

INDICAÇÃO DO MODO DE REMOÇÃO EM CERÂMICAS AVANÇADAS ATRAVÉS DA EMISSÃO ACÚSTICA (EA)

Luiz E. A. Sanchez

Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica
Cx. P. 473 - 7033-360 - Bauru, SP, Brasil

Reginaldo T. Coelho

João F. G. Oliveira

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

***Resumo.** Neste trabalho é apresentado o comportamento da emissão acústica (EA) no riscamento de cerâmicas avançadas, tomando como principal representante a alumina 96%. Em oposição às cerâmicas avançadas, de estrutura granular, também é usado o vidro como material cerâmico não granular. A alumina utilizada é caracterizada por uma microestrutura irregular composta de grãos de tamanho heterogêneo. Para a remoção empregou-se ensaios de dois tipos, riscamento com profundidade variável e riscamento com carga constante. No primeiro tipo de ensaio o principal parâmetro estudado é a profundidade de riscamento, enquanto que no segundo avaliou-se o efeito da carga e o acúmulo de defeitos no material decorrentes de várias passagens do indentador sobre o mesmo local. Como resultado do riscamento com profundidade variável observa-se que os sinais de EA e seu respectivo espectro de frequência guardam correspondência entre si e com os defeitos produzidos durante a remoção. É observado também que existem diferenças significativas nos sinais de EA dos riscos feitos na alumina e no vidro, em decorrência dos diferentes mecanismos de remoção associados a estrutura desses dois materiais. É mostrado, ainda, um aumento do nível dos sinais de EA com o aumento gradativo do número de passes repetidos em consequência do acúmulo de defeitos no material.*

***Palavras-chave:** Cerâmica avançada, Emissão acústica, Remoção, Trincas, Riscamento*

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos materiais cerâmicos, e em especial das cerâmicas avançadas, tem permitido que estes materiais ocupem cada vez mais o lugar dos tradicionais materiais na fabricação de peças que necessitam de importantes características como: elevada resistência ao desgaste; alta resistência à temperaturas elevadas; inércia química, entre outras.

Por outro lado, as cerâmicas avançadas também apresentam características negativas. A principal delas é a baixa tenacidade à fratura, conferindo pequena resistência ao impacto e reduzida deformação plástica, responsável pelo comportamento frágil destes materiais.

A fragilidade das cerâmicas avançadas é um problema especialmente acentuado na fase de acabamento das peças, que utiliza a usinagem para alcançar as qualidades especificadas. Dos

processos de usinagem a retificação é o mais empregado, porém invariavelmente forma trincas superficiais e/ou subsuperficiais, além de introduzir tensões residuais. Esses defeitos prejudicam o acabamento superficial das peças e degradam sua resistência mecânica a ponto de comprometer ou mesmo impedir seu uso (Strakna *et al.*, 1996 e Xu *et al.*, 1996).

Na usinagem, dependendo das condições usadas, os defeitos surgidos podem ser minimizados passando do modo frágil de remoção para o modo dúctil. Enquanto o modo dúctil é caracterizado por mecanismos de remoção de material onde dominam as deformações plásticas, o modo frágil apresenta mecanismos de fratura envolvendo a formação de trincas. Tais modos de remoção estão associados a uma profundidade de corte limite, que ultrapassada aumenta o predomínio de fraturas (Malkin & Ritter, 1989; Jahanmir & Ives, 1995).

Segundo Tönshof *et al.* (1994), Xu *et al.* (1995b) e Xu & Jahanmir (1995a), os mecanismos de formação e propagação de trincas, que caracterizam o modo frágil de remoção, podem ocorrer de maneira diversa dependendo do tipo de estrutura do material cerâmico. Nas cerâmicas policristalinas de grãos pequenos, sob forte interação, as trincas geradas durante a remoção de material são do tipo transgranular similares àquelas formadas em cerâmicas monocristalinas ou, então, ao vidro. Já em cerâmicas com estrutura de fraca interação granular como às compostas por grãos grossos e/ou heterogêneos, as trincas são do tipo intergranular e intragranular. A primeira propaga-se nos contornos dos grãos causando seus deslocamentos, enquanto que a trinca intragranular fratura o grão em pedaços (“debris”).

Dessa forma, a remoção em cerâmicas pode-se dar por: deslocamentos de grãos, devido às trincas intergranulares; fragmentação de grãos, pelas trincas intragranulares; e arrancamento de porções de material pela ação das trincas transgranulares.

Na tentativa de minorar a formação de defeitos é prática comum retificar os materiais frágeis sob baixas taxas de remoção, porém este procedimento não assegura a isenção de microtrincas em peças usinadas. Dessa forma os sistemas de monitoramento capazes de detectar a formação de trincas durante a remoção de material tornam-se importantes na usinagem de materiais cerâmicos. Porém, com o tradicional método de monitoramento através da força não é possível identificar a formação e propagação de trincas. A aplicação da emissão acústica (EA), ao contrário, mostra-se promissora uma vez que os mecanismos de fratura estão associados à parcelas de energia liberada durante o processo de remoção e esta técnica é sensível às mudanças na estrutura do material (Bifano & Yi, 1992; Monber *et al.*, 1995, Coelho *et al.*, 1996).

