

ESTUDO DOS MODOS DE REMOÇÃO DO SILÍCIO MONOCRISTALINO E LIGA METÁLICA NÃO-FERROSA NO TORNEAMENTO COM DIAMANTE ATRAVÉS DA EMISSÃO ACÚSTICA

Helder Augustus Treviso da Silva, helderaugustus@yahoo.com.br¹

Jaime Gilberto Duduch, jgduduch@sc.usp.br¹

Renato Goulart Jasinevicius, renatogj@sc.usp.br¹

Arthur José Vieira Porto, ajvporto@sc.usp.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, CP359, CEP13560-970, São Carlos, SP, Brasil.

Resumo: *O torneamento de ultraprecisão com ferramentas de diamante foi realizado em dois tipos de materiais, um semicondutor monocristalino, silício, e uma liga de alumínio, com o objetivo de correlacionar o sinal de emissão acústica (EA) com o nível de acabamento superficial obtido. Estes materiais foram escolhidos para investigar se o fenômeno de remoção é corretamente identificado pela EA, permitindo reconhecer o ponto de transição no modo de remoção de material (dúctil para dúctil/frágil). As amostras forma torneadas em operações de faceamento, com ferramenta de diamante, em ensaios de corte interrompido, desenvolvido e intensamente aplicado na usinagem de ultraprecisão, onde o perfil da ferramenta é deixado sobre a peça. As condições de corte empregadas foram definidas com o objetivo de se obter três diferentes respostas de regime de remoção, totalmente dúctil, dúctil/frágil e totalmente frágil. As superfícies geradas foram analisadas e correlacionadas com o sinal de EA emitido através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Por fim, procurou-se correlacionar os fenômenos envolvidos na remoção de material com o sinal de EA resultante. A técnica de emissão acústica mostrou ter sensibilidade suficiente para detectar a transição de corte predominantemente dúctil para o corte onde trincas estão presentes, bem como diferenciar o corte dúctil do corte frágil.*

Palavras-chave: *materiais frágeis, torneamento com diamante, emissão acústica, monitoramento, acabamento superficial.*

1. INTRODUÇÃO

A grande demanda atual de produtos industrializados com grande número de funções e dimensões cada vez mais reduzidas tem feito a micro usinagem desenvolver-se rapidamente, desempenhando um importante papel na tecnologia de manufatura atual (Rahman et al, 2007). Esses novos processo de remoção de material podem ser utilizados numa grande gama de materiais, como metais, plásticos e semicondutores, sem limitações de formatos de peças finais. Tanto superfícies planas como complexas podem ser produzidas por torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamantes monocristalino. Esta crescente demanda tem feito que técnicas de monitoramento do processo também sejam desenvolvidas, a fim de caracterizar, controlar e melhorar a fabricação de componentes com dimensões cada vez menores e mais precisos (Lee et al, 2006). Neste contexto, a emissão acústica vem sendo estudada como uma técnica viável.

No torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis com ferramenta de diamante monocristalino, o acabamento superficial e a formação de cavacos são afetados pelas propriedades destes materiais, dentre elas o comportamento dúctil/frágil ou transição dúctil/frágil no modo de remoção de material. Neste sentido, a informação de sensores quanto ao tipo de remoção atuante, ao acabamento superficial e danos subsuperficiais presentes é de primordial importância para controle do processo. O monitoramento através da EA surge da percepção de que tais fenômenos possam influenciar a formação do sinal de EA, também da definição de correlações entre sinais gerados e acabamento superficiais obtidos, para que se possa prever ou mesmo identificar o tipo de remoção atuante.

O corte dúctil de semicondutores está relacionado a transformação de fase da estrutura cúbica do semicondutor para fase metálica, proporcionando a plasticidade necessária para a existência do regime dúctil no corte de materiais semicondutores. Quando a pressão é liberada (após a passagem da ferramenta), a fase amorfa é meta-estavelmente formada. Portanto, pode-se afirmar que a ductilidade de um semicondutor é alcançada se seu valor de pressão de transição for ultrapassado (Jasinevicius et al, 2000a; Jasinevicius, 2006).

