



ESTUDO DO TORNEAMENTO DE ULTRAPRECISÃO DE MATERIAIS FRÁGEIS ATRAVÉS DA EMISSÃO ACÚSTICA

Helder A. T. Silva

Jaime G. Duduch

Renato G. Jasinevicius

Universidade de São Paulo, EESC, Departamento de Engenharia Mecânica, Cx.P.359 –
13560-970 – São Carlos, SP, Brasil

***Resumo.** O grande interesse que a usinagem de ultraprecisão vem despertando em na indústria óptica e eletrônica, tem impulsionado pesquisas na área de torneamento de materiais frágeis. Estes materiais se caracterizam por sofrer fratura frágil para a maioria das condições de corte. Entretanto, respeitadas certas condições críticas de profundidade e/ou espessura de corte, é possível usinar este tipo de material de tal forma a obter superfícies livres de trincas. Isto requer o uso e o aperfeiçoamento de técnicas de monitoramento. Neste trabalho, é realizado um estudo sobre a viabilidade de se empregar a emissão acústica como técnica de monitoramento do torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis. Foram usinadas amostras de silício monocristalino e o sinal de emissão acústica emitido durante o processo foi correlacionado com três situações distintas de remoção de material: totalmente dúctil, dúctil-frágil e totalmente frágil.*

***Palavras-chave:** Usinagem de ultraprecisão, Torneamento com diamante, Emissão acústica, Materiais frágeis, Monitoramento.*

1. INTRODUÇÃO

O torneamento com ferramenta de ponta única de diamante desenvolveu-se rapidamente através de pesquisas com metais não ferrosos, principalmente alumínio e cobre, utilizados para a fabricação de componentes ópticos. Atualmente, a maioria dos trabalhos publicados sobre esta tecnologia de manufatura preocupa-se com o comportamento de materiais frágeis tais como cristais semicondutores, vidros ópticos, cerâmicas, etc. Essa nova tendência vem sendo amparada pela demanda por componentes fabricados a partir destes materiais para aplicação na indústria óptica e eletrônica (Blackley & Scattergood, 1994; Blake & Scattergood, 1990).

Ainda que tais materiais caracterizam-se por sofrerem pouca ou nenhuma deformação plástica e por apresentarem baixa tenacidade, características teoricamente adversas ao uso do

processo de usinagem, eles podem ser torneados em um regime “dúctil”, desde que respeitados alguns requisitos básicos, como profundidade e espessura de corte.

Portanto, o entendimento dos mecanismos envolvidos na interface ferramenta/ material é de primordial importância, pois o aperfeiçoamento da tecnologia de usinagem de ultraprecisão é prioritária para se atingir a produção econômica desses produtos. Isto leva ao uso e aperfeiçoamento de técnicas de monitoramento.

Uma possível opção para o monitoramento da usinagem de materiais frágeis está baseada na análise de emissão acústica (EA), que pode ser definida como uma onda elástica transiente gerada por uma rápida liberação de energia proveniente de uma ou mais fontes de deformação ou fratura localizadas em um material. A geração deste sinal é intrínseca ao processo de deformação (corte, trinca, quebra ou atrito) dos materiais, sendo gerada pelo próprio processo de deformação (Dornfeld, 1994).

Alguns pesquisadores estudaram a viabilidade do uso da emissão acústica no monitoramento do processo de torneamento com diamante (Liu & Dornfeld, 1996). Entretanto, todos os ensaios foram realizados com materiais não ferrosos, mais especificamente o alumínio. Os resultados obtidos são bastante encorajadores, demonstrando que o uso da emissão acústica tem um futuro promissor no monitoramento da usinagem de ultraprecisão.

Neste trabalho foram usinadas amostras de silício monocristalino (Si) com ferramenta de ponta única de diamante com determinada geometria e parâmetro de corte. O sinal de emissão acústica emitido durante o processo será correlacionado com o acabamento e a integridade superficial da peça, obtidos através de rugosímetro Form Talysurf e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Três situações distintas de remoção de material serão investigadas: totalmente dúctil, dúctil-frágil e totalmente frágil. Assim, o trabalho investigará a viabilidade do monitoramento da usinagem de materiais frágeis.

