

RELAÇÃO ENTRE A DUREZA DO ABRASIVO E A QUALIDADE DE SUPERFÍCIES DE MATERIAIS USINADOS POR ABRASÃO ULTRASONORA¹

Flávia Cavalcanti Miranda²

Leandro Jacomine³

Alberto Arnaldo Raslan⁴

Resumo

A usinagem por abrasão ultrasonora é aplicada no corte de materiais duros e frágeis como vidros, quartzo, alumina, fluoreto de lítio, etc. Neste trabalho, o objetivo foi o de avaliar a influência da dureza do abrasivo na qualidade superficial de amostras de vidro e quartzo usinadas por abrasão ultrasonora. As usinagens foram realizadas em uma máquina Sonic-Mill com potência 1790 W e fixando-se os parâmetros frequência e amplitude de vibração, carga estática sobre o sonotrodo, geometria do sonotrodo, granulometria e concentração do abrasivo diluído em água. Os abrasivos empregados foram alumina (Al_2O_3) e carbeto de boro (B_4C). A ferramenta empregada foi confeccionada em aço inoxidável austenítico com uma geometria sextavada. Verificou-se que a velocidade de usinagem é maior para o vidro em relação ao quartzo. A análise topográfica foi realizado com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura e interferômetro laser e os resultados mostraram haver uma diferença significativa apenas entre a superfície da amostra de quartzo usinada com B_4C e as demais amostras.

Palavras-chave: Abrasão ultrasonora; Qualidade superficial; Materiais frágeis; Abrasivos.

1 Contribuição a ser apresentada no 60^o Congresso Anual, 25 a 28 de julho de 2005, Centro de Convenções e Feiras, Belo Horizonte - MG - Brasil.

2 Graduanda, Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) - Universidade Federal de Uberlândia (UFU). (fcavalcantim@gmail.com)

3 Doutorando, LTM / FEMEC / UFU. (jacomine@mecanica.ufu.br)

4 Professor Dr., LTM / FEMEC / UFU. (ltm-raslan@ufu.br)

INTRODUÇÃO

Materiais duros e frágeis como vidro, cerâmicas e quartzo são extensamente usados para manufaturar muitos produtos usados no cotidiano. São empregados na produção de componentes eletrônicos, elétricos, magnéticos e ópticos para sistemas de alto desempenho como transdutores, sensores e ressonadores. Esses materiais são de difícil processamento mecânico, pois apresentam alta sensibilidade à tensão de contato e eles sofrem fratura com facilidade. Muitas técnicas de usinagem podem ser mencionadas para o processamento mecânico desses materiais como a usinagem com ferramentas de diamante, laser, feixe de elétrons, química, eletroquímica, abrasão ultrasonora, etc.

A técnica de usinagem por abrasão ultrasonora é adequada ao processamento mecânico de materiais duros, frágeis e isolantes elétricos, onde os processos tradicionais de usinagem não são aplicáveis. Essa técnica permite a obtenção de peças com geometrias complexas, com boas tolerâncias dimensionais, preservação da integridade superficial e bom acabamento superficial. Os parâmetros que podem ser explorados no processo de usinagem por abrasão ultrasonora são frequência e amplitude de vibração, geometria do sonotrodo, carga estática sobre o sonotrodo, material e geometria da ferramenta, tipo e granulometria do abrasivo, concentração do abrasivo no fluido diluidor, fluxo da mistura e natureza do material a ser usinado.

Segundo Soundararajan e Radhakrishnan (1986) a remoção de matéria ocorre pelo martelamento de partículas abrasivas sobre o material a ser usinado, que induzem múltiplas indentações na sua superfície. São geradas e propagadas microtrincas e atua, predominantemente, o micromecanismo de desgaste por microlascamento. Consegue-se, desta forma, reproduzir na peça a geometria da ferramenta.

Em trabalho realizado por Guzzo *et al.* (2004), observou-se a variação da velocidade com o aumento da profundidade de usinagem em diferentes materiais. Para quartzo, zircônia e alumina, a velocidade de usinagem era influenciada com a profundidade usinada. Em outros, como vidro, fluoreto de lítio e ferrite, esta variação não foi observada.

Em trabalho realizado por Miranda *et al.* (2005) foram avaliadas as velocidades de usinagem por abrasão ultrasonora de vidro, quartzo e alumina. Como abrasivo foram usados B_4C , SiC e Al_2O_3 com granulometria 400 *mesh*. Observou-se a influência da dureza dos abrasivos e dos materiais usinados com a velocidade de usinagem.