O estudo da remoção através da retificação mostra-se complexo devido às inúmeras interações simultâneas entre os grãos abrasivos próximos, além da não uniformidade dos grãos na superfície do rebolo e o efeito da temperatura na zona de retificação. Por isso, na tentativa de compreender os mecanismos de remoção e defeitos dos materiais cerâmicos, é desejável a simplificação do processo por meio de uma ferramenta de corte único. O teste de remoção mais simples e difundido é o riscamento de um corpo-de-prova com um indentador de diamante. Neste tipo de teste é verificada a resposta do material sob determinados parâmetros, como por exemplo a carga de riscamento (Swain, 1979; Ruff *et al.*, 1995; Xu & Jahanmir, 1995b e Xu *et al.* 1995a).

Ademais, a adoção do riscamento como modelo de remoção de material pode fornecer importante fonte de informações a respeito da viabilidade do uso de técnicas de monitoramento capazes de detectar defeitos em materiais cerâmicos.

Este trabalho tem como principal objetivo a indicação do modo de remoção em materiais cerâmicos através do monitoramento com técnicas de emissão acústica. Para isso lança-se mão de testes de riscamentos onde são verificados a influência dos parâmetros de ensaios sobre os sinais de emissão acústica e a correspondente detecção de defeitos através desta técnica.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Material dos corpo-de-prova

Neste trabalho são utilizados dois materiais cerâmicos de estruturas diferentes, uma alumina 96% de pureza e um vidro comercial. A alumina produzida para estes ensaios apresenta uma estrutura policristalina heterogênea, composta por grãos de tamanhos e formas diferentes. Sabe-se que, materiais cerâmicos com esta morfologia possuem contornos de grãos fracos fazendo com que as trincas desviem e distribuam-se preferencialmente em torno dos grãos, constituindo-se num obstáculo à formação de trincas longas. No vidro, considerado um material cerâmico de estrutura amorfa, esse efeito não existe devido a ausência de estrutura granular favorecendo a propagação de trincas do tipo transgranular durante a remoção de material. Por apresentarem comportamentos distintos em relação à propagação de trincas foram usados estes dois materiais para a confecção dos corpos-de-prova.

Antes da execução dos ensaios os corpos-de-prova em alumina tiveram suas superfícies retificadas, primeiro com um rebolo diamantado de grãos grossos (D107) e depois com um de grão fino (D76). Em seguida as peças foram lapidadas e, por fim, polidas. Tal procedimento tem por objetivo, primeiro, remover as distorções que acompanham a peça durante sua sinterização através da retificação e, segundo, deixar as peças isentas ao máximo de trincas e tensões residuais empregando processos de baixas taxas de remoção de material como a lapidação e o polimento.

2.2 Montagem experimental

Para cumprir os objetivos determinados no trabalho adotou-se duas configurações diferentes de riscamento, cada qual capaz de contribuir com um número de parâmetros a ser avaliados na remoção de material.

A primeira configuração de riscamento é próxima à da trajetória desenvolvida por um grão abrasivo de um rebolo no processo de retificação. Neste tipo de experimento é removido material através de riscos semi-circulares no corpo-de-prova proporcionando profundidades de remoção progressivamente maiores até alcançar o meio da trajetória quando, a partir deste ponto, a profundidade decresce. Esta montagem pode ser esquematicamente vista na Fig. 1a.

Após explorar a pontecialidade da primeira montagem, em relação aos resultados por ela possibilitados, é empregado uma segunda configuração onde são produzidos riscos extensos ao longo do plano da superfície de um corpo-de-prova feito em forma de disco (Fig. 1b).

Pelas características dos riscos produzidos nas duas configurações, cada uma delas é genericamente referida neste trabalho como “riscamento com profundidade variável” e “riscamento com carga constante”, respectivamente.

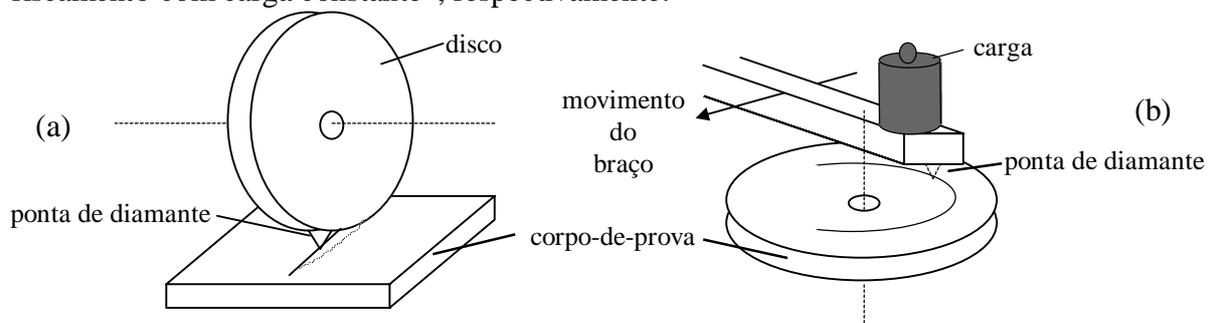


Figura 1 - Esquema do riscamento com carga constante (a) e profundidade variável (b).