Neste trabalho são usinadas amostras de Si e uma liga de alumínio, com o objetivo de correlacionar o sinal de EA com o nível de acabamento obtido. Tais materiais foram escolhidos para se investigar se o fenômeno de remoção, sob a luz da teoria de transformação de fase, é corretamente identificado pela EA, permitindo identificar o ponto de transição no modo de remoção (dúctil para dúctil/frágil).

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Foram realizados ensaios de corte em um semiconductor, Silício monocristalino (Si) e em um material metálico não-ferroso, liga de alumínio. A amostra de Si tem orientação cristalográfica (100), Dureza HV de 11,27 GPa, pressão de transição de fase de entre 11,3-12,5 GPa e diâmetro de 30mm. A liga de alumínio (KOBÉ-M2B) também possui diâmetro de 30mm e Dureza HV de 110 kgf/mm². As amostras foram torneadas em operações de faceamento, com ferramenta de diamante monocristalino (da empresa Coutour Fine Tooling, Hertfordshire), com ângulo de saída -25° e raio de ponta de 0,658mm, em um torno Rank-Pneumo ASG-2500 (Precitech, Inc., Keene, NH). Os ensaios foram os de corte interrompido, intensamente aplicado na usinagem de ultraprecisão (Blake et al, 1990), onde o perfil da ferramenta é deixado sobre a peça através do recuo rápido da placa do eixo-árvore, criando uma região denominada “uncut shoulder” (Fig. 1). Foram empregadas taxas de avanço de 1, 2, 4 e 8µm/rev, combinadas com profundidade de corte de 1µm, com o objetivo de se obter regime de remoção dúctil, dúctil/frágil e frágil. O sistema de aquisição de dados consiste em um sensor piezelétrico, uma unidade de monitoramento analógica/digital e uma placa de aquisição de dados de 5MS/s (da National Instruments®). A taxa de aquisição empregada nestes testes foi de 500kHz, e os dados adquiridos foram processados usando-se o software próprio para este tipo de análise (LabView®). O aparato experimental empregado é representado na Fig.(2). Uma vez definidos ajustes iniciais, tanto os parâmetros da máquina (velocidade do eixo-árvore, fluido de corte) quanto os do sistema de aquisição (ganho, constante de tempo, taxa de aquisição, posicionamento do sensor) foram mantidos constantes. Para a caracterização das amostras, foi empregada a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

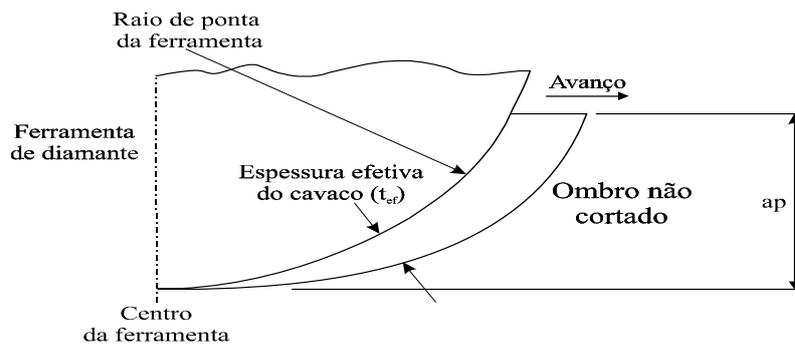


Figura 1. Ensaio de corte interrompido, com o perfil da ferramenta criando uma região denominada ombro não cortado (“uncut shoulder”) (adaptado de Blake et al, 1990).