O objetivo deste trabalho é o de analisar uma possível influência da dureza dos abrasivos nas superfícies de amostras de vidro e quartzo usinadas por abrasão ultrasonora.

METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados em um bloco de vidro sodo-cálcico e outro de quartzo. Usinou-se até a profundidade de 3,5 mm, aproximadamente. Um equipamento de usinagem Sonic-Mill com potência de 1790 W e frequência de vibração de 20 kHz foi utilizado na obtenção dos resultados. Os parâmetros de usinagem utilizados foram carga estática de 25 N aplicada em um sonotrodo cônico de titânio, amplitude de vibração de 45 μ m pico a pico. Os parâmetros selecionados caracterizam um regime de acabamento fino. A ferramenta de usinagem foi confeccionada em aço inoxidável

austenítico, com secção transversal sextavada maciça de 12,7 mm. Como abrasivos foram usados Al_2O_3 ($H = 19,5$ GPa) e B_4C ($H = 50$ GPa), ambos com granulometria de $25 \mu\text{m}$ (400 *mesh*), diluídos em água na proporção de 2,5 litros de água por quilograma de abrasivo. Duas misturas abrasivas, com abrasivos novos de Al_2O_3 e B_4C , foram preparadas para a realização dos ensaios deste trabalho. Durante os testes, havia reciclagem da mistura na interface ferramenta / amostra.

Em cada bloco foram realizadas duas usinagens para cada tipo de abrasivo. Foram mensurados os tempos necessários para se usinar em intervalos de $100 \mu\text{m}$ ao longo da profundidade de usinagem. As profundidades parciais foram determinadas usando-se relógio comparador.

A análise topográfica da superfície foi feita com auxílio de microscópio eletrônico de varredura (MEV) Carl Zeiss Leo 94A e interferômetro laser UBM. Os resultados de interferometria na amostra foram obtidos varrendo uma área de 1 mm^2 com densidade de 1000 e 100 pontos, para as direções x e y , respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

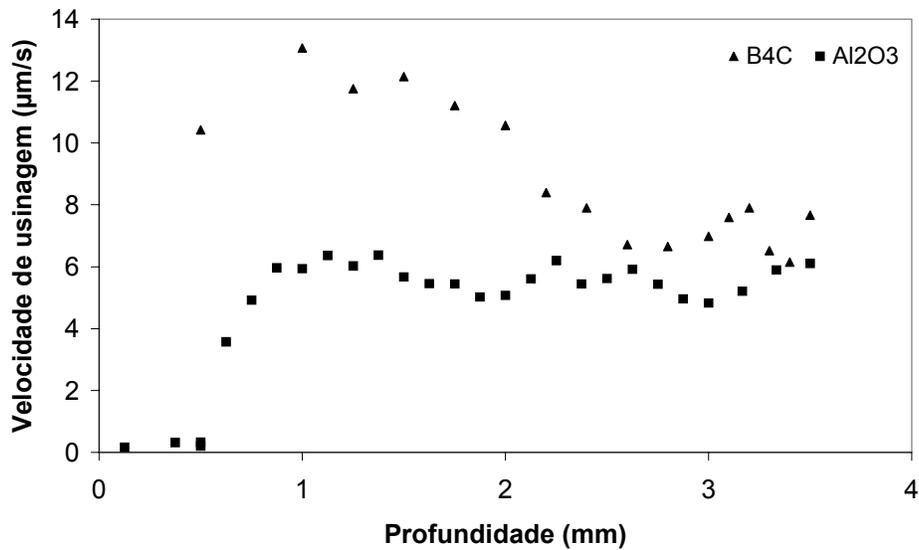
Os resultados de velocidade de corte para os ensaios realizados são mostrados na Figura 1. Observa-se que tanto para o vidro quanto para o quartzo, as usinagens realizadas com abrasivo B_4C apresentaram maior velocidade do que as realizadas com Al_2O_3 , como já havia sido observado anteriormente por Miranda *et al.* (2005). Observa-se ainda que o vidro é mais facilmente usinado que o quartzo. O vidro é amorfo enquanto o quartzo é um cristal. Logo, eles possuem mecanismos distintos de propagação de trincas. Tal fato foi também observado por Guzzo *et al.* (2004), em seus experimentos. As variações na velocidade de corte encontrada pelos dois autores anteriormente citados e os resultados contidos neste trabalho são explicadas pelo fato de ter sido utilizada uma ferramenta tubular no trabalho de Miranda *et al.* (2005). Já Guzzo *et al.* (2004) utilizaram uma ferramenta maciça, com geometria e dimensões diferentes, além de abrasivo com granulometria mais fina (600 *mesh*).