No primeiro tipo de riscamento, com profundidade variável, foi necessário projetar um dispositivo mecânico capaz de cumprir alguns requisitos básicos como: geração de riscos semi-circulares sobre o corpo-de-prova; fixação do sensor de emissão acústica junto ao corpo-de-prova; e possibilidade de ajuste fino da profundidade do risco. Para tanto, utilizou-se uma retificadora tangencial plana colocando-se no lugar do rebolo um disco de aço com um indentador de diamante alojado em sua periferia, e sobre a mesa da máquina o conjunto mecânico com o corpo-de-prova.

A Fig. 2 ilustra o esquema do banco de ensaios mostrando seus principais componentes. O corpo-de-prova e o sensor de EA são firmemente fixados em um suporte que é preso sobre um dispositivo cuja inclinação é controlada por meio de uma peça cônica unida a uma haste roscada. Todo este conjunto é aproximado em direção ao disco através do movimento manual da máquina. Para que cada risco possa ser executado individualmente e sem passar a ponta de diamante mais de uma vez sobre ele, dotou-se o disco de acionamento manual através da colocação de um contra-peso próximo a sua periferia. No momento desejado o disco é colocado em posição e solto, produzindo o risco.

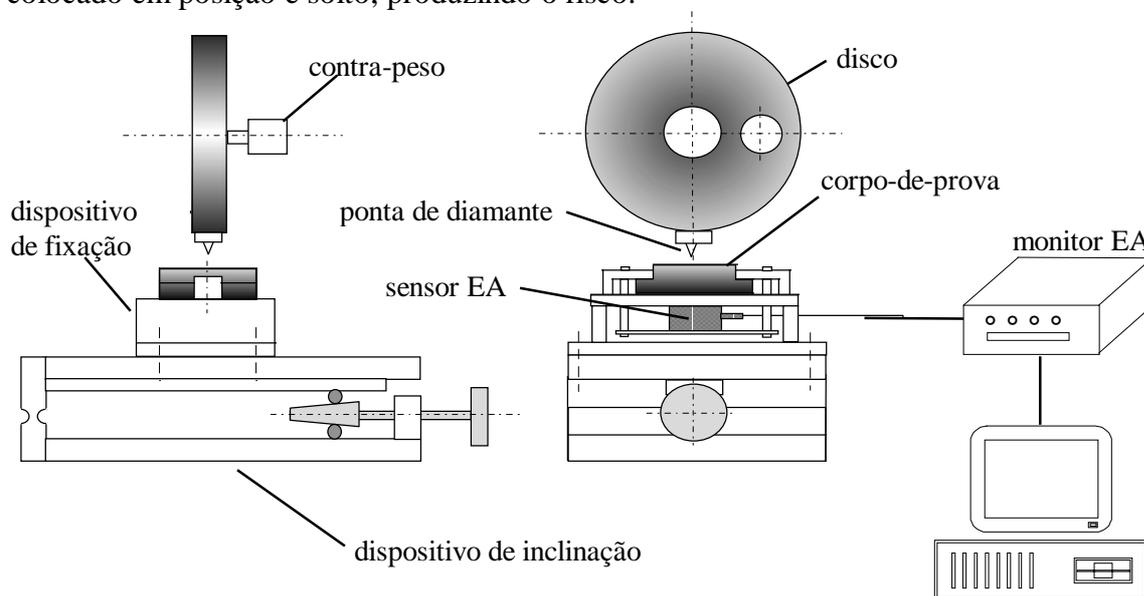


Figura 2 - Esquema da montagem mecânica e aquisição de dados do ensaio de riscamento com profundidade variável.

O sistema de aquisição de dados é basicamente composto por um sensor de EA, um monitor de EA (Sensis-modelo BM12) e um microcomputador com cartão PCMCIA A/D 100Mhz de frequência de aquisição. Nesta montagem os sinais gerados pelo sensor são amplificados, filtrados (passando apenas frequências acima de 1 kHz) e calculados seus valores RMS adotando-se uma constante de tempo de aproximadamente 1ms. Com o auxílio de “softwares” específicos (LabView e excel) os dados armazenados no microcomputador são analisados e dispostos na forma de gráfico da EA em função do tempo. Para análises adicionais, também é feita a aplicação de algoritmo de FFT (“Fast Fourier Transform”), disponível no próprio “LabView”, sobre o sinal temporal, podendo-se observar o espectro de frequências presentes.

