



Acta Scientiarum. Technology

ISSN: 1806-2563

eduem@uem.br

Universidade Estadual de Maringá
Brasil

Pereira Rodrigues, Jean Robert; Cruz, Claudionor; Domingues Franco, Sinésio; Pereira Rodrigues, José Roberto; de Assunção, Wellinton
Avaliação da geração de microtrincas do aço rápido ABNT M2 no processo EDM com adição de SiC
Acta Scientiarum. Technology, vol. 30, núm. 2, 2008, pp. 173-179
Universidade Estadual de Maringá
Maringá, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226522007>

- Como citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Avaliação da geração de microtrincas do aço rápido ABNT M2 no processo EDM com adição de SiC

Jean Robert Pereira Rodrigues^{1*}, Claudionor Cruz², Sinésio Domingues Franco², José Roberto Pereira Rodrigues³ e Wellinton de Assunção¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Estadual do Maranhão, Av. Lourenço Vieira da Silva, s/n, 65055-310, Tiriçal, São Luís, Maranhão, Brasil. ²Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. ³Departamento de Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: jrobert@cct.uema.br

RESUMO. É sabido que a Usinagem por Descargas Elétricas (EDM) é um processo térmico em que pode haver temperaturas muito elevadas (superiores a 1.200°C) na região de usinagem. Consequentemente é fácil de entender o fato de as peças usinadas por EDM apresentarem camadas superficiais endurecidas, refundidas e com elevado número de microtrincas superficiais. A formação de microtrincas está associada com o desenvolvimento de altas tensões térmicas que excedem a tensão máxima de resistência do material. Além disso, as microtrincas superficiais penetram em profundidade com extensões que dependem da energia de descarga. O trabalho proposto tem por objetivo estudar o efeito da adição de pó de SiC em vários fluidos dielétricos, sobre a geração de microtrincas superficiais, no aço rápido ABNT M2, durante a usinagem por descargas elétricas. Os resultados apresentados mostram redução da quantidade de microtrincas nas superfícies usinadas, quando se adiciona pó de SiC ao dielétrico, quando comparadas com as usinadas com EDM convencional.

Palavras-chave: usinagem por descargas elétricas, fluido dielétrico, pó de SiC, crateras, geração de microtrincas.

ABSTRACT. Evaluation of microcrack formation of ABNT M2 high speed steel in the EDM process, with addition of silicon carbide powder. It is known that Electrical Discharge Machining (EDM) is a thermal process in which extremely high temperatures (in excess of 1200°C) can occur in the machining area. Consequently, it is easy to understand that during each electric discharge, high temperatures are generated, causing local fusion or even evaporation of the machined material. In each discharge, a crater is formed in the material and a small crater is formed in the electrode. Of every melted material produced in each discharge, only 15% or less is removed using dielectric fluid. The remaining melted material solidifies, forming a wrinkled surface. The characteristics of the obtained surface – overlap of craters, globules of sillage, chimneys, bubbles (formed when the gases arrested are liberated through the resolidified material) – are revealed through an analysis using a scanning electron microscope. The proposed work has as its objective to study the effect of the addition of SiC powder into several dielectric fluids, on microcrack formation of high-speed steel (ABNT M2), during electrical discharge machining. The results show that the samples machined with the addition of SiC powders presented significant reduction in the number of microcracks in the machined surface, when compared with those machined with conventional EDM.

Key words: electrical discharge machining, dielectric fluids, powder of SiC, craters, microcrack formation.

Introdução

A usinagem por descargas elétricas, ou Electrical Discharge Machining (EDM), ou ainda Usinagem por Eletroerosão, é um processo adequado para usinagem de formas complexas em materiais condutores elétricos, principalmente para aqueles de alta dureza, difíceis de serem usinados por processos tradicionais. De acordo com Cruz (1989), as maiores aplicações do processo estão na fabricação de

matrizes para estampagem, forjamento, extrusão, feixes para trefilação, moldes de plástico, enfim, para o setor de ferramentaria em geral.

Novas tecnologias vêm sendo empregadas em diversos campos da fabricação. Uma dessas afeta diretamente o desempenho do processo EDM e, sem dúvida, tem ganhado grande impulso no início do século XXI. Trata-se da adição de pós-metálicos ao fluido dielétrico.

Segundo Benedict (1987), várias são as vantagens desta nova tecnologia, como: alta Taxa de Remoção de Materiais (TRM), bom acabamento superficial, alta relação de área usinada versus acabamento superficial, alta estabilidade do processo na geração dos pulsos de descargas, superfícies resistentes à corrosão e mesmo ao desgaste.

