

INFLUÊNCIA DA DUREZA DO ABRASIVO NA VELOCIDADE DE USINAGEM POR ABRASÃO ULTRASONORA

Flávia Cavalcanti Miranda (cuia@mec.ufu.br)**

Jorge Francisco Costa Brasil (costabrasil@mec.ufu.br)**

Pedro Luiz Guzzo (pguzzo@ufpe.br) ***

Alberto Arnaldo Raslan (ltm-raslan@ufu.br)**

**Laboratório de Tribologia e Materiais - Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia

Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1R - Uberlândia/MG

CEP: 38400-902

***Departamento de Engenharia de Minas - Universidade Federal de Pernambuco

Cidade Universitária – Recife / PE - CEP:50740-530

Resumo. *A usinagem por abrasão ultrasonora é particularmente aplicável na conformação de materiais duros, frágeis e isolantes elétricos, como os vidros, quartzo, silício, fluoreto de lítio, alumina, zircônia, etc. As variáveis do processo são, principalmente, a potência, a amplitude e a frequência de operação do equipamento, a geometria do sonotrodo, o material da ferramenta, a granulometria e a concentração do fluido abrasivo. Neste trabalho, o objetivo foi investigar a influência da dureza do abrasivo na velocidade de corte de materiais com diferentes durezas. Como abrasivos, foram usados alumina (Al_2O_3), carbetto de silício (SiC) e carbetto de boro (B_4C), com granulometria de $25\ \mu m$ (400 mesh) com suspensão forçada em água na mesma proporção. Os demais parâmetros de usinagem foram mantidos fixos. Os materiais usinados foram lâminas de vidro, quartzo e alumina. Os ensaios foram realizados em uma máquina com potência de entrada de 1790 W e com o uso de uma ferramenta tubular de aço inoxidável austenítico. As velocidades de corte foram medidas com o auxílio de relógio comparador e cronômetro. Os resultados obtidos mostram que a velocidade de usinagem varia com a dureza do abrasivo. Não se observou, exceto na usinagem de alumina com B_4C , variação da velocidade de corte com a profundidade usinada.*

Palavra-chave: *usinagem, abrasão ultrasonora, dureza, abrasivos.*

INTRODUÇÃO

A técnica de usinagem por abrasão ultrasonora (USM) é especialmente adequada ao processamento mecânico de materiais duros, frágeis e isolantes elétricos, onde os processos tradicionais de usinagem não são aplicáveis. Além disso, os materiais duros e frágeis são geralmente rígidos e apresentam grande resistência mecânica à compressão. Esses materiais podem ser classificados em minerais, cerâmicas policristalinas, sólidos monocristalinos e vidros amorfos. As aplicações são amplas e ocupam um grande espaço na conformação de dispositivos usados na vida cotidiana. As cerâmicas avançadas, por exemplo, são usadas na fabricação de componentes elétricos, eletrônicos, magnéticos, mecânicos e óticos. Algumas propriedades mecânicas de materiais usináveis por abrasão ultrasonora são dadas na tabela 1. Estes dados foram coletados de Guzzo et al. ⁽¹⁾ e de diversos outros trabalhos.

Tabela 1. Tenacidade à fratura e dureza dos materiais usados⁽¹⁾.

Material	Vidro	Alumina	Quartzo
Dureza (H, GPa)	5,8 ± 0,5	14 - 20	15 ± 1,00
H _{média} (GPa)	5,8	17	15
Tenacidade à fratura (MPa.m ^{1/2})	0,48 ± 0,05	3 - 5	0,53 ± 0,01

São muitas as variáveis inerentes ao processo de USM: frequência e amplitude de vibração, carga estática aplicada sobre o sonotrodo, geometria do sonotrodo, material e geometria da ferramenta, tipo e granulometria do abrasivo, concentração do abrasivo no fluido diluente, fluxo da mistura abrasiva e natureza do material a ser usinado. O controle adequado desses parâmetros permite a obtenção de peças com geometrias complexas, com boas tolerâncias dimensionais, preservação da integridade da superfície usinada e bom acabamento superficial.

De acordo com Soundararajan e Radhakrishnan⁽²⁾, 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 onde atua, predominantemente, o micromecanismo de remoção de matéria por microlascamento⁽³⁾. Consegue-se, desta forma, reproduzir na peça a geometria da ferramenta.