No segundo tipo de ensaio, com carga constante, os riscos produzidos são longos possibilitando a observação e identificação de maior número de eventos em relação ao ensaio anterior. O conjunto mecânico deste banco de ensaios é composto por um dispositivo de rotação fixado sobre a mesa de uma mandriladora vertical. No cabeçote desta máquina é fixado um dispositivo similar a uma balança onde são presos o indentador de diamante, o sensor de

EA e a carga de riscamento. Além de riscos circulares repetidos, obtido pela manutenção do indentador/balança na mesma posição enquanto o disco gira, também consegue-se produzir riscos sob um único passe em forma de espiral, graças a possibilidade do movimento radial do indentador/balança em relação ao corpo-de-prova. A Fig. 3 mostra o esquema de montagem mecânica e aquisição de dados do ensaio de riscamento com carga constante.

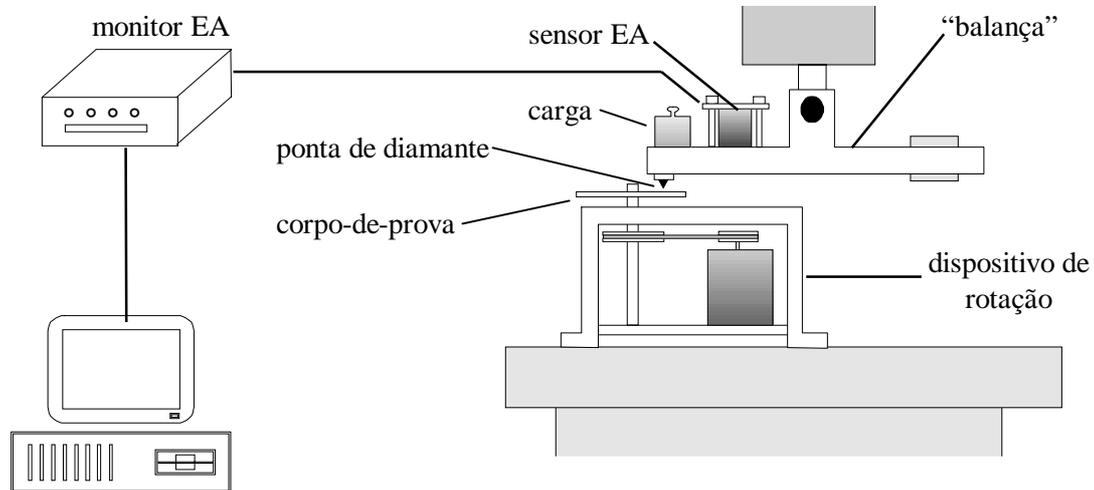


Figura 3 - Esquema da montagem mecânica e de aquisição de dados do ensaio de riscamento com carga constante.

O indentador de diamante utilizado é o piramidal de quatro lados e o aspecto superficial dos riscos, com os defeitos produzidos, são avaliados através de microscopia de varredura (MEV) e comparados com os sinais RMS da EA.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados dois tipos de ensaios de riscamento: primeiro com profundidade variável e, depois, com carga constante. Este segundo ensaio é ainda sub-dividido em outros dois, onde são produzidos riscos sob passe único e sob repetidos passes em alumina, e por último no vidro.

3.1 EA no riscamento com profundidade variável

A Fig. 4 apresenta o aspecto de um risco feito em alumina cujos sinais de EA fornecem os respectivos gráficos de EA normalizada e densidade espectral de potência no tempo. Neste último é mostrado tanto a frequência quanto a intensidade de energia em cada instante do riscamento.

A Fig. 4 revela que o nível de EA durante o percurso do indentador sobre a cerâmica cresce com o respectivo aumento da profundidade de riscamento. No início do processo a profundidade é pequena, com pouca remoção de material e, conseqüentemente, baixa EA. No entanto, a partir de uma profundidade de aproximadamente $1,5 \mu\text{m}$ observa-se um aumento abrupto de EA coincidindo com a intensificação do processo de remoção, que neste ponto é acompanhado por trincas responsáveis pelos lascamentos laterais. Este fenômeno continua até o decréscimo da profundidade aos níveis similares aos que deram início ao processo de remoção por fratura, quando a EA volta a ser pequena.