2. EMISSÃO ACÚSTICA E O TORNEAMENTO COM DIAMANTE

A emissão acústica é um fenômeno intrínseco do material. Assim, sendo o torneamento com diamante um processo que se aproxima muito de um processo ideal, espera-se que a correlação entre as características da zona de deformação e a energia de emissão acústica sejam próximas. Logo, a fim de se minimizarem os erros de usinagem e aumentar a eficácia do processo, um esquema de controle e monitoramento é necessário.

Apesar de ser uma técnica relativamente nova, o monitoramento na usinagem de ultraprecisão parece ser muito promissor (Ko & Cho, 1994; Liu & Dornfeld, 1996).

O monitoramento do sinal de emissão acústica gerada numa operação deste tipo de usinagem mostrou-se muito sensível a elementos de remoção de material, pequenas variações da profundidade de corte, além de oferecer vantagens como baixo custo, alta sensibilidade, flexibilidade na montagem e instalação e processamento simples.

As principais fontes de geração de emissão acústica são as zonas primária, secundária e terciária de deformação.

A emissão acústica foi investigada como técnica de monitoramento no torneamento de ultraprecisão de metais não ferrosos, especificamente alumínio, obtendo-se resultados bastante satisfatórios (Liu & Dornfeld, 1996). Portanto, necessita-se de resultados que indique o comportamento da emissão acústica durante o torneamento com diamante de materiais frágeis.

Assim a grande quantidade de resultados em emissão acústica na indentação de materiais frágeis, além do fato da indentação ser considerada o modelo de interação mais simples entre uma ferramenta de diamante e uma superfície, assemelhando-se à interação ferramenta/peça, é de grande utilidade no estudo da emissão acústica gerada no torneamento de ultraprecisão.

Na indentação do vidro, Tanikella & Scattergood (1995) conseguiram identificar os pontos de iniciação de trincas média, radial e lateral durante o ciclo de carregamento e descarregamento, através do monitoramento de emissão acústica. Akbari et al (1994), durante testes de indentação em material cerâmico (alumina), correlacionaram diferentes tipos de sinais com observações microscópicas, a fim de identificar deformação plástica ou fenômeno de trincamento (fratura frágil). Verificaram que a emissão acústica gerada por trincas eram de alta amplitude, longa duração e alta frequência, comparadas com o fenômeno durante deformação plástica. Em um trabalho de riscamento em alumina (Akbari et al, 1993), os autores também observaram um aumento do nível de emissão acústica à medida que se aumentava a carga de riscamento, ou seja, predominava a remoção frágil. Portanto, parece haver uma tendência de aumento dos níveis de emissão acústica, à medida que se aumenta o fenômeno de remoção frágil. As altas amplitudes e níveis de energia indicam um processo onde o surgimento de trincas predomina.

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Nos ensaios realizados foi usinada uma amostra de silício monocristalino (76mm de diâmetro), de orientação cristalográfica (100), com ferramenta de ponta única de diamante, com ângulo de saída de 2 1/2 graus negativos e raio de ponta de 0,776mm. Durante a usinagem foi utilizado fluido refrigerante. O avanço (f) utilizado foi 1,0, 2,5 e 7,5 $\mu\text{m}/\text{rev}$ e a profundidade nominal (a_p) 10 μm . Estas condições de corte produzem modos de remoção dúctil, dúctil/frágil e frágil, respectivamente. Utilizou-se uma máquina-ferramenta de ultraprecisão ASG 2500 da Rank-Pneumo e a rotação do eixo-árvore foi mantida constante em 1000 rpm.