Como abrasivos são empregados a alumina (Al₂O₃), o carbetto de silício (SiC) e o carbetto de boro (B₄C), cujas características mecânicas são dadas na tabela 2 ⁽⁴⁻⁸⁾.

Sabe-se que a granulometria do abrasivo influencia tanto a velocidade de corte quanto a qualidade superficial. Abrasivos mais grosseiros produzem maiores velocidades de corte mas, em compensação, uma pior qualidade superficial⁽⁹⁾. Em termos de custo, o B₄C é mais caro. Mas, segundo Kaczmarek et al.⁽¹⁰⁾, sua durabilidade é maior.

Tabela 2. Dureza de alguns abrasivos⁽⁴⁻⁸⁾.

Abrasivo	Alumina (Al ₂ O ₃)	Carbetto de Silício (SiC)	Carbetto de Boro (B ₄ C)
Dureza (H, GPa)	9 - 30	14 - 60	30 - 70
H _{média} (GPa)	19,5	37	50

A ferramenta de usinagem é, também, passível de desgaste pela ação de partículas abrasivas. Como se deseja, obviamente, a preservação da integridade da ferramenta, recomenda-se o emprego de materiais mais resistentes ao desgaste na confecção das mesmas. Komaraiah e Reddy⁽¹¹⁾ obtiveram bons resultados usando super-ligas, aços-prata e aço inoxidável austenítico. O aço inoxidável possui a vantagem de ser facilmente encontrado no mercado.

Em um estudo comparativo realizado por Guzzo et al.⁽¹²⁾, foram analisados resultados de usinagens por abrasão ultrasonora de vidro, fluoreto de lítio, ferrite, quartzo, zircônia e alumina. Usou-se como abrasivo o SiC de granulometria 600 mesh. Foi observado que a velocidade de corte diminuía com o aumento da profundidade usinada para a alumina e zircônia e, menos acentuadamente, para o quartzo. Nos outros materiais, a velocidade manteve-se constante. Com

base nas propriedades mecânicas desses materiais, não foi encontrada uma explicação clara para essa diferença de comportamento. Dentre esses materiais observou-se que os que possuem as maiores durezas foram os que apresentaram variação na velocidade de corte. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo comparativo do desempenho da usinagem por abrasão ultrasonora de materiais com diferentes durezas utilizando abrasivos de diferentes durezas.

METODOLOGIA

Como equipamento de usinagem, foi usada uma máquina Sonic-Mill com potência de entrada de 1790 W e frequência de vibração de 20 kHz. Como parâmetros de usinagem, utilizou-se uma carga estática aplicada de 25 N a um sonotrodo cônico de titânio, amplitude de vibração de 45 μm pico a pico, caracterizando um regime de acabamento fino. A ferramenta de usinagem foi confeccionada em aço inoxidável austenítico, com formato cilíndrico tubular com diâmetro interno de 5,7 mm e externo de 7mm. Como abrasivos foram usados Al_2O_3 , SiC e B_4C , com granulometria de 25 μm (400 *mesh*), com suspensão forçada em água na proporção de 2,5/1, em volume. Todas as soluções foram preparadas com abrasivos novos. A solução, mantida em suspensão por um misturador mecânico, era bombeada continuamente de um reservatório e conduzida até a interface ferramenta/amostra por duas mangueiras com diâmetros internos de 5 mm. Após cada 20s a ferramenta era suspensa para que houvesse uma reciclagem mais eficaz dos abrasivos na interface, uma vez que essa alimentação era externa. Blocos de alumina, vidro e quartzo com espessuras aproximadas de 10 mm, 9 mm e 6 mm, respectivamente, foram empregados nos ensaios de usinagem.

Em cada um dos blocos foram realizadas nove testes de usinagens, ou seja, pelo menos três testes por abrasivo por amostra. Os tempos foram determinados com o uso de cronômetro digital. As profundidades parciais (p) foram determinadas usando-se relógio comparador. Os tempos (t) foram determinados em intervalos de usinagem de 100 μm . Obteve-se, desta forma, a velocidade média de corte (v_c):

$$v_c = p/t \quad (1)$$

O desgaste da ferramenta (W) foi determinado pela diferença no comprimento da ferramenta, avaliado com relógio comparador. A ponta da ferramenta era posicionada na superfície da amostra a ser usinada e determinado um ponto de referencia no relógio comparador. Após a usinagem, a ponta da ferramenta era reposicionada em um local da superfície ainda não usinada. A diferença observada em relação ao ponto de referencia no relógio comparador foi admitida como sendo relativa ao desgaste da ferramenta. Foi considerado o comprimento total usinado, de tal modo que:

$$W = \text{desgaste da ferramenta} / \text{comprimento total usinado} \quad (2)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 3 tem-se os valores médios da velocidade média de corte (v_c) e do desgaste da ferramenta (W) relacionados à usinagem do vidro, com os três tipos de abrasivos empregados.