Ainda na Figura 1, pode-se observar que o quartzo, usinado com Al_2O_3 , não teve grandes alterações na sua velocidade de corte ao longo da profundidade usinada, fato não observado nos outros experimentos.

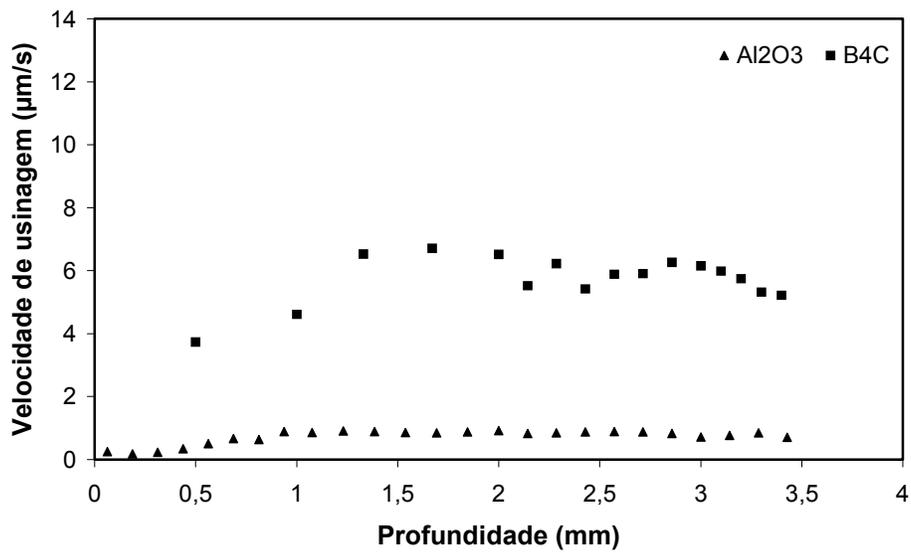
As fotografias obtidas pela microscopia eletrônica de varredura são mostradas na Figura 2. A superfície de vidro usinado com B_4C apresentou um sutil refinamento em relação ao vidro usinado com Al_2O_3 . Essa diferença entre as superfícies é bem mais visível nas amostras de quartzo. O quartzo usinado com B_4C apresenta-se visivelmente alisado com relação ao quartzo usinado com Al_2O_3 . Comparando-se os materiais usinados, as superfícies do vidro se assemelham com a do quartzo usinado com Al_2O_3 . Em todos os casos fica evidenciado que o mecanismo de desgaste predominante é o de microlascamento.

Os resultados de interferometria são mostrados nas Figuras 3 e 4. A Figura 3 mostra as rugosidades médias encontradas (R_a = aritmética e R_q = quadrática). A diferença entre os valores de rugosidade média entre as amostras não representa um valor muito significativo. Na Figura 4 temos os valores de achatamento e simetria das superfícies das amostras. A superfície do quartzo usinado com B_4C apresentou-se significativamente distante dos demais. Essa superfície apresenta-se com assimetria

positiva. Tal fato vem comprovar as observações feitas no microscópio eletrônico de varredura, onde tal amostra se mostrou com uma topografia diferente.



(a)



(b)

Figura 1. Velocidade de usinagem em função da profundidade (a) vidro e (b) quartzo

