m^{1/2} para o vidro borossilicato)

A adição de óxido de boro (B₂O₃, óxido formador de rede) na composição básica dos vidros, modifica a estrutura atômica dos materiais, propriedades mecânicas e conseqüentemente o comportamento dos vidros.

4. AGRADECIMENTOS

Especialmente ao PIBIC/ CNPq pela concessão da bolsa, à FUNCEFET-PR pelo apoio financeiro, e à Universidade Federal do Paraná pela seção dos equipamentos para a realização dos ensaios.

5. REFERÊNCIAS

- BELTRÃO, P. A. C. 2001. Ruling and Indentation Tests Used for the Investigation of the Brittle/Ductile Transition in Brittle Materials, 1° Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação.
- BROTZEN, F.; PHARR, G.; LEPIENSKI, C. M. 1998. Curso de Propriedades Nanomecânicas, 13° CBECIMAT – IV SEMEL.
- CHIAIA, B. 2001. Fracture Mechanisms Induced in a Brittle Material by a Hard Cutting Indenter. *International Journal of Solids and Structures.*, Vol . 38.
- LAWN, B. R.; WILSHAW, R. 1975. Review of Indentation Fracture: Principles and Applications. *J. Mat. Sci.*, Vol. 10, pp1049-81.
- LE HOUÉROU, V.; SANGLEBOEUF, J.; DÉRIANO, S.; ROUXEL, T.; DUISIT, G.; Surface Damage of Soda-Lime-Silica Glasses: Indentation Scratch Behavior. *J. of Non-Crystalline Solids.*, Vol. 316, pp54-63, 2003
- VAN MIER, J.G.M., 1996. Fracture Processes of Concrete. Assessment of Material Parameters for Fracture Models. CRC Press, Boca Raton.

STUDY OF FRACTURE MECHANICS APPLIED TO DUCTILE MACHINING OF BRITTLE MATERIALS

Leonardo Enta

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Avenida Sete de Setembro, 3165 - Curitiba/PR, Brasil - CEP 80230-901. Departamento de Engenharia Mecânica.
leoent@uol.com.br

Paulo A. C. Beltrão

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR
beltrao@utfpr.edu.br

Abstract: With the fast technological improvement, ultra-precision engineering improved as well. Brittle materials have mechanical properties with great industrial interest. However, in normal conditions, they have low machinability and their machined surface have lots of cracks. The main objective of this paper is to study the usability of brittle materials while in ductile regime. For this study, microindentation, nanoindentation and nanoscratching were performed in three glasses (soda-lime, green and borosilicate glass). Mechanical properties (Hardness and Elastic Modulus) were determined for Borosilicate glass and Indentation Size Effect was confirmed. Two different translating speeds were chosen and the load which ductile to brittle transition occurs and their corresponding displacement were determined for all three glasses and compared themselves in terms of their mechanical properties. All scratches were observed in optical microscopy and microphotographs were taken to show the scratches and the ductile to brittle transition.

Keywords: Brittle materials, Glasses, Nanoindentation, Scratching, Ductile machining.