Tabela 3. Velocidade média de corte (v_c) e desgaste da ferramenta (W) nas usinagens do vidro.

Abrasivo	Al_2O_3	SiC	B_4C
v_c , $\mu\text{m/s}$	$33,3 \pm 4,4$	$25,6 \pm 3,2$	$24,6 \pm 1,5$
W , $\mu\text{m/mm}$	$23,3 \pm 6,2$	$16,6 \pm 6,9$	$12,2 \pm 4,0$

Nota-se que o desgaste (W) da ferramenta possui uma tendência, tendo em vista o desvio padrão elevado, de seguir uma ordem inversa à dureza dos abrasivos:

$$W_{B_4C} < W_{SiC} < W_{Al_2O_3} \quad (3)$$

e, em relação à velocidade de corte (v_c), tem-se

$$(v_c)_{B_4C, SiC} < (v_c)_{Al_2O_3} \quad (4)$$

O material da ferramenta, aço inoxidável austenítico, é relativamente macio e tenaz, enquanto o vidro é relativamente duro e muito frágil. Logo, os mecanismos de desgaste atuantes são distintos. No vidro predomina o mecanismo de microlascamento. No aço inoxidável, os mecanismos são de microcorte e microsulcamento⁽¹³⁾. O fato do desgaste da ferramenta ser menor com o B_4C pode estar relacionado com uma maior taxa de encruamento do aço inoxidável, o que aumentaria a sua resistência ao desgaste⁽¹³⁾. Em relação à v_c , o abrasivo de menor dureza (Al_2O_3) deve ter menor capacidade abrasiva que os outros (B_4C e SiC). Porém, foi o que produziu maior v_c . Esse resultado, aparentemente contraditório, sugere que, além da dureza, outras propriedades do abrasivo como a morfologia da partícula e a tenacidade à fratura, podem interferir na capacidade de abrasão. Além disso deve-se, também, considerar a dureza relativa do sistema tribológico, i.e, entre material e abrasivo.

Na figura 1 é mostrado o comportamento da velocidade de corte em função da profundidade usinada. Nos três casos, a velocidade de corte se mantém praticamente constante com a variação da profundidade, em coerência com os resultados de Guzzo et al.⁽¹²⁾. Pode-se deduzir que, para profundidades inferiores a 10 mm, não há variação da velocidade de corte com a profundidade usinada.