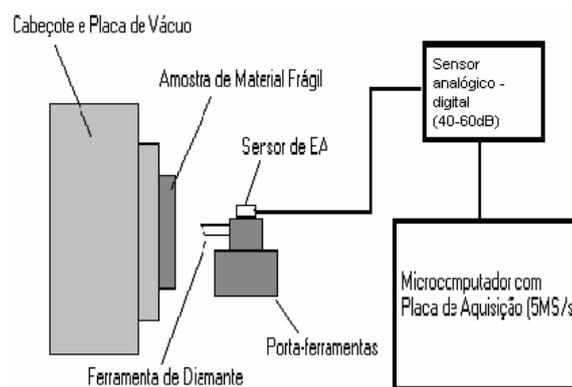


Figura 2. Representação do aparato experimental empregado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise comparativa entre a usinagem de Si e liga de alumínio tem o intuito de investigar a correlação entre o sinal gerado sob as mesmas condições de corte e geometria de ferramenta que geram o regime de remoção dúctil em materiais frágeis. Ou seja, investigar o sinal de EA gerado para ambos os materiais de modo a buscar respostas que expliquem seu comportamento correlacionando-o com os fenômenos envolvidos.

A Tabela (1) mostra as condições de corte empregadas, o sinal de emissão acústica RMS e o modo de remoção predominante para ambos os materiais. O modo de remoção foi obtido analisando-se as micrografias correspondentes.

Tabela 1. Condições de corte empregadas, nível de sinal de EA e modos de remoção predominantes.

Nível de sinal de EA e Modos de Remoção: D: dúctil; D/F: dúctil/frágil; F: frágil				
Condições de corte f ($\mu\text{m}/\text{rev}$) / ap (μm)	Si (100) RMS	Modo de Remoção	KOBE-M2B RMS	Modo de Remoção
1/1	0,05	D	0,05	D
2/1	0,07	D	0,04	D
4/1	1,06	F	0,04	D
8/1	6,7	F	0,04	D

Observando-se atentamente a distribuição do sinal nas condições de corte apresentadas na Tabela (1), pode-se notar que a remoção se deu de forma dúctil e frágil (do menor para o maior avanço) na remoção do Si. Os níveis de sinal para a remoção dúctil mantiveram-se relativamente baixos se comparados com os obtidos na remoção onde o modo frágil prevaleceu. Com o corte dúctil o patamar do sinal manteve-se praticamente o mesmo. A grande diferença veio com o aparecimento de trincas, com a amplitude do sinal aumentando rapidamente. A mesma tendência do sinal foi encontrada por AKBARI et al (1996), onde na retificação frágil de cerâmicas finas, o nível de sinal RMS de EA foi maior que no modo dúctil, indicando que a energia e amplitude de EA aumentam quando existe maior atividade frágil na remoção de material. Na Fig (3) são mostradas superfícies onde houve corte dúctil (3a, $f=2\mu\text{m}/\text{rev}$) e corte frágil (3b, $f=8\mu\text{m}/\text{rev}$) de Si.