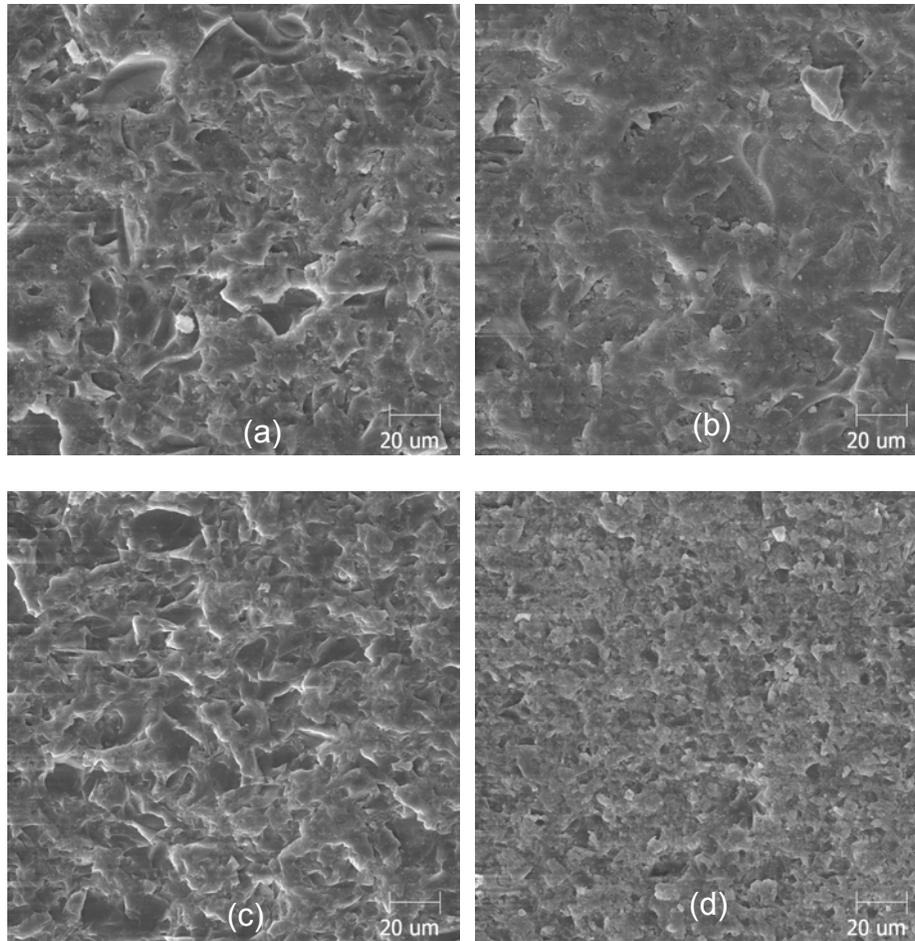


Figura 2. Fotografias de microscopia eletrônica de varredura (a) vidro usinado com Al_2O_3 (b) vidro usinado com B_4C (c) quartzo usinado com Al_2O_3 (d) quartzo usinado com B_4C .

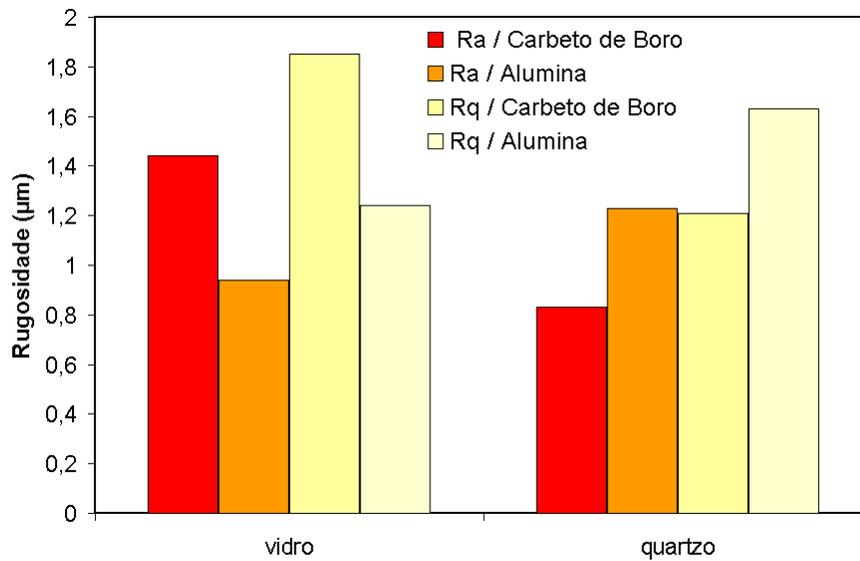


Figura 3. Rugosidade média para as superfícies usinadas.