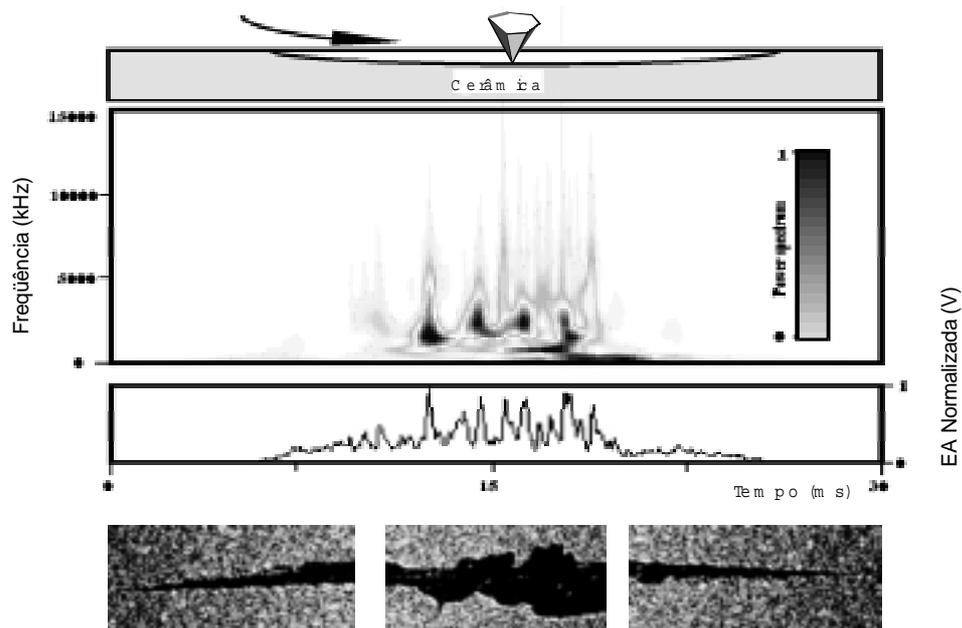


Figura 4 - Resultado da análise de frequência no tempo dos sinais de EA(rms) adquiridos no riscamento com profundidade variável.

A densidade espectral de potência, obtida pela aplicação do algoritmo de FFT ao sinal temporal, mostra que nos instantes de maior intensidade de EA há presença de componentes de alta frequência no sinal. A grande quantidade de energia em frequências intermediárias (por volta de 2000Hz) que se observa nesses instantes parece estar relacionada ao desencadeamento do processo de remoção através da propagação de trincas.

Pelos resultados observados pode-se inferir que a presença de mecanismos de remoção frágil está ligada a intensa liberação de energia nas faixas intermediárias de frequência contida nos espectros mais amplos. No entanto, estes fenômenos correspondem aos instantes de maiores picos de EA simplificando bastante a análise dos sinais, uma vez que o tempo de processamento computacional para a obtenção dos espectros de frequência é alto.

3.2 EA no riscamento com carga constante

EA no riscamento com carga constante em passe único. O gráfico da Fig. 5 mostra o valor da EA para riscos produzidos sob diferentes cargas em passe único e com velocidades tangencial de aproximadamente 0,16 m/s.

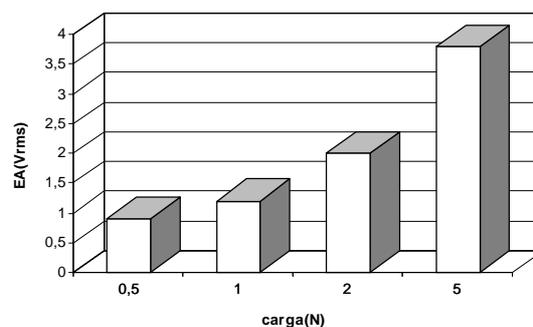


Figura 5 - EA em riscos de passe único sob carga constante e velocidade de 0,16 m/s.

Nota-se, pela Fig. 5, que a EA cresce com o correspondente aumento da carga de riscamento. Esse comportamento pode ser creditado ao aumento da energia despendida pelos mecanismos de deformação plástica e de fratura com a elevação da taxa de remoção.

O menor nível de EA obtido com a menor carga (0,5 N) sugere que o mecanismo de remoção não envolve trincas transgranulares nem arrancamento abrupto de porções de material. Ao contrário, estrutura irregular como a dessa alumina favorece a propagação de trincas intergranulares com conseqüentes deslocamentos de grãos. A Fig. 6 mostra o aspecto da superfície de um risco feito com a maior carga (5,0 N) onde observa-se a presença de mecanismos de remoção plástica acompanhada de microtrincas intergranulares chegando a envolver um grão completamente, prestes a deslocar-se (seta indicativa na Fig. 6).

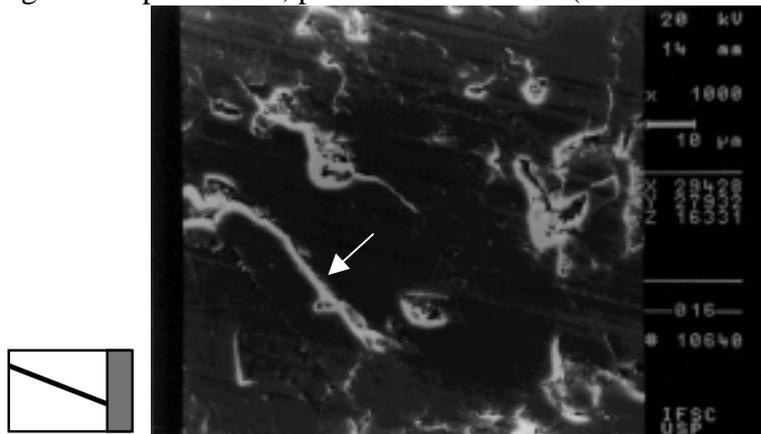


Figura 6 - Risco feito em alumina sob passe único com carga de 5,0 N.