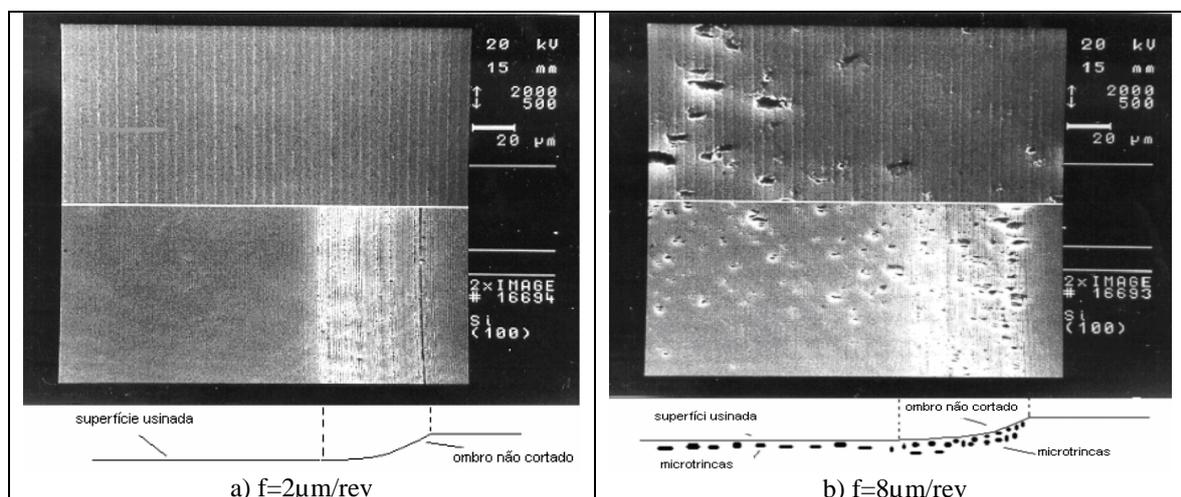


Figura 3. MEV da superfície gerada no Si em condições de corte com remoção dúctil (a) e frágil (b).

Observando-se a micrografia correspondente (Fig.3), pode-se notar a presença de trincas na região do ombro não cortado na condição de maior avanço (3b). Pode-se inferir, então, que a liberação de energia na formação de trincas no ombro não cortado, em algum momento, é um dos responsáveis pelo aumento do nível de sinal. O aumento do volume de material removido tem importância secundária na formação do sinal oriundo do torneamento de materiais frágeis em relação aos sinais advindos da formação de trincas. Pela análise do sinal obtido, infere-se que, sem fratura ou danos, mesmo o aumento de volume de material removido não foi capaz de causar variações significativas na amplitude e nível de sinal de EA.

Ainda na Tabela (1) são mostrados os níveis de sinal RMS de EA para a liga de alumínio. Pode-se notar que praticamente não houve nenhuma variação do sinal em todas as condições investigadas. Além disso, seus níveis de EA RMS ficaram na faixa na qual estão compreendidos os sinais para a remoção dúctil de Si. A comparação entre as tendências do sinal durante o torneamento de Si e a liga de alumínio é mostrado na Fig.(4).

Analisando-se diretamente o gráfico, pode-se ver que os níveis de sinais para Si e a liga de Al se mantiveram praticamente os mesmos durante o corte dúctil. Variação significativa ocorreu para a condição de maior avanço e somente para o Si, condição em que foi gerada remoção frágil de material. Portanto, pode-se afirmar com convicção que a energia despendida na geração e propagação de trincas pode ser captado pelo sensor de emissão acústica, mesmo nestes níveis de precisão que o torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis opera. Pode-se inferir também que a transformação de fase sofrida por um semiconductor para uma fase metálica atua no modo de remoção, fazendo com que tanto um cristal frágil, como o Si, quanto uma liga metálica, tenham as mesmas características e níveis de sinais enquanto possuem a mesma condição dúctil de remoção.

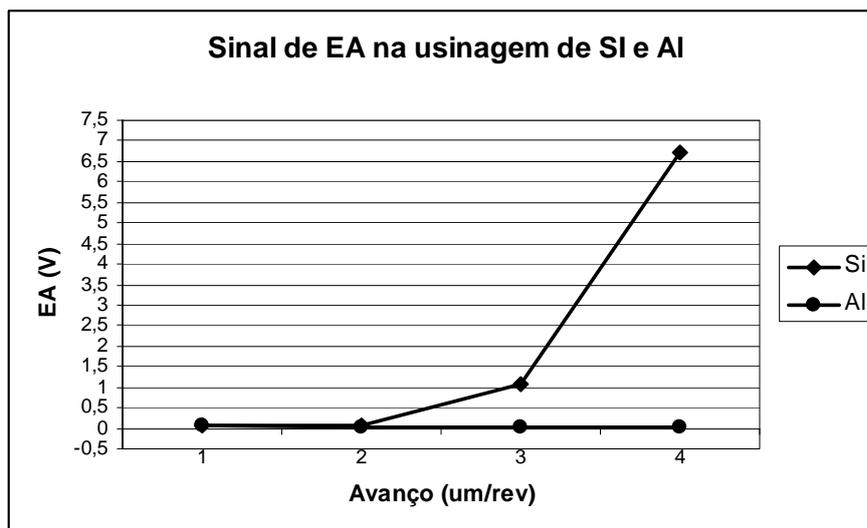


Figura 4. Variação do sinal de EA na usinagem de Si e liga de alumínio .