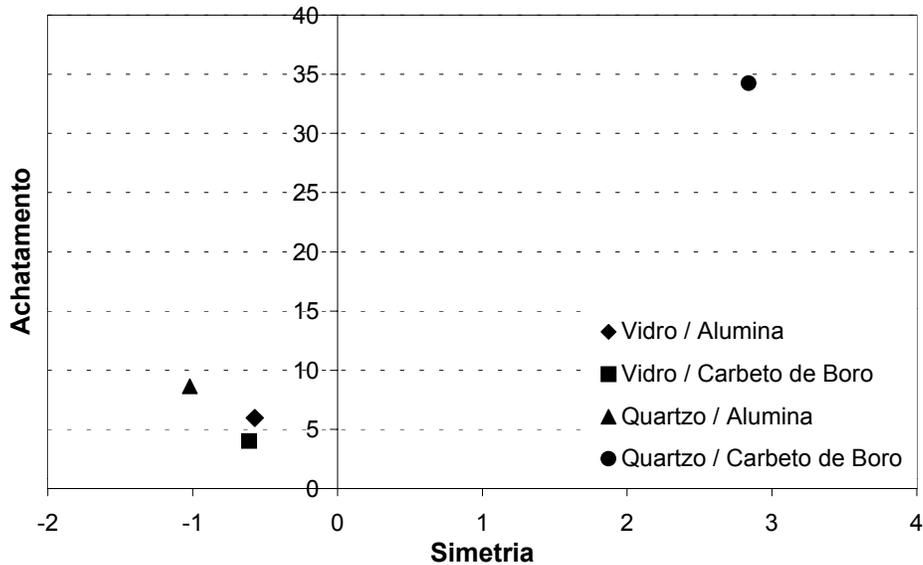


Figura 4. Achatamento e simetria das amostras de vidro e quartzo.

Foi realizada uma análise estatística dos resultados das velocidades encontradas. Utilizou-se metodologia de superfície de resposta. Escolheu-se como modelo uma equação do tipo polinomial como a descrita abaixo:

$$V_C = a_0 \cdot x_1^0 \cdot x_2^0 \cdot x_3^0 + a_1 \cdot x_1^1 \cdot x_2^0 \cdot x_3^0 + a_2 \cdot x_1^0 \cdot x_2^1 \cdot x_3^0 + a_3 \cdot x_1^1 \cdot x_2^1 \cdot x_3^1 + a_4 \cdot x_1^0 \cdot x_2^0 \cdot x_3^2 \quad (1)$$

Com os valores velocidades encontradas, de dureza do material e dos abrasivos e das profundidades desejava-se encontrar os coeficientes da equação 1 (a_0 , a_1 , a_2 , etc). Para tanto, através da equação 2 obteve-se a matriz de coeficientes.

$$(x^t \cdot x)^{-1} \cdot (x \cdot y) = A \quad (2)$$

Onde,

x corresponde aos parâmetros de entrada,

y aos parâmetros de saída, e

A corresponde a matriz dos coeficientes.

Os resultados encontrados para os coeficientes da equação 1, são mostrados na equação 3:

$$V_C = -9,0366 + 0,5622 \cdot h_m + 0,4518 \cdot h_a - 0,0287 \cdot h_m \cdot h_a + 0,0127 \cdot h_m \cdot h_a \cdot p - 0,4431 \cdot h_m \cdot p - 0,1326 \cdot h_a \cdot p + 7,8977 \cdot p - 0,7310 \cdot p^2 \quad (3)$$

Onde,

V_C é velocidade de usinagem;

h_m é dureza do material;

h_a é dureza do abrasivo;

p é profundidade de usinagem.

Foi realizada a análise de variância, os resultados são mostrados na tabela 1. O erro puro encontrado foi nulo pela impossibilidade de realizar mais experimentos. A variação explicável é melhor quanto mais próximo do valor 1 estiver, então o valor encontrado de 0,92659 pode ser considerado bom.

Tabela 1. Dados sobre a interpolação.

ANOVA da regressão

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de gdl	Média Quadrática
Regressão	167.2	1	167.2
Resíduos	13.24	14	0.946
F. Ajuste	13.24	14	0.946
Erro Puro	0	0	NaN
Total	180.4	15	

% variação explicada: 0.92659

% máxima de variação explicável: 1

Substituindo na equação 3 os valores de dureza para o vidro ($h_m=5,8$) e os valores para a dureza dos abrasivos substituídas por $h_a=19,5$ e $h_a=50$, obtém-se as seguintes equações

$$V_C = -0,2112 + 4,1840 \cdot p - 0,7310 \cdot p^2 \quad (4)$$

Abrasivo empregado Al_2O_3

$$V_C = 8,4923 + 2,3950 \cdot p - 0,7310 \cdot p^2 \quad (5)$$

Abrasivo empregado B_4C

Essas equações 4 e 5 são mostradas na Figura 5 (a). Onde encontramos também o valor da média da velocidade em todos os milímetros de usinagem obtida experimentalmente.

