

USINABILIDADE DO SILÍCIO POR ABRASÃO ULTRASONORA E ELETROEROSÃO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA

Jorge Francisco Costa Brasil ¹

Leandro Jacomine ²

Luciano José Arantes ³

Alberto Arnaldo Raslan ⁴

Resumo

O silício elementar é utilizado na produção de silicões, ligas metálicas e semicondutores. Os semicondutores são aplicados na fabricação de transistores, diodos e células solares. Em termos de propriedades mecânicas, o silício caracteriza-se pela fragilidade, o que torna difícil a sua conformação mecânica. Este trabalho tem por objetivo avaliar a usinabilidade do silício usando técnicas não-convencionais de usinagem por abrasão ultrasonora e por descargas elétricas. A partir de um bloco de silício, lâminas foram obtidas por corte com disco abrasivo. A usinagem por abrasão ultrasonora foi feita em uma máquina Sonic-Mill com potência de 1790 W e frequência de vibração de 20 kHz. A usinagem por eletroerosão foi realizada em máquina Engemac 440 NC. Em ambos os processos, os parâmetros foram otimizados para obter as melhores condições de acabamento e integridade superficial. Para tal, as amostras foram analisadas por interferometria laser e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostram a viabilidade do uso desses processos na conformação de silício, com a vantagem de obter peças com geometrias complexas, diferentemente do processo de corte com disco.

Palavras-chave: Abrasão; Eletroerosão; Silício.

COMPARATIVE STUDY OF THE MACHINABILITY OF SILICON MACHINED BY ULTRASONIC ABRASION AND ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Abstract

The elementary silicon is used in the production of metallic alloys and semiconductors. These are applied in the manufacture of transistors, diodes and solar cells. In terms of mechanical properties, the silicon is characterized for brittleness, what it becomes difficult to be mechanical conformed. The objective of this work was to evaluate the machinability of silicon using non-conventional machining techniques as ultrasonic abrasion and electron discharges. From a Silicon block, blades were cut with an abrasion disc. The ultrasonic machining was made in a Sonic-Mill machine with power of 1790 W and vibration frequency of 20 kHz. The electrical discharge machining was carried through in an Engemac 440 NC machine. In both processes, the parameters had been optimized to get the best conditions of finishing and superficial integrity. For such, the samples had been analyzed by laser interferometry and scanning electronic microscopy. The results show the viability of the use of these processes in the silicon machining; with the advantage of getting pieces with complex geometry, differently of the disk cut process.

Key words: Ultrasonic abrasion; Electro erosion; Silicon.

I INTRODUÇÃO

O silício é um sólido cinza-azulado, dotado de brilho metálico e de extrema fragilidade. A sua estrutura cristalina é semelhante à do diamante, mostra uma apreciável condutividade

elétrica, que aumenta com o incremento da temperatura, comportamento este típico dos semicondutores. O pó de sílica é moderadamente tóxico e irritante.⁽¹⁻²⁾

O silício é o segundo elemento mais

¹ Engenheiro mecânico formado pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

² Mestre em engenharia mecânica pela UFU

³ Mestre em engenharia mecânica pela UFU

⁴ Professor titular da UFU

abundante na crosta terrestre, ocorrendo em rochas como silicatos e como sílica na areia. Ele não ocorre livre na natureza. A descoberta do silício é atribuída a Jacob Berzelius que, em 1824, preparando o silício amorfo e purificando-o com sucessivas lavagens para retirar os fluorsilicatos (impurezas), isolou o elemento e deu-lhe o nome de silício.⁽²⁻³⁾ A produção em escala é obtida pela redução da sílica mediante o carbono a uma temperatura de 2200°C. Como o quartzo, a areia e todas as outras substâncias usualmente empregadas para a produção do silício contêm impurezas metálicas (sobretudo ferro e alumínio), o silício produzido tem pureza por volta de 98%. A forma de se elevar a pureza consiste no refino por zona do silício metalúrgico ou pela formação de um monocristal a partir de um banho de fundição.⁽¹⁻²⁾

Várias são as aplicações do Silício, citando-se especialmente a sua utilização em ligas metálicas, fabricação de silicone, construção civil, material refratário, cerâmica e esmaltes (como silicato), abrasivos (carbeto de silício), laser, semicondutores, porcelana, cimento, baterias solares, transistores, células fotovoltaicas, graxas, como componente essencial para vidros em geral (silicatos); componente do aço (carbeto de silício, SiC); microprocessadores de computadores.