Estudos específicos mostram que o Si tem uma pressão de transição de fase da ordem de 11.3-12.5GPa, menor, por exemplo, se comparada com a do GaAs (20GPa), material mais difícil de se obter a remoção dúctil em torneamento (Jasinevicius et al, 2000a). A combinação dos parâmetros de corte e uma ferramenta de diamante suficientemente afiada induzem a metalização do monocristal, havendo assim a remoção dúctil de material, semelhante à remoção dúctil de um metal. Portanto, a usinabilidade de um monocristal semiconductor está intimamente ligada à pressão de transição de fase deste cristal (Pizani et al, 1999, Jasinevicius et al, 2000b). Estudos recentes corroboram com estes resultados, onde o comportamento plástico de cristais semicondutores, a despeito de seus valores de microdureza, são relacionados a valores de transformação de fase induzidos por pressão/tensão, onde o comportamento frágil na remoção de semicondutores é facilmente alcançado quanto maior for o valor de sua pressão de transição de fase (Jasinevicius & Pizani, 2007).

Deste modo, no corte dúctil de Si, pode-se concluir que a pressão de transformação de fase foi ultrapassada, gerando uma metalização do material naquele volume a frente da ferramenta. Neste trabalho, nas condições de corte dúcteis ($f=1\mu\text{m/rev}$, $f=2\mu\text{m/rev}$, ambas com $dc=1\mu\text{m}$), esta “metalização” refletiu-se no sinal de EA, mantendo-se num patamar relativamente constante, se comparado com remoção frágil. Os níveis e características do sinal na remoção dúctil de SI são semelhantes aos da remoção da liga de Al, indicando modos de remoção semelhantes. Os sinais advindos da usinagem da liga de Al têm a mesma característica e níveis que os sinais do corte dúctil de Si, indicando fenômenos de remoção semelhantes (corte dúctil de metais), corroborando com estudos anteriores de transformação de fase de semicondutores (Jasinevicius et al, 2000a; Jasinevicius & Pizani, 2007).

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, um cristal semiconductor e uma liga metálica não ferrosa foram usinadas num torno de ultraprecisão. Os sinais de emissão acústica gerados foram captados e analisados, comparando-se o sinal obtido com a superfície gerada.

Durante o corte dúctil de Si, o sinal de EA manteve-se constante, corroborando com ensaios encontrados na literatura com vidro e cerâmica. Portanto, a ausência ou não-predominância de trincas no processo de remoção promove uma característica constante no nível de sinal acústico. Na condição em que houve o fenômeno de remoção frágil, com o aparecimento de trincas no ombro não cortado e na superfície usinada, houve um aumento no nível do sinal. Portanto, a liberação de energia oriunda das trincas no ombro não cortado e na superfície final é responsável pelo aumento drástico no nível de sinal de EA. Esta variação foi detectada pelo sinal de EA, estando relacionada à liberação de energia nas regiões de danos superficiais e subsuperficiais.

Os sinais advindos da usinagem da liga de Al têm a mesma característica e níveis que os sinais do corte dúctil de Si, indicando fenômenos de remoção semelhantes (corte dúctil de metais), corroborando com estudos anteriores de transformação de fase de semicondutores (Jasinevicius et al, 2000a; Jasinevicius & Pizani, 2007).