EA no riscamento com carga constante em repetidos passes. No ensaio de riscamento em repetidos passes, onde o risco é obtido pelas várias passagens do indentador sobre o mesmo local, foram usadas quatro cargas diferentes, 0,5, 2,0, 5,0 e 10,0 N. A Fig. 7 mostra o sinal de EA dos quatro riscos produzidos sobre a alumina.

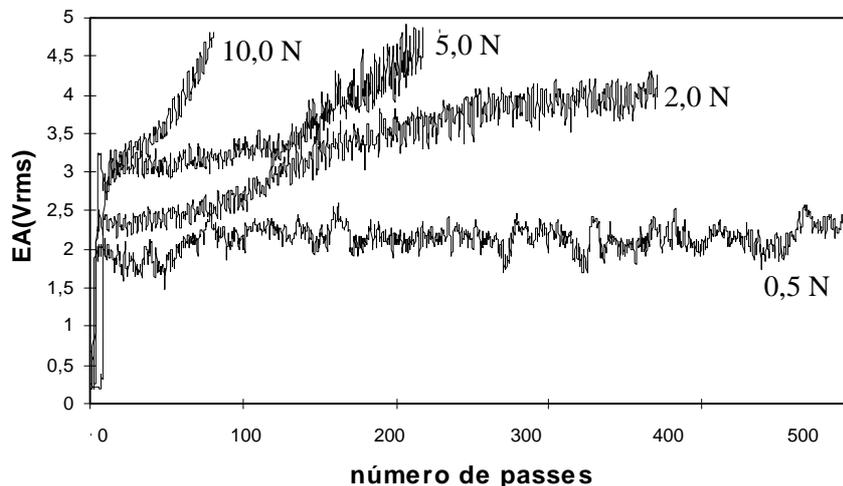


Figura 7 - EA no riscamento da alumina sob repetidos passes.

No gráfico da Fig. 7 observa-se que a EA aumenta com o aumento do número de passes, a menos para a menor carga (0,5 N) que mantém-se praticamente no nível inicial. Para as outras cargas, quanto maior a carga maior é a taxa de crescimento da EA. Este comportamento pode ser creditado ao acúmulo de defeitos introduzidos no material, ao aumento progressivo desses defeitos e à conseqüente remoção com os sucessivos passes. Cada

evento desses contribui com uma parcela de energia na formação dos sinais de EA, provenientes principalmente das trincas.

É visto, através de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), que a menor carga de riscamento (0,5 N) produz regiões dominadas por deformações plásticas entremeadas por regiões de remoção frágil (Fig. 8a) dado provavelmente por deslocamentos de grãos e trincas intragranulares, como pode-se inferir do riscamento em passe único. Ao contrário dessa condição que produz baixos níveis de EA, a carga de 5,0 N produz um risco de remoção mais intensa onde não se nota a presença de mecanismos de deformação plástica e sim de fratura (Fig. 8b), vindo refletir na elevação abrupta dos sinais de EA em poucos passes.