O silício pode ser processado por usinagem por abrasão ultrasonora, que é um dos métodos mais indicados para a usinagem de materiais muito frágeis, condutores ou não de eletricidade. Porém, alguns pesquisadores têm investigado a possibilidade de se utilizar o processo de usinagem por descargas elétricas no silício, especialmente a microusinagem, pois esse processo permitiria a confecção de geometrias mais complexas que aquelas obtidas mediante o uso do ultrassom.⁽³⁻⁴⁾

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a possibilidade do emprego de dois processos não tradicionais de usinagem no processamento de Silício. O primeiro, de usinagem por abrasão ultrasonora e, o segundo, de usinagem por descargas elétricas ou eletroerosão. A usinagem de materiais frágeis e duros por ultrassom já é bem estudada. Porém, a eletroerosão ainda não tem sido utilizada na indústria por não se conhecer quais os parâmetros ideais que possam permitir esse tipo de operação.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram divididos em duas partes. A primeira, com usinagem por ultrassom e a segunda com usinagem por descargas elétricas. Em ambos os casos foram usadas lâminas de silício obtidas de um bloco. O corte para obtenção de lâminas com espessura da ordem de 5 mm, foi feito com disco de corte diamantado. Foram usinados também, como material comparativo, lâminas de vidro sodo-cálcico.

O equipamento usado foi uma máquina Sonic-Mill com potência de 1790 Watts. A ferramenta de usinagem foi confeccionada em aço inoxidável com diâmetro de 4 mm. Como parâmetros de usinagem, utilizou-se carga estática aplicada ao sonotrodo de 25 N, amplitude de vibração de 45 μ m pico a pico, frequência de 20 kHz e carbeto de silício como abrasivo, com granulometria 600 mesh, diluído em água na proporção volumétrica de 2,5/1. Estes parâmetros caracterizaram o regime de usinagem como sendo de acabamento fino. A profundidade de usinagem foi de 5 mm, aproximadamente. Foram medidos os tempos de usinagem [s] e as velocidades de usinagem [mm/s].

As lâminas de silício foram também usinadas pelo processo de usinagem por descargas elétricas ou eletroerosão em um equipamento Engemac 440 NC. As ferramentas foram confeccionadas em cobre eletrolítico, com formato cilíndrico, maciço e com diâmetro de 4 mm. Esta geometria foi a mesma da ferramenta usada na usinagem por abrasão ultrasonora. Os parâmetros utilizados foram de baixíssima potência e com os menores tempos de descargas possíveis, procurando obter-se um bom acabamento superficial: Ts (potência) igual a 2, em uma escala de 0 à 11; Ton (tempo de descarga) igual a 10 μ s e afastamento da ferramenta a cada 20 [s] com intervalo de 1 [s]. Inicialmente, detectou-se problemas de condutividade elétrica, evidenciada pela baixíssima velocidade de usinagem e, em alguns casos, quebra da lâmina de silício. Isso ocorreu devido à pressão de contato da ferramenta com a lâmina, que ocorre sempre que não há boa condutividade. Como se trata de Silício, muito frágil, a fratura ocorre com facilidade. A solução foi efetuar o recobrimento das lâminas de silício com ouro, com alguns nanômetros de espessura. Foi usada deposição por plasma em equipamento Emitech K550. Com isso, melhorou-se a condutividade elétrica da amostra. Foram tomados os tempos de cada um de 3 ensaios realizados, até ser atingida a profundidade de 1 mm. Esta foi a máxima profundidade que o processo permitiu alcançar.

Foram realizadas análises de topografia de superfície através de microscopia eletrônica de varredura, em equipamento Zeiss Leo 940, e interferometria laser, com equipamento UBM Microfocus Expert. Nas análises de interferometria laser tridimensional, foi utilizada densidade de pontos na direção "x" igual a 1000 pontos por milímetro e na direção "y" igual a 100 pontos por mm. Com as imagens das topografias obtidas, calculou-se a rugosidade média (R_a).

Tabela 1. Tempos de usinagem no processo de usinagem por abrasão ultrasonora (silício e vidro) e eletroerosão (silício).

Abrasão Ultrasonora		
	Silício	Vidro
Tempo (média) [min]	2,7	1,6
Desvio Padrão	0,58	0,35
Usinagem por Descargas Elétricas		
	Silício	Silício (Au)
Tempo (média) [min]	85	16
Desvio Padrão	8,3	2,1

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para os tempos de usinagem nos processos de usinagem por abrasão ultrasonora e eletroerosão são mostrados na Tabela 1.