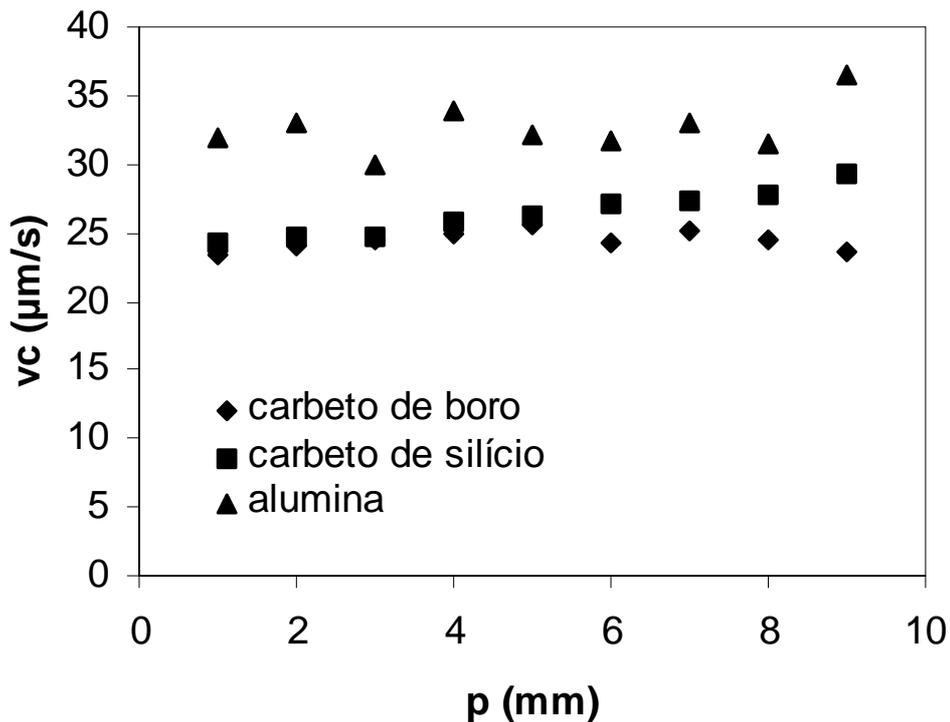


Figura 1. Velocidade média de corte (v_c) do vidro em função da profundidade usinada (p).

Os valores da velocidade média de corte (v_c) e desgaste da ferramenta (W) para as usinagens realizadas com o quartzo são apresentados na tabela 4. Nota-se que o desgaste da ferramenta (W) continua sendo maior com o abrasivo Al_2O_3 , ou seja :

$$W_{\text{SiC}} < W_{\text{B}_4\text{C}} < W_{\text{Al}_2\text{O}_3}, \quad (5)$$

Tabela 4. Velocidade média de corte (v_c) e desgaste da ferramenta (W) nas usinagens do quartzo.

Abrasivo	Al_2O_3	SiC	B_4C
$v_c, \mu\text{m/s}$	$16,1 \pm 3,0$	$27,3 \pm 1,3$	$23,5 \pm 2,8$
$W, \mu\text{m/mm}$	$70,0 \pm 1,0$	$30,0 \pm 7,7$	$39,2 \pm 3,5$

A variação velocidade de corte com os três abrasivos é mostrada na figura 2. Da mesma forma que no vidro, a velocidade de corte não foi significativamente alterada com a profundidade usinada. Nos experimentos mostrados por Guzzo et al.⁽¹²⁾ para a usinagem do quartzo, foi observado que a velocidade de corte diminui com o aumento da profundidade usinada. Essa divergência de comportamento pode ser atribuída à granulometria dos abrasivos empregados no presente trabalho (400 mesh) em relação à granulometria mais fina usada por Guzzo et al.⁽¹²⁾, ou seja, SiC com 600 mesh. É de se esperar que o abrasivo mais grosseiro seja mais eficaz na remoção de matéria da peça usinada. Uma outra justificativa consiste na diferença entre as geometrias das ferramentas uma vez que no estudo anterior foi utilizado uma ferramenta de seção retangular de $8,2 \times 1,4 \text{ mm}^2$.