Da mesma forma obtemos as equações para as usinagens do quartzo ($h_m=15$)

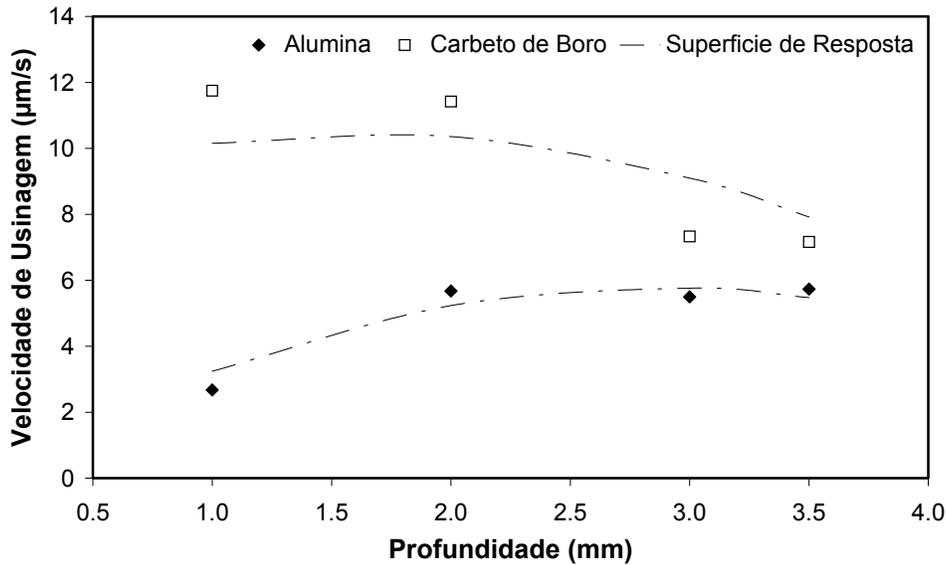
$$V_C = -0,1858 + 2,3950 \cdot p - 0,7310 \cdot p^2 \quad (6)$$

Abrasivo empregado Al_2O_3

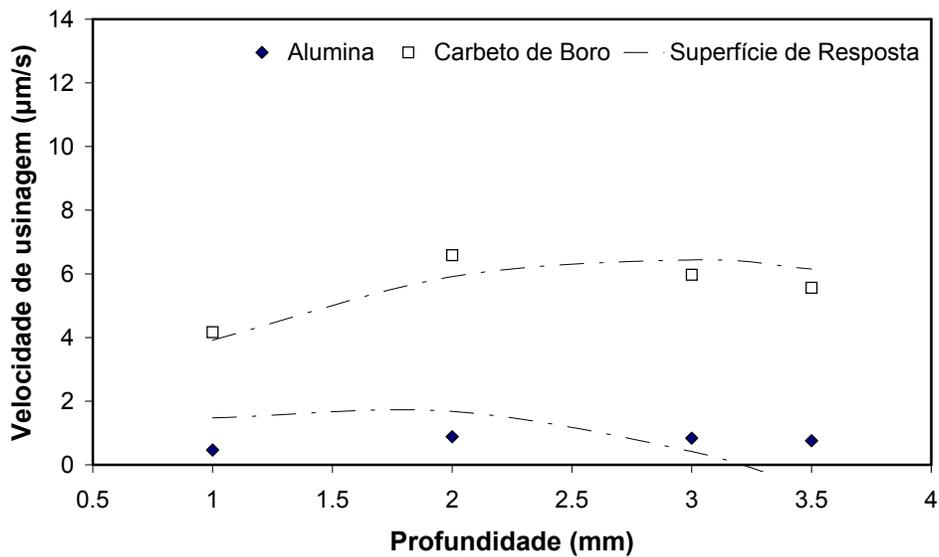
$$V_C = 0,4674 + 4,1840 \cdot p - 0,7310 \cdot p^2 \quad (7)$$

Abrasivo empregado B_4C

Essas equações 6 e 7 são mostradas na Figura 5 (b) juntamente com a média de velocidade obtida experimentalmente em todos os milímetros.