A usinagem do silício por abrasão ultrasonora foi muito rápida, mostrando o quanto esse processo é eficiente na usinagem de materiais duros e frágeis. As micro-partículas de abrasivos são

marteladas à frequência ultrasônica contra a superfície do material. As trincas são geradas e se propagam rapidamente e geram microlascamentos do material da peça. O silício se encaixa no perfil de material ideal para atuação deste mecanismo de desgaste abrasivo. A usinagem do vidro foi aproximadamente 40% mais rápida que a usinagem do silício, com mecanismo de desgaste similar ao do silício.

No processo de usinagem por descargas elétricas, os tempos foram muito maiores. Nesse caso, foram testadas amostras de silício sem revestimento e com revestimento de ouro. Sem o revestimento, as descargas são forçadas a passarem pela amostra de silício, que é um material semiconductor. Contudo, a boa condutividade elétrica da peça sob usinagem é um fator decisivo para que descargas potentes ocorram, removendo material com maiores velocidades.⁽⁵⁾ Em materiais que não apresentam boa condutividade as descargas se dispersam sobre a superfície da lâmina, não se concentrando na ponta da ferramenta. Dessa forma, não ocorre retirada de material e, em consequência, não há usinagem.

Com o revestimento de ouro, um excelente condutor elétrico, as descargas tornam-se mais potentes e concentradas na ponta do eletrodo. Torna-se possível a ocorrência de fusão e evaporação do material da peça. Com a passagem do fluido dielétrico pela interface, uma parte deste material é removida, caracterizando o processo de usinagem. Naturalmente, o processo de arrancamento de material é bem menos eficiente que na abrasão, pois nem todo material é removido pelo fluido.

As morfologias das superfícies usinadas pelos dois processos são apresentados nas Figuras 1 a 3, com diferentes ampliações. Pode-se observar que a superfície usinada por abrasão ultrasonora apresenta-se plana e lisa. Na Figura 3(a), tem-se realçado o caráter frágil das fraturas provocadas por microlascamentos.

As topografias das superfícies geradas por descargas elétricas apresentam uma morfologia bem diferente (Figuras 1(b) a 3(b) e Figura 4). A superfície apresenta muitas crateras geradas pelo material removido pelas descargas elétricas. É importante notar a presença de cristais cúbicos e dendritas (Figura 4 (a)). Isso sugere a ausência ou minimização da presença de uma camada refundida, normalmente presente em metais.⁽⁶⁾ Estes cristais não foram gerados pelo

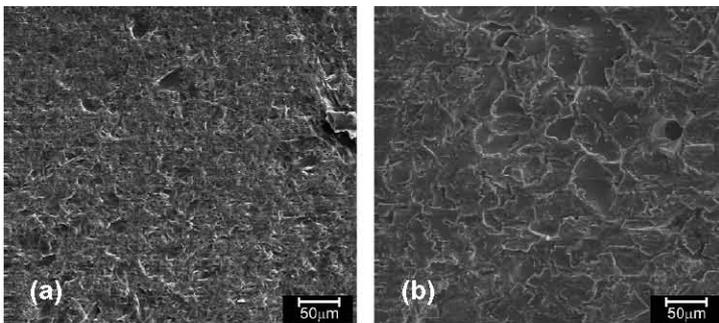


Figura 1. Morfologias obtidas por MEV para as superfícies de silício usinadas (a) por abrasão ultrasonora e (b) por descargas elétricas.

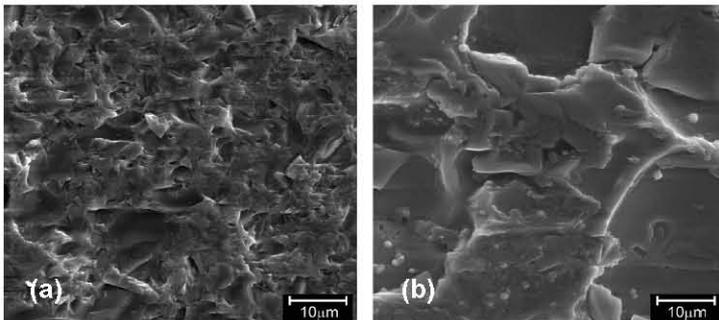


Figura 2. Morfologias obtidas por MEV para as superfícies de silício usinadas (a) por abrasão ultrasonora e (b) por descargas elétricas.