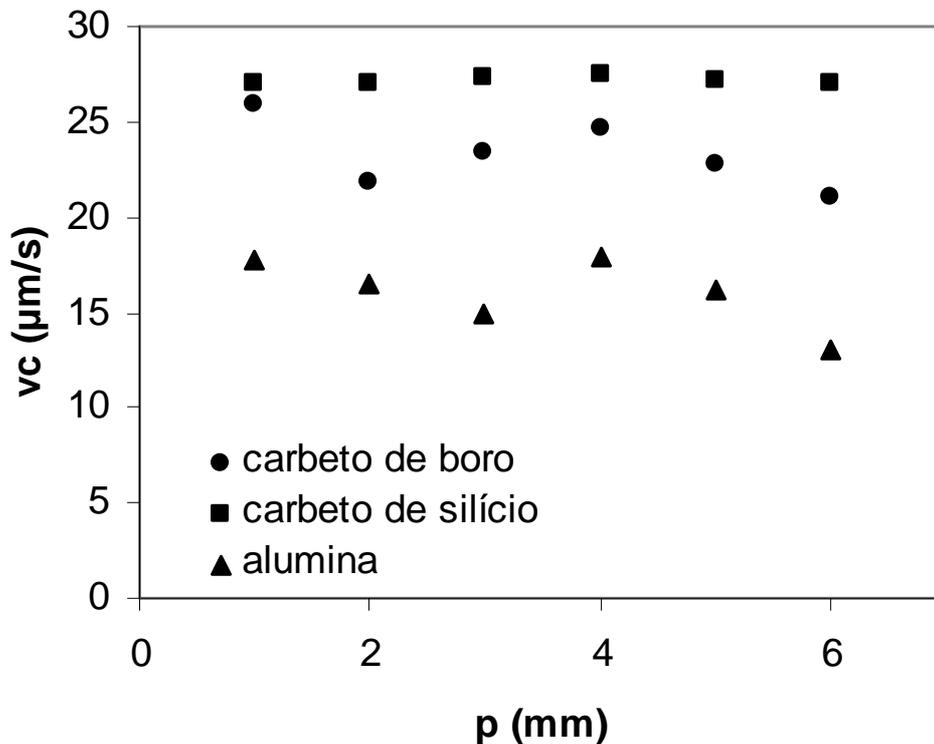


Figura 2. Velocidade média de corte (v_c) do quartzo em função da profundidade usinada (p)

Os valores da velocidade média de corte (v_c) e desgaste da ferramenta (W) para as usinagens realizadas da alumina são apresentados na tabela 5. O valor de v_c média para o B_4C não foi determinado, tendo em vista a variação do mesmo com a profundidade usinada. Desta forma, o resultado é apresentado somente na curva da figura 4. Nota-se que há uma inversão no desgaste da ferramenta (W), quando se compara com o comportamento observado para o vidro e o quartzo, ou seja:

$$W_{\text{Al}_2\text{O}_3} < W_{\text{B}_4\text{C}} < W_{\text{SiC}} \quad (6)$$

Tabela 5. Velocidade média de corte (v_c) e desgaste da ferramenta (W) nas usinagens da alumina.

Abrasivo	Al_2O_3	SiC	B_4C
$v_c, \mu m/s$	$17,0 \pm 7,2$	$17,8 \pm 2,2$	-
$W, \mu m/mm$	$49,0 \pm 0,5$	$76,6 \pm 6,0$	$64,0 \pm 4,0$

- não determinado

A variação da velocidade de usinagem em função da profundidade usinada do bloco de alumina está apresentada na figura 4. Observa-se que a usinagem da alumina, utilizando Al_2O_3 e SiC como abrasivo, processou-se de forma constante, sem alteração com a profundidade usinada. Com o B_4C , a velocidade se mostrou influenciada pela profundidade usinada. Essa mesma variação foi observada para zircônia e alumina por Guzzo et al.⁽¹²⁾, usando SiC de 600 *mesh* como abrasivo.

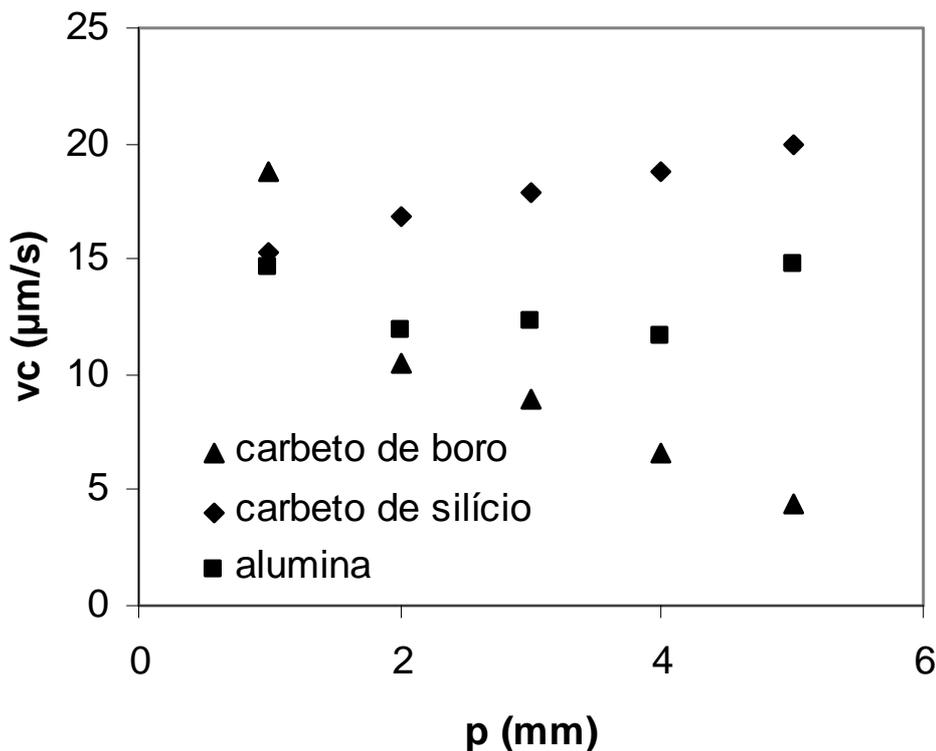


Figura 4. Velocidade média de corte (v_c) da alumina em função da profundidade usinada (p).