Segundo Rodrigues (2006), há questionamento com relação ao processo EDM, no que diz respeito à textura e à integridade superficial das peças usinadas. Recomendam-se posteriores processos de usinagem para eliminação de camadas superficiais pobres em propriedades mecânicas, como, por exemplo, usinagem eletroquímica (ECM), ou mesmo processos tradicionais de usinagem, como o polimento.

Investigações feitas por Kobayashi (1995) confirmam que não só a adição de pó de silício, mas também de tungstênio e outros no fluido dielétrico aumenta o desempenho do processo EDM, reduzindo a camada superficial afetada pelo calor. Consequentemente, a superfície usinada experimenta uma melhoria da resistência à corrosão e pode, ainda, ter enriquecimento de carbono. Com a adição de pós como, por exemplo, o silício, observa-se queda na rugosidade superficial, que era conseguida somente com inversão de polaridade e com a elevação da frequência de descargas elétricas.

Baseado nas investigações acima, acredita-se que a adição de carboneto de silício no fluido dielétrico torne também o campo elétrico mais uniforme, permitindo que as descargas elétricas sejam mais bem distribuídas ao longo da região a ser usinada. Esse fato poderá assegurar remoção uniforme de material ao longo da superfície a ser usinada, gerando, ainda, menor quantidade de microtrincas e, portanto, uma superfície com poucas imperfeições.

Como atualmente muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas visando estudar o efeito da adição de pós no processo EDM, houve a idéia de pesquisar tal assunto, já que os trabalhos citados anteriormente pelos autores apresentam resultados bastante satisfatórios. Os materiais usinados com tal mistura apresentaram excelentes características metalúrgicas e tornaram-se mais confiáveis em suas aplicações, quando comparados com similares obtidos por EDM convencional. O objetivo principal desta pesquisa é estudar o efeito da adição de pó de carboneto de silício (SiC) em vários fluidos dielétricos, sobre as microtrincas produzidas na camada superficial durante a usinagem por EDM do aço-rápido ABNT M2 em regime de desbaste. A escolha deste aço se deve ao fato de ser bastante utilizado em ferramentas de corte, e sua aplicação só não é maior por causa de sua baixa usinabilidade por

processos tradicionais de usinagem. Apesar de ser um aço facilmente usinado por EDM, a integridade da superfície usinada, no entanto, fica comprometida, com formação de indesejáveis camadas refundidas e microtrincas superficiais.

Considerações gerais sobre o processo EDM com adição de pó

Kobayashi (1995) descobriu que se podem gerar áreas especulares relativamente grandes (acima de 10 cm²) na operação de acabamento, ao se utilizar um eletrodo de silício no processo de usinagem por descargas elétricas. O mesmo autor apresentou resultados ao mostrar que a adição de pó de silício no fluido dielétrico promove superfície especular com uma área acima de 500 cm². A Figura 1 ilustra a relação da rugosidade superficial média (R_a) e a área usinada. Observa-se que a rugosidade superficial (R_a) gerada por processo de usinagem por descargas elétricas com fluido misturado com pó de silício quase não aumenta mesmo com o aumento da área usinada.

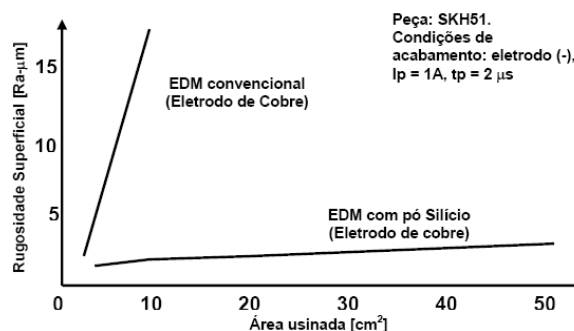


Figura 1. Relação entre a rugosidade superficial média (R_a) e a área usinada.

Fonte: Kobayashi *et al.* (1989).

Segundo esse autor, a tendência acima se baseia na larga dispersão das descargas sobre a peça. Esta dispersão está relacionada com o *gap* (distância entre o eletrodo-ferramenta e a peça), que se torna grande pela mistura do pó de silício no fluido dielétrico. O *gap*, relativamente grande, garante descargas elétricas estáveis e, consequentemente, dispersas sobre uma extensa área da peça. A Figura 2 apresenta a relação entre a distância do *gap* e a dispersão das descargas. O processo de usinagem por descargas elétricas com fluido misturado com pó de silício permite maior dispersão das descargas, além de reduzir a capacitância no *gap* pelo aumento do seu comprimento em, aproximadamente, cinco vezes em relação à EDM convencional, tornando a superfície mais polida. Kobayashi *