O sinal de emissão acústica emitido durante o processo foi obtido através de um transdutor piezoelétrico montado sobre o porta-ferramenta. O sinal foi amplificado e filtrado por um filtro passa-alta (2,5kHz). Os dados de EA foram adquiridos por um DAC Card 700 da National Instruments conectado a um computador. O sinal de EA foi então correlacionado com o acabamento e integridade superficial da peça, obtidos através de rugosímetro Form Talysurf e microscopia eletrônica de varredura (MEV). O sinal RMS (“root mean square”) foi empregado como um indicador para o monitoramento do torneamento com diamante porque fornece uma medida direta do volume de energia do sinal. A Fig. 1 mostra um detalhe do aparato experimental.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As figuras 2, 3 e 4 mostram os sinais de EA obtidos dos três modos de remoção (dúctil, dúctil/frágil e frágil) durante o torneamento de ultraprecisão do silício monocristalino. É possível observar que à medida que se varia o modo de remoção de dúctil para frágil, uma tendência de aumento do sinal pode ser observada.

Na Fig. 2, tem-se o sinal obtido no torneamento no regime dúctil ($f=1\mu\text{m}/\text{rev}$, $a_p=10\mu\text{m}$). Pode-se observar que o nível de sinal $EA_{(RMS)}$ não ultrapassa o limite de 0,8V e possui uma amplitude de sinal de 0,2V. No regime dúctil/frágil ($f=2,5\mu\text{m}/\text{rev}$, $a_p=10\mu\text{m}$), visto na Fig.3, há um aumento do nível de $EA_{(RMS)}$ que atinge 1,0V. Este aumento provavelmente se deve à contribuição do regime frágil, com o surgimento de trincas. Esta tendência é confirmada pelo teste de remoção totalmente frágil ($f=7,5\mu\text{m}/\text{rev}$, $a_p=10\mu\text{m}$), Fig.4, onde o sinal de $EA_{(RMS)}$ atinge níveis altíssimos, chegando a 10,0V, e a amplitude do sinal é de 1,5V. A rugosidade aritmética média R_a confirma esta degradação da superfície, com a mudança dos modos de remoção. Para o modo dúctil $R_a = 0,0126\mu\text{m}$, dúctil/frágil $R_a=0,0188\mu\text{m}$ e para o regime frágil o valor de R_a é 0,0431 μm . Para a amostra polida o $R_a=0,0084\mu\text{m}$. Vale a pena ressaltar

que a superfície usinada no regime totalmente frágil, está repleta de defeitos superficiais e subsuperficiais. Devido ao tipo de sensor utilizado, o sistema não adquire apenas sinais de EA, mas também outros ruídos. Estes ruídos são gerados por partes móveis da máquina, fluido refrigerante etc. O nível de ruído detectado nos testes de corte foi 0,4V, como pode ser observado na parte inicial dos gráficos.

As Figuras 5, 6 mostram a microscopia eletrônica de varredura (MEV) das superfícies obtidas durante o torneamento nos dois modos de remoção extremos, dúctil e frágil. Na Fig.5, pode-se observar a formação de uma superfície espelhada de boa qualidade, livre de defeitos superficiais. Na Fig.6, com o modo de remoção frágil, a superfície está repleta de defeitos superficiais e subsuperficiais. A Fig.7 mostra a MEV da superfície obtida no regime dúctil/frágil, onde pode-se observar um número de danos intermediário aos obtidos com os modos extremos de remoção.

5. CONCLUSÕES

A grande motivação deste trabalho vem do interesse em se descobrir qual o comportamento do sinal de emissão acústica quando um material frágil é torneado com ponta única de diamante. Três modos de remoção foram analisados, dúctil, dúctil/frágil e frágil. Os gráficos obtidos mostram que o sinal de emissão acústica tem um aumento significativo com o aumento do modo de remoção frágil, com a geração de trincas. Os níveis de sinais foram distintos para os três modos de remoção, sendo que para as condições extremas, remoção dúctil e remoção frágil, houve uma grande diferença entre os sinais (0,8V e 10,0V), podendo facilmente se distinguir o modo de remoção atuante. Este aumento de sinal $EA_{(RMS)}$, assim como sua amplitude, está relacionado provavelmente ao aumento do fenômeno de fratura frágil, sendo que os altos níveis de energia indicam um processo onde o surgimento de trincas predomina.