De um modo geral, observou-se que as velocidades de corte variaram para os três materiais testados obedecendo a seguinte seqüência:

$$(v_c)_{\text{vidro}} > (v_c)_{\text{quartzo}} > (v_c)_{\text{alumina}} \quad (7)$$

Com base nos dados de dureza e tenacidade da tabela 1, este resultado pode ser considerado lógico. Relativamente, o vidro é macio e frágil. O quartzo é frágil e duro. Essa dureza dificultaria o processo de remoção de matéria pelas partículas abrasivas. Além disso, deve-se considerar as diferentes morfologias do vidro (amorfo) e do quartzo (cristalino), que possuem mecanismos de propagação de trincas distintos. No vidro as trincas se propagam de forma aleatória. No quartzo a propagação ocorre em direções cristalinas. Logo, a remoção de matéria no vidro é facilitada. A alumina é dura e relativamente tenaz. Essas duas propriedades se somariam no sentido de dificultar o processo.

Os resultados encontrados na usinagem da alumina indicam a impossibilidade de explicar a variação da v_c com a profundidade usinada pela natureza do abrasivo. Usina-se a alumina com um abrasivo macio (Al_2O_3) e com SiC sem variação de v_c , mas não se consegue o mesmo resultado com um abrasivo mais duro (B_4C). É possível que a tenacidade à fratura do abrasivo também seja uma propriedade a ser considerada. Parece existir uma relação entre a dureza e tenacidade à fratura do abrasivo e a dureza e tenacidade à fratura do material usinado. Neste sentido, determinou-se a dureza relativa (H_R), dada pela relação entre as durezas médias do material ($H_{material}$) e do abrasivo ($H_{abrasivo}$), ou seja:

$$H_R = H_{material} / H_{abrasivo} \quad (8)$$

cujos resultados são apresentados na tabela 6. As relações entre H_R com v_c e W são dadas pelas figuras 6 e 7.

Tabela 6 – Relação entre as durezas médias dos materiais usinados e dos abrasivos.

	Vidro	Quartzo	Alumina
$H_{abrasivo}$	H_R	H_R	H_R
Al_2O_3	0,30	0,77	0,87
SiC	0,16	0,41	0,46
B_4C	0,12	0,30	0,34

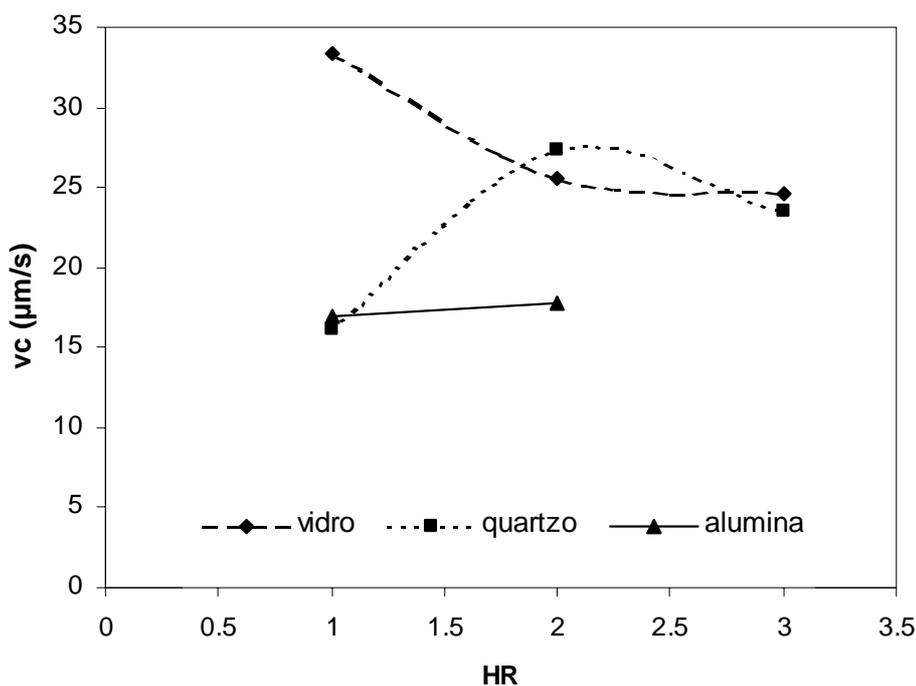


Figura 6 – Relação entre a dureza relativa (H_R) e a velocidade de corte (v_c).