Em resumo, a técnica de emissão acústica mostrou-se útil na detecção de fenômenos de corte em materiais frágeis. Mostrou ter sensibilidade suficiente para detectar a transição de corte predominantemente dúctil para o corte onde trincas estão presentes, como frágil, mesmo num nível de precisão tão alto como o envolvido no torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio dado na realização desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Akbari, J., Saito, Y., Hanaoka, T., Higuchi, S. and Enomoto, S., 1996, "Effect of grinding parameters on acoustic emission signals while grinding ceramics", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.62, pp.403-407.
- Blake, P.N. and Scattergood, R.O., 1990, "Ductile-regime machining of germanium and silicon", *Journal of American Ceramic Society*, Vol.73, n.4, pp.949-957.
- Jasinevicius, R.G., 2006, "Influence of cutting conditions scaling in the machining of semiconductors crystals with single point diamond tool", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.179, pp. 111-116.
- Jasinevicius, R.G. & Pizani, P.S., 2007, "On the ductile response dependence upon phase transformation in diamond turning of semiconductors", *Physica Status Solidi B.*, Vol.244, pp.261-265.
- Jasinevicius, R.G., Pizani, P.S. and Duduch, J.G., 2000a, "Brittle to ductile transition dependence upon the transition pressure value of semiconductors in micromachining", *Journal of Materials Research*, Vol.15, n.8, pp.1688-1692.
- Jasinevicius, R.G., Santos, F.J., Pizani, P.S., Duduch, J.G. and Porto, A.J.V., 2000b, "Surface amorphization in diamond turning of silicon crystal investigated by transmission electron microscopy", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol.272, pp.174-178.
- Lee, D.E., Hwang, I., Valente, C.M.O., Oliveira, J.F.G. & Dornfeld, D.A., 2006, "Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.46, pp.176-188.
- Pizani, P.S., Jasinevicius, R.G., Duduch, J.G. and Porto, A.J.V., 1999, "Ductile and brittle modes in single point diamond turning of silicon probed by raman scattering", *Journal of Materials Science Letters*, Vol.18, pp.1185-1187.
- Rahman, M., Lim, H.S., Neo, K.S., Senthil Kumar, A., Wong, Y.S. & Li, X.P., 2007, "Toll-based nanofinishing and micromachining", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.185, pp.2-16.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

STUDY ON THE REMOVAL MODES OF A MONOCRYSTALLINE SILICON AND A NON FERROUS METALLIC ALLOY IN THE DIAMOND TURNING THROUGH ACOUSTIC EMISSION

Helder Augustus Treviso da Silva, helderaugustus@yahoo.com.br¹

Jaime Gilberto Duduch, jgduduch@sc.usp.br¹

Renato Goulart Jasinevicius, renatogj@sc.usp.br¹

Arthur José Vieira Porto, ajvporto@sc.usp.br¹

¹Department of Mechanical Engineering, University of Sao Paulo, CP359, CEP13560-970, Sao Carlos, SP, Brazil.

Abstract. *Ultraprecision diamond turning was investigated in two kinds of materials, an monocrystalline semiconductor Si and Aluminium alloy with the purpose to correlate the acoustic emission (AE) signal with the level of surface finishing. These materials were chosen to investigate if the removal phenomenon is correctly identified by AE, permitting to identify the transition point in the material removal mechanism (ductile to ductile/brittle). The samples were diamond faced, with diamond tool, in interrupt cutting tests, developed and intense applied in ultraprecision turning, where the profile of the tool is printed across the machined surface. The cutting conditions were chosen expecting three different material responses, totally ductile, brittle-ductile and totally brittle. The generated surfaces were examined and correlated with the AE signal through scanning electron microscope (SEM). At last, an attempt to correlate the phenomenons involved in the material remove mechanisms with the resultant AE signal was tried. AE techniques showed to have sensitivity enough to detect the transition of predominantly ductile cut to cut where cracks are presents, as well as to distinguish between ductile cut and brittle cut.*

Keywords: *brittle materials, diamond turning, acoustic emission, monitoring, surface finishing.*