Portanto, a emissão acústica desponta como uma possível técnica para o monitoramento do torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis, e novas pesquisas estão em andamento.

REFERÊNCIAS

- Akbari, J., Saito, Y., Hanaoka, T., Enomoto, S., 1993, Detection of cutting mode during scratching of ceramics using acoustic emission, *International Journal of Japan Society of Precision Engineering*, vol. 27, n. 1, pp. 35-40.
- Akbari, J., Saito, Y., Hanaoka, T., Enomoto, S., 1994, Acoustic emission and deformation mode in ceramics during indentation, *JSME International Journal*, vol. 37, n. 4, pp. 488-494.
- Blackley, W.S. & Scattergood, R.O., 1991, Ductile regime machining model for diamond turning of brittle materials, *Precision Engineering*, vol. 13, n. 2, pp. 95-103.
- Blake, P.N. & Scattergood, R.O., 1990, Ductile-regime machining of germanium and silicon, *Journal of American Ceramic Society*, vol. 73, n. 4, pp. 949-957.
- Dornfeld, D.A., 1994, In process recognition of cutting states, *JSME International Journal*, vol. 37, n. 4, pp. 638-650.
- Ko, T.J. & Cho, D.W., 1994, Tool wear monitoring in diamond turning by fuzzy pattern recognition, *Journal of Engineering for Industry*, vol. 116, pp. 225-232.

Liu, J.J. & Dornfeld, D.A., 1996, Modeling and analysis of acoustic emission in diamond turning, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 118, pp. 199-207.

Tanikella, B.V. & Scattergood, R.O., 1995, Acoustic emission during indentation fracture, Journal of American Ceramic Society, vol. 78, n. 6, pp. 1698-1702.

STUDY OF THE ULTRAPRECISION MACHINING OF BRITTLE MATERIALS THROUGH ACOUSTIC EMISSION

Abstract: The increasing interest in ultraprecision machining, specially in the optical electronic industry, has prompted research in brittle materials machining. These materials are characterized by the onset of brittle fracture before considerable ductile flow take place under most the cutting conditions. However, when appropriate cutting conditions are used, ie, feed rate and depth of cut, it has been found that material can be removed in such a way that free surfaces can be obtained. Appropriate monitoring techniques should be applied to keep these cutting conditions. When these conditions are well known and controlled appropriate monitoring technique can be applied. In this work, viability of AE as monitoring technique of brittle materials machining was assessed. Single crystal silicon wafers were diamond turned and the AE signal generated during the cutting process was correlated with three distinct material removal situations: brittle mode, partially brittle and ductile mode.

Key words: ultraprecision machining, diamond turning, acoustic emission, brittle materials, monitoring.

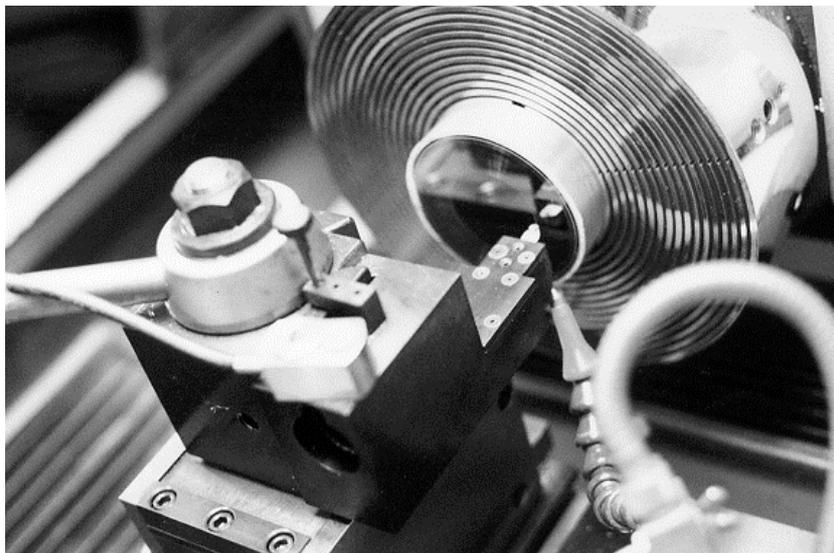


Figura 1- Detalhe do aparato experimental, mostrando o sensor de EA fixado sobre o porta-ferramenta e a amostra de silício