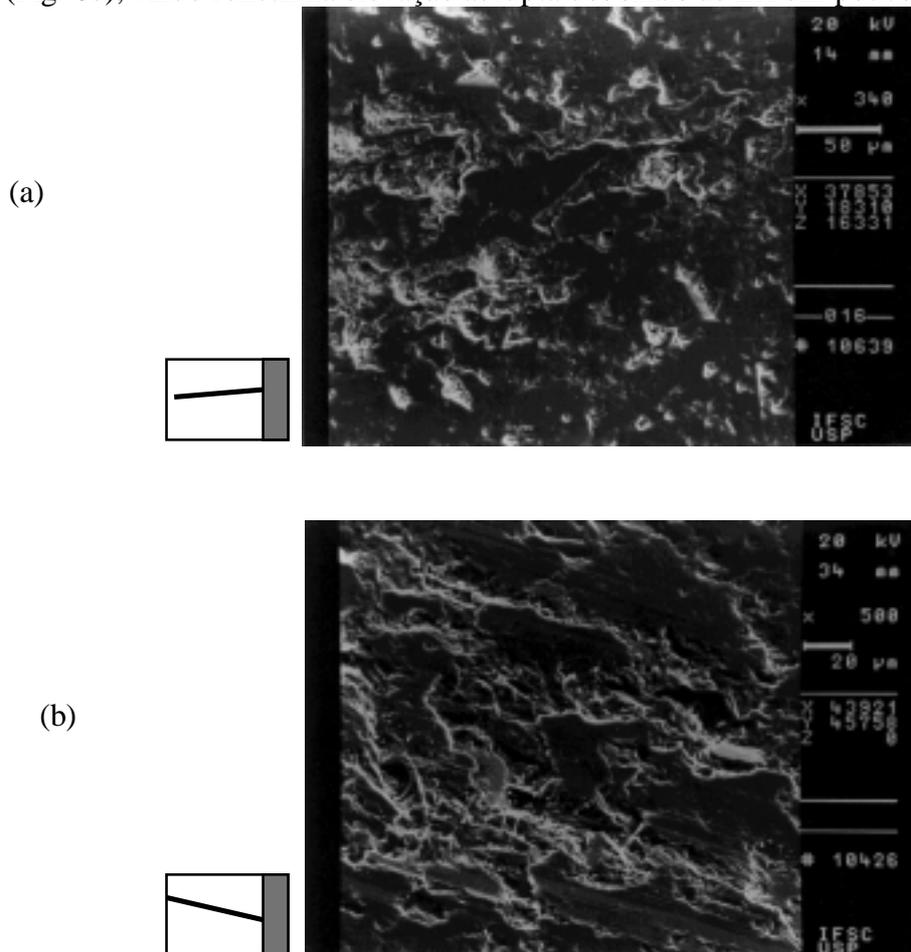


Figura 8 - Riscos feitos sob repetidos passes na alumina com carga de 0,5 N (a) e 5,0 N (b).

Prosseguindo-se este tipo de ensaio, agora utilizando o vidro como corpo-de-prova conseguiu-se com a mesma carga de riscamento (5,0 N) alcançar níveis de EA similares aqueles obtidos na alumina porém mais rapidamente, com menor número de passes (Fig. 9).

A superfície do risco gerada para esta condição de ensaio, mostrada na Fig. 10, revela que a remoção se deu de forma bastante severa, refletindo mais uma vez no sinal de EA.

Ainda com relação ao gráfico da Fig. 9 pode-se observar duas regiões distintas: uma primeira de níveis de EA próximos aos do início do riscamento composta de oscilações dos sinais entre baixas e moderadas; e outra contendo níveis de EA mais elevados e de maiores oscilações. A primeira região é creditada a fase de acúmulo de defeitos devido à formação e propagação de trincas até que estas passam a interseccionarem umas às outras.

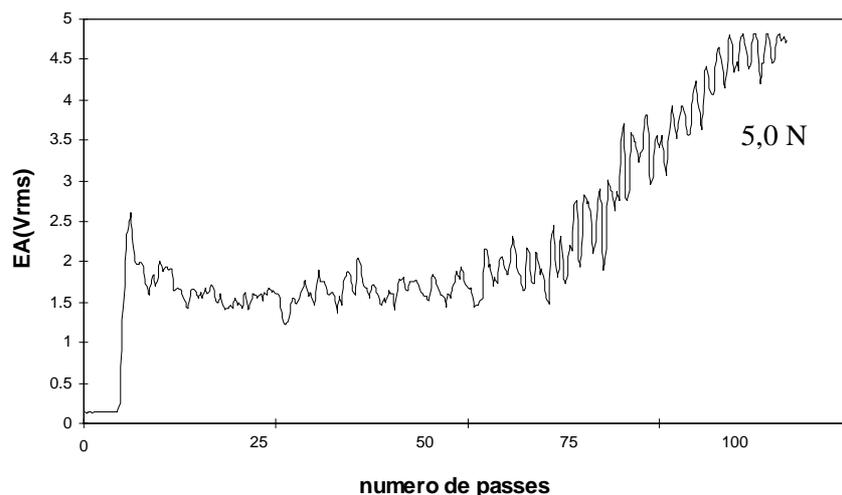


Figura 9 - EA no riscamento do vidro sob repetidos passes.

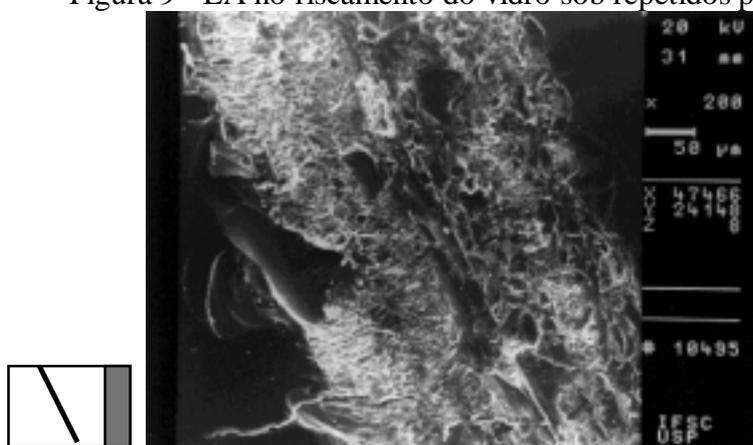


Figura 10 - Risco feito em repetidos passes em vidro sob carga de 5,0 N.