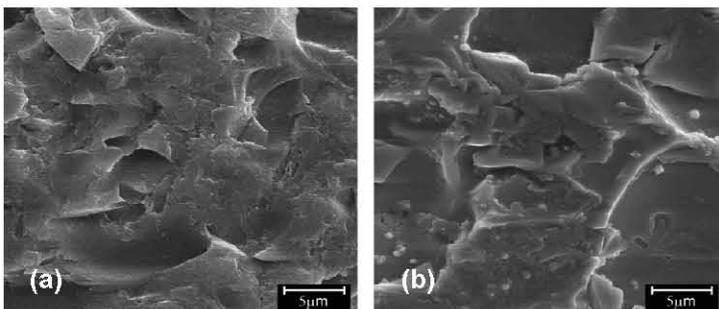


Figura 3. Morfologias obtidas por MEV para as superfícies de silício usinadas (a) por abrasão ultrasonora e (b) por descargas elétricas.

processo de usinagem por eletroerosão, uma vez que foram observados em locais da lâmina de silício que não receberam descargas elétricas. É provável que os cristais e dendritas possuam condutividade diferentes do restante da estrutura e, com isso, sejam mais resistentes ao processo de fusão/ evaporação.⁽⁶⁾ Logo, haverá uma assimetria na retirada de matéria.

Ainda na Figura 4 (b), apresenta-se uma região onde não ocorreu fusão de material, mas fratura frágil causada por impacto da ferramenta com a peça. Como as correntes não possuem a estabilidade necessária para se evitar o contato com a ferramenta, e o silício é extremamente frágil, qualquer contato provoca geração de trincas e lascamento de material.

Na Figura 5, são apresentados os gráficos de topografia de superfície obtidos por interferometria laser, para o vidro e silício usinados por abrasão ultrasonora e para o silício usinado por eletroerosão. Observa-se que o vidro possui menor rugosidade Ra e melhor dispersão dos picos e vales. O silício usinado por abrasão ultrasonora mostra rugosidade Ra um pouco maior (1,74 μm) e também maior dispersão dos picos e vales, com maiores ondulações. Já no silício usinado por descargas elétricas, a rugosidade Ra foi significativamente maior (4,43 μm), além de grandes ondulações, provocadas provavelmente pelas descargas elétricas não muito estáveis, gerando grandes crateras e pior acabamento superficial,⁽⁷⁻¹⁰⁾ quando comparado com o processo de abrasão ultrasonora. Apesar disso, este processo poderá ser utilizado quando se necessitar imprimir geometrias muito complexas, que poderiam ser inviáveis pelo processo de usinagem por abrasão ultrasonora, dada as dificuldades de esculpir as ferramentas de usinagem.

O ouro usado como revestimento onera os custos do processo. Contudo, revestimentos condutores mais baratos podem ser aplicados e resultados similares

podem ser obtidos. O eventual inconveniente de contaminação da superfície pelo material usado no revestimento pode ser resolvido pela eliminação do mesmo por decapagem química.

4 CONCLUSÃO

Considerando-se apenas as condições e parâmetros testados, incluindo o tipo de material, pode-se concluir que:

- a usinagem por abrasão ultrasonora mostrou-se um bom método para usinagem do silício, tanto em termos de tempo de usinagem, muito pequeno, quanto em termos de bom acabamento superficial, quando comparada com a usinagem por eletroerosão;
- a usinagem por descargas elétricas (eletroerosão) mostrou-se viável na usinagem do silício. Porém, muito mais lenta e com acabamento superficial inferior, apresentando muitas crateras. A fraca usinabilidade do silício decorre da dificuldade de se aplicar descargas elétricas de forma homogênea, que possam promover um maior arrancamento de material;
- devido ao caráter semiconductor do Silício, aliado à inconstância e não homogeneidade das descargas elétricas, cristais cúbicos e dendritas ficaram evidenciados na superfície usinada, comprovando a maior dificuldade de usinar estas regiões e
- o recobrimento com ouro é decisivo para o aumento da velocidade de usinagem, tornando viável o processo de descargas elétricas na usinagem de silício.

Agradecimentos

O autor Alberto A. Raslan agradece ao IFM (Instituto Fábrica do Milênio) pelo apoio financeiro à pesquisa. Os demais autores agradecem ao CNPq pelas bolsas de estudo concedidas.