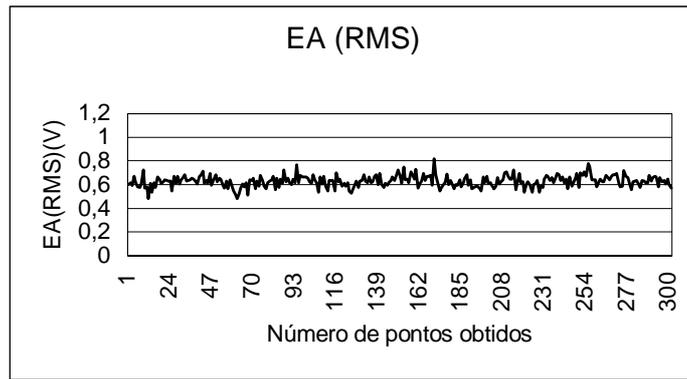


Figura 2- EA (RMS) no modo de remoção dúctil

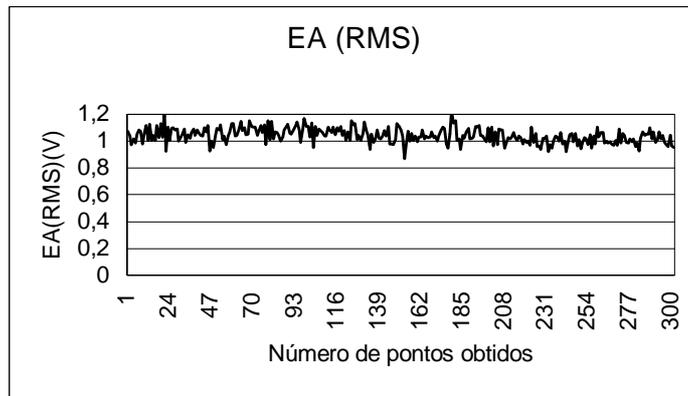


Figura 3- EA (RMS) no modo de remoção dúctil/frágil

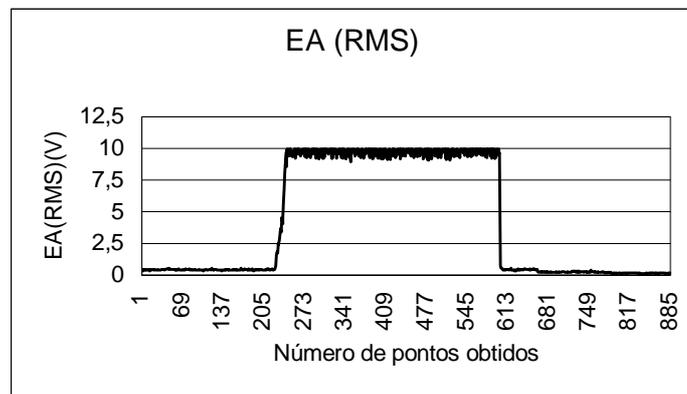


Figura 4- EA(RMS) no modo de remoção frágil

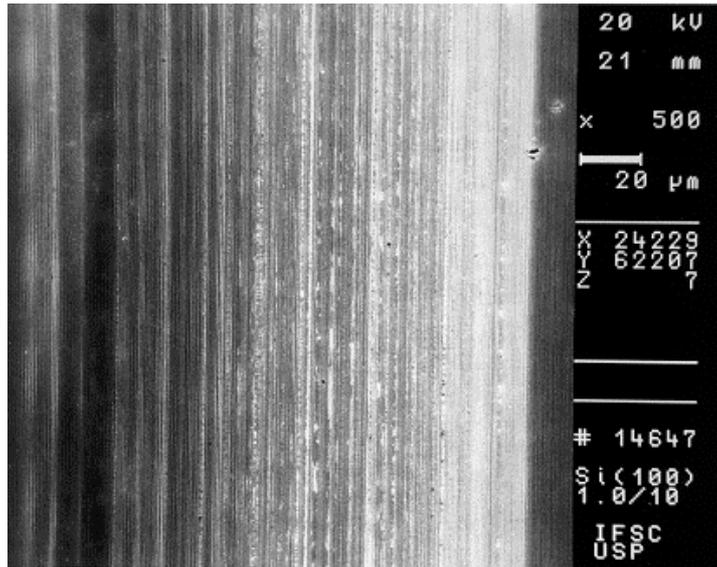