4. CONCLUSÕES

As principais conclusões a respeito deste trabalho podem ser resumidas abaixo:

- (1) O nível de EA e os defeitos aumentam com o aumento da profundidade de riscamento;
- (2) Os maiores níveis de energia de EA correspondem aos maiores defeitos superficiais, presentes nos espectros de frequências mais amplos.
- (3) O nível de EA cresce com o aumento da intensidade da carga de riscamento;
- (4) O nível de EA cresce com o aumento do número de passes devido ao acúmulo de defeitos.
- (5) Os sinais de EA no riscamento de repetidos passes em vidro mostram duas regiões distintas: uma de nível praticamente constante e de oscilações moderadas, correspondente ao acúmulo de defeitos, e uma segunda de crescimento rápido da EA e oscilações maiores, graças ao aumento dos defeitos;
- (6) No vidro as variações dos sinais de EA e os defeitos são maiores do que na alumina, já que no vidro são formadas trincas longas e lascamentos.

REFERÊNCIAS

Bifano, T. G.; Yi, Y., 1992, Acoustic emission as an indicator of material removal regime in glass micromachining. Precision Engineering, v. 14, n. 4, p. 219-228, out., 1992.

- Coelho, R.T.; Sanchez. L.E.A; Oliveira, J.F.G., 1996, An investigation into the behaviour of ceramic materials under scratching test using acoustic emission, Proceedings of the International manufacturing Engineering Conference, Aug. 7-9, pp.41-43.
- Jahanmir, S.; Ives, L. K.,1995, Machining of advanced ceramics. Tribology International, v. 28, n. 6, p. 415-420.
- Malkin, S.; Ritter, J. E., 1989, Grinding mechanisms and strength degradation for ceramics. Journal of Engineering for Industry, v. 111, p. 167-174.
- Momber, A. W.; Kovacevic, R.; Mohan, R. S.,1995, Acoustic emission measurements on brittle materials during abrasive waterjet cutting. Proceedings 1st International Machining and Grinding Conference- SME, Set., p. 441-457.
- Ruff, A. W.; Shin, H.; Evans, C.J.,1995, Damage processes in ceramics resulting from diamond tool indentation and scratching in various environments. Wear,v.181, p. 551-562.
- Strakna, T. J.; Jahanmir, S.; Allor, R. L.; Kumar, K. V.,1996, Influence of grinding direction on fracture strength of silicon nitride. J. Eng. Mat. and Tech., v. 118, p. 335-342.
- Swain, M. V.,1979, Microfracture about scratches in brittle solids. Proceedings Royal Society London, A 366, p. 575-597.
- Tönshoff, H. K., Wobker, H. G.; Lierse, T., 1994, Mechanisms of material removal in the machining of brittle materials. Comunicado técnico do Institute for Production Engineering and machine Tools (IFW), University of Hannover, 6 p.
- Xu, H. H. K.; Jahanmir, S.,1995a, Microfracture and material removal in scratching of alumina. Journal of Materials Science, v. 30, p. 2235-2247.
- Xu, H. H. K.; Jahanmir, S.,1995b, Scratching and grinding of a machinable glass-ceramic with weak interface and rising *T-Curve* J. Am. Cer. Soc., v.78, n.2, p.497-500.
- Xu, H. H. K.; Jahanmir, S.; Ives, L. K.,1996, Material removal and damage formation mechanisms in grinding silicon nitride. Journal of Materials Research, v. 11, n. 7.
- Xu, H. H. K.; Jahanmir, S.; Wang, Y.,1995a, Effect of grain size on scratch interactions and material removal in alumina Journal of the American Ceramic Society, v.78,n.4,p.881-891.
- Xu, H. H. K.; Padture, N. P.; Jahanmir, S.,1995b, Effect of microstructure on material-removal mechanisms and damage tolerance in abrasive Machining of silicon carbide. Journal of the American Ceramic Society, v. 78, n. 9, p. 2443-2448.

INDICATION OF REMOVAL MODE IN ADVANCED CERAMICS BY THE ACOUSTIC EMISSION (AE)

Summary. In this work is presented the behaviour of acoustic emission (AE) in advanced ceramics scratching, taking the alumina 96% as the main representative. In opposition to the advanced ceramics, which has granular structure, it's also used the glass as non-granular ceramic materials. The used alumina is characterized by an irregular microstructure composed by grains of heterogeneous size. Two types of different scratching were carried out using variable depths and constant load. In the first, the parameter principal studied is the scratching depth whereas the second is load and accumulated damage effect due the repeated passes on the same track. As a result, it was observed that AE signals and time-frequency analysis is commensurate with the damages in the material. Also is shown that there are differences in the AE signals of the scratches made in alumina and the glasses, due to the different removal mechanisms associated with the structure of these materials. It is still observed an increase of AE signal level with the gradative increase of the number of repeated passes due to the accumulation of damages in the material.

Keywords: Advanced ceramics, scratching, acoustic emission, removal, cracks.