(a)



(b)

Figura 5. Velocidade de usinagem e superfície de resposta (a) vidro (b) quartzo.

Pelo resultado desta avaliação estatística, observa-se que a velocidade de corte varia com o quadrado da profundidade de usinagem. Verifica-se ainda que na usinagem de vidro, com o aumento da profundidade, tem-se a aproximação dos valores de velocidade de usinagem. O contrario é observado para o quartzo. Não foi possível identificar, ao certo, qual o mecanismo que promove tal disparidade. O fenômeno ocorre com diferentes abrasivos e granulometrias e com diferentes geometrias e dimensões de ferramentas.

Uma variável não testada é o material da ferramenta, que talvez possa exercer alguma influência. Além desse fator, parece claro que devem ser considerada a natureza do material (cristalinidade, dureza e tenacidade à fratura), natureza do abrasivo (dureza e tenacidade à fratura), granulometria do abrasivo, geometria e dimensões da ferramenta.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos experimentos realizados revelam que a velocidade de corte sofre alteração com o quadrado da profundidade de usinagem.

A velocidade de usinagem do vidro foi maior que a verificada nas usinagens com o quartzo.

As usinagens realizadas com o abrasivo B_4C mostraram-se com uma velocidade maior que as usinagens realizadas com o abrasivo Al_2O_3 , tanto para o vidro quanto para o quartzo.

O quartzo, quando usinado com B_4C , apresentou uma topografia diferente das demais condições de usinagem.

Agradecimentos

Os autores agradecem o IFM – Instituto Fábrica do Milênio pelo suporte financeiro. Os autores Flávia C. Miranda e Leandro Jacomine agradecem ao CNPq pelas bolsas concedidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 MIRANDA, F.C., COSTA BRASIL, J.F., GUZZO, P.L., RASLAN, A.A. **Influência do abrasivo na velocidade de usinagem por abrasão ultrasonora**, a ser apresentado no COBEF 2005.
- 2 GUZZO, P.L., SHINOHARA, A. H., RASLAN, A.A. A comparative study on ultrasonic machining of hard and brittle materials. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. XXVI, n. 1, p.56-61, January-march 2004.
- 3 CHIANG, Y.M., BIRNIE III, D., KINGERY, W.D. Physical Ceramics. The MIT Serie in Materials Science and Engeneering, Ed. J. Wiley and Sons, Inc., New York, USA, 522p.
- 4 SOUNDARARAJAN, V., RADHAKRISHNAN, V.A. An Study on the Mechanisms Involved in Ultrasonic Machining. **Int. J. Machine Tool Des. Res.**, v. 26, p. 307-321, 1896.

RELATION BETWEEN THE ABRASIVE HARDNESS AND THE SURFACE QUALITY OF MATERIALS MACHINED BY ULTRASONIC ABRASION¹

*Flávia Cavalcanti Miranda*²
*Leandro Jacomine*³
*Alberto Arnaldo Raslan*⁴

Abstract

Ultrasonic machining is a process for shaping hard and brittle materials, such as glasses, quartz, alumina, lithium fluoride, etc. This paper discusses the effect of the abrasive hardness on the surfaces machined at workpieces of glass and quartz ultrasonic machined. The experiments were carried out in a stationary Sonic-Mill machine with a power output of 1790 W and kept the parameters amplitude and frequency of ultrasonic vibration, static load applied on the horn, tool geometry, concentration and size of abrasive particles. Alumina (Al_2O_3) and boron carbide (B_4C) were used as abrasive. The cutting tool having a solid hexagonal cross section in length was manufactured in stainless steel by conventional machining processes. It was found that the rates of material removal of glass are high-grade when compared with quartz. The machined surface topographies were characterized by surface profilometry and scanning electron microscopy. A significative difference between the surface of the quartz machined with B_4C abrasive was observed when compared with others materials,

Key-words: Ultrasonic machining; Surface quality; Brittle materials; Abrasives.

1 Contribution to be presented in 60th Annual Congress, July 25-28, 2005, Centro de Convenções e Feiras, Belo Horizonte - MG - Brasil.

2 Graduating student, L Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) - Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

3 Doctor's degree, LTM / FEMEC / U