Figura 5- MEV da superfície obtida no modo de remoção dúctil

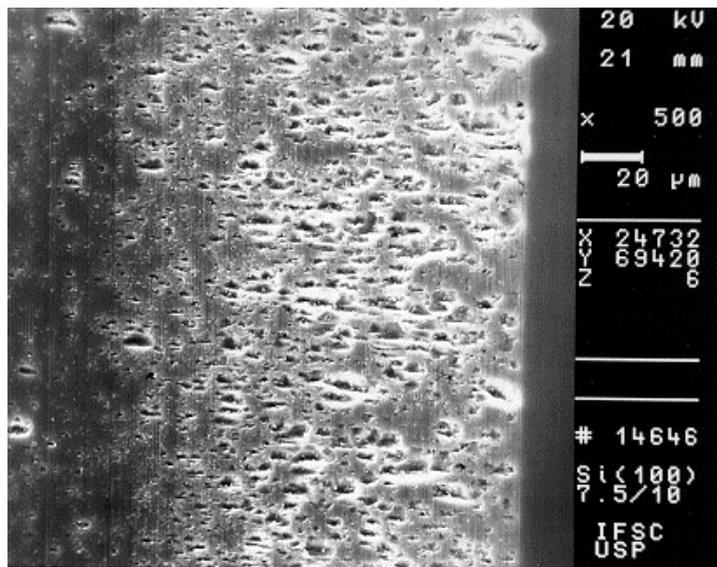


Figura 6- MEV da superfície obtida no modo de regime frágil

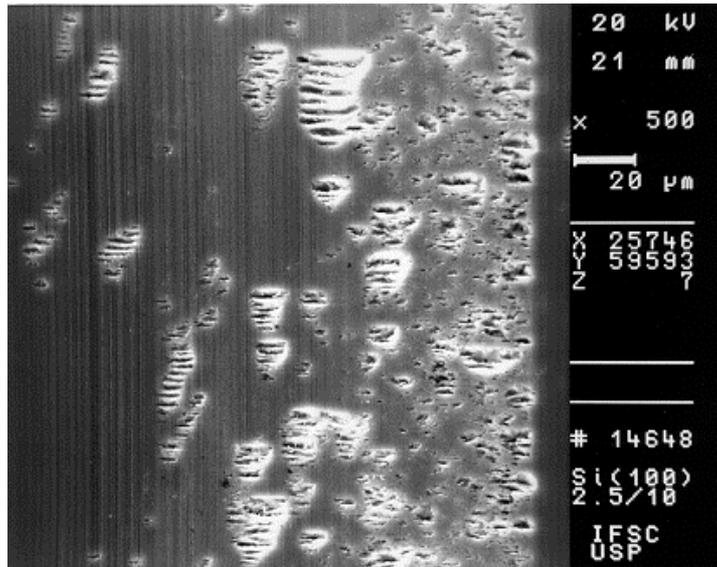


Figura 7- MEV da superfície obtida no modo de regime dúctil/frágil