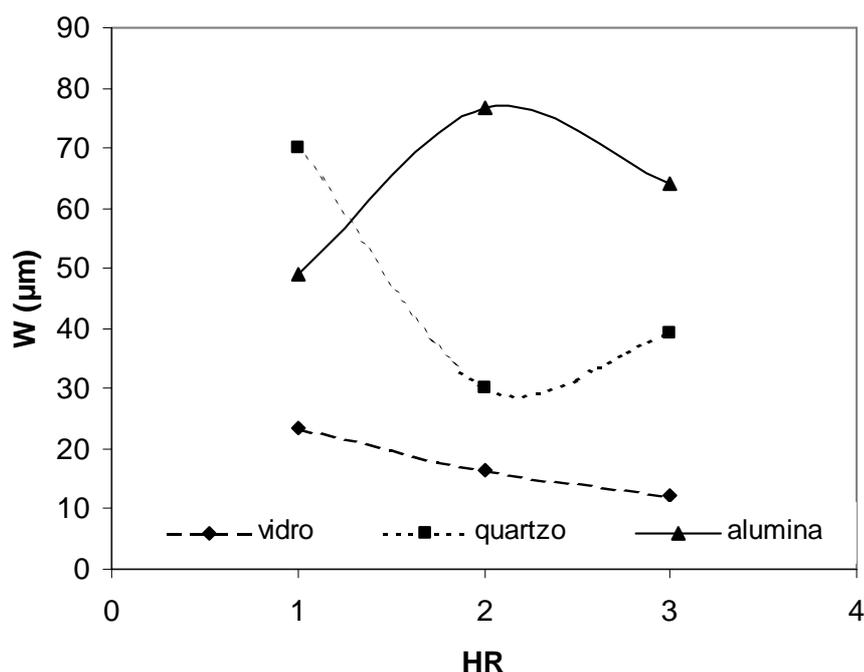


Figura 7 – Relação entre a dureza relativa (H_R) e o desgaste da ferramenta (W)

Observa-se, nas figuras 6 e 7, que somente os resultados obtidos com a usinagem do vidro mostram uma correlação clara com H_R , tanto no que diz respeito a v_c quanto a W , que decrescem com o aumento de H_R . Não se observou, ainda, com exceção do quartzo, a existência de uma correlação entre a dureza do abrasivo e a dureza / tenacidade à fratura dos materiais usinados. As maiores velocidades de corte foram obtidas com o abrasivo mais macio (Al_2O_3) na usinagem de vidro (macio, frágil) e alumina (dura, tenaz).

CONCLUSÕES

Com base em resultados obtidos com a usinagem por abrasão ultrasonora de três materiais com características distintas (vidro, quartzo e alumina) e utilizando três tipos de abrasivos (B_4C , SiC e Al_2O_3), pode-se concluir que:

- a velocidade média de corte varia com a dureza do abrasivo para um mesmo material usinado. Para o vidro e alumina, a velocidade é maior com abrasivo mais macio;
- o desgaste da ferramenta varia com o tipo de abrasivo e com a natureza do material usinado. Para o vidro, o menor desgaste foi obtido com abrasivo mais duro (B_4C) e um desgaste maior foi observado com abrasivo mais macio (Al_2O_3). Essa relação não se repete para quartzo e alumina;
- a velocidade de corte não varia significativamente com a profundidade usinada, exceto para alumina usinada com B_4C ;
- para o vidro, v_c e W decrescem com o aumento da dureza relativa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Fábrica do Milênio – IFM pelo suporte financeiro. Os autores Flávia C. Miranda e Jorge F. Costa Brasil agradecem o CNPq pelas bolsas de iniciação científica e Pedro L. Guzzo agradece o programa PROFIX/CNPq pela bolsa de pesquisador.