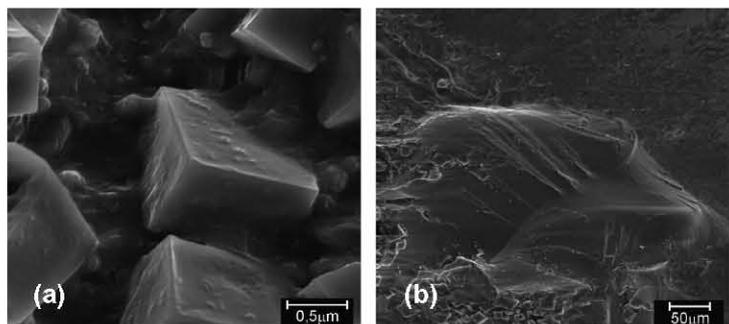


Figura 4. Morfologias obtidas por MEV para as superfícies de silício usinadas por descargas elétricas: (a) cristais cúbicos na superfície usinada; (b) fratura frágil na borda da região usinada.

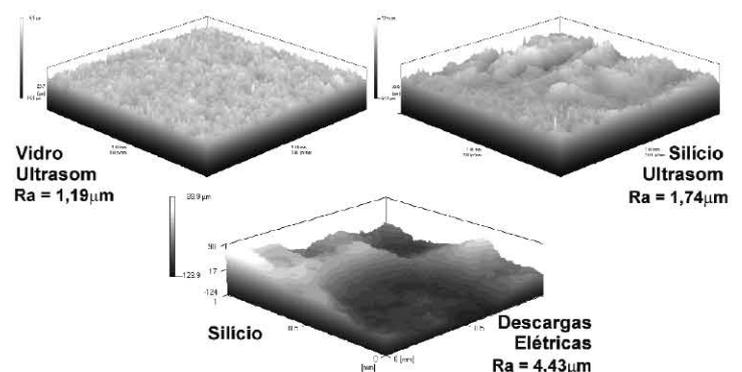


Figura 5. Topografia e rugosidade média aritmética (Ra) das superfícies de vidro e silício usinadas por abrasão ultrasonora e do silício usinada por descargas elétricas.

REFERÊNCIAS

- 1 REYNAERTS, D.; HEEREN, P. H.; BRUSSEL, H.V. Microstructuring of silicon by electro-discharge machining (EDM) – Part I: theory. In: EUROSENSORS X, 1996, Leuven, Belgium. **Proceedings...** Sensors and Actuators A: Physical, v. 60, n.1-3, p. 212-218, May 1997.
- 2 HEEREN, P.-H.; REYNAERTS, D.; BRUSSEL, H.V.; BEURET, C.; LARSSON, O.; BERTHOLDS, A. Microstructuring of silicon by electro-discharge machining (EDM) – Part II: applications. In: EUROSENSORS X, 1996, Leuven, Belgium. **Proceedings...** Sensors and Actuators A: Physical, v.61, n.1-3, p. 379-386, June 1997.
- 3 RASLAN, A.A.; GUZZO, P.L.; SHINOHARA, A.H. Estudo comparativo da usinagem por abrasão ultrasonora de materiais duros e frágeis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO - COBEF , 2., 2003, Uberlândia-MG. **Anais...** Uberlândia: ABCM, 2003. 1 CD-ROM.
- 4 RASLAN, A.A., SHINOHARA, A.H., BRASIL, J.F.C., FERNANDES, G.P., MURANAKA, C.S. Núcleos de ferrita usinados por abrasão ultrasonora. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO - COBEF, 2., 2003, Uberlândia-MG. **Anais...** Uberlândia: ABCM, 2003. 1 CD-ROM.
- 5 GUITRAL, E. B. **The EDM handbook**. Cincinnati: Hanser Gardner, 1997. 306 p.
- 6 BENEDICT, G. F. **Nontraditional manufacturing processes**. New York: Marcel Dekker, 1987. p.207-246.
- 7 ARANTES, L.J. **Performance evaluation of dielectric fluids for electrical discharge machining process**. 2001. Dissertation (Master) – Massachusetts Institute of Technology, MA, USA.
- 8 FERNANDES, A.L. **Efeito da adição de pó de carboneto de silício nos fluidos dielétricos sobre o desempenho da usinagem por descargas elétricas do aço-Rápido ABNT M2**, 1999. 72 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 1999.
- 9 LIMA, E.F. **Rugosidade e integridade superficial do aço rápido ABNT M2 Após Usinagem por Descargas Elétricas**, 1997. 97 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG,
- 10 MCGEOUGH, J.A. **Advanced methods of machining**. London: Chapman and Hall, 1988. p.128-152.

Recebido em: 28/03/05

Aceito em: 11/10/05

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM - INTERNACIONAL, 59., 2004, São Paulo. São Paulo : ABM, 2004.