REFERÊNCIAS

1. GUZZO, P.L.; JACOMINE, L. and .DE MELLO, J.D.B. Evaluation of hardness and fracture toughness in natural quartz crystals by indentation experiments. **Proc. Of the 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering**, vol. 2, Uberlândia, Brasil, p. 155-161, 2001.
2. SOUNDARARAJAN, V. and RADHAKRISHNAN, V. A. An Study on the mechanisms involved in ultrasonic machining. **Int. J. Machine Tool Des. Res.**, v.26, p. 307-321, 1986..
3. ZUM GAHR, K.H. Microstructure and wear of materials. Elsevier Sc. Pub., Amsterdam, Netherlands, 554p., 1987
4. GISSLER , W. et al. Mixed phase nanocrystalline boron nitride films preparation and characterization. **Thin Solid Films**, v. 199, p. 115. 1991.
5. KOLLECK, H. Die Bedeutung von Phasengleichgewichten bei der Entwicklung verschleissfester Werkstoffe. **Chemiker Zeitung** 106, 5. p. 216, 1982
6. LOFFLER, F. **Eigenschaften von keramischen Hartstoffschichten auf Silicium- und Aluminiumbasis**. Fortschritt-Ber. VDI Reihe 5 Nr. 180. Dusseldorf VDI-Verlag 1990. p. 23
7. HABIG, K. H. Verschleiss-Schutzschichten – Entwicklungstendenzen zur Optimierung von Eigenschaften und Verfahren. **Metall** **39**. 10. p. 915. 1985
8. FRIEDRICH, C; BERG, G; BROSZEIT, E; BERGER, C. **Datensammlung zu Hartstoffeigenschaften**. Mat.-wiss. U. Werkstoffech. v. 28. p. 59-76. 1997.
9. GUZZO, P.L; RASLAN, A.A; DE MELLO, J. D. B. Ultrasonic abrasion of quartz crystals. **Wear**, n.255, p. 67-77. 2003.
10. KACZMAREK, J. Et al. Ultrasonic grinding economics. Journal of Engineering for industry, p. 449-454, 1966.
11. KOMARAIHAH, M. and REDDY, P.N. Relative performance of tool materials in ultrasonic machining. **Wear**, v.161, p. 1-10, 1991.
12. GUZZO, P.L; SHINOHARA, A.H. and 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. 26, n. 1, pp. 56 – 61. 2004.
13. PRATT, S.; COSTA, H. L.; RASLAN, A. A. Desgaste de ferramentas de aço ABNT 1045 usadas na usinagem por abrasão ultrasonora. **Maquinas e Metais**, n. 411, p.94-104. 2000.

EFFECT OF THE ABRASIVE HARDNESS ON THE CUTTING RATE OF THE ULTRASONIC MACHINING

Flávia Cavalcanti Miranda (cuia@mec.ufu.br)**

Jorge Francisco Costa Brasil (costabrasil@mec.ufu.br)**

Pedro Luiz Guzzo (pguzzo@ufpe.br) ***

Alberto Arnaldo Raslan (ltm-raslan@ufu.br)**

**Laboratório de Tribologia e Materiais - Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia

Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1R - Uberlândia/MG

CEP: 38400-902

***Departamento de Engenharia de Minas - Universidade Federal de Pernambuco

Cidade Universitária – Recife / PE - CEP:50740-530

Abstract. *Ultrasonic machining is a suitable process for shaping hard and brittle and dielectric solids such as glasses, ceramics, quartz and silicon. Material removal rate is influenced by various operational parameters such as amplitude and frequency of ultrasonic oscillations, static load applied on the sonotrode, tool material and design, concentration and size of abrasive particles. This study investigates the effect of the abrasive hardness on the cutting rate and tool wear. For this purpose, alumina, silicon carbide and boron carbide with mean grain size of 25 μm were used as abrasive grits to machine sheet glass, quartz crystal and polycrystalline alumina. The tests were carried out in a 1790 W stationary machine using a cylindrical cutting tool made of stainless steel. The cutting rate was determined by measuring the time expended to machine a given depth in the workpiece material. It was found that the cutting rate depends on the workpiece material. It was not found a clear relationship between the cutting rate and the tool wear with the abrasive hardness. The cutting rate and the tool wear were tentatively discussed taking into account the relative hardness of the workpiece/abrasive system. Further attempts are required to clarify this point.*

Keywords. *machining, ultrasonic machining, hardness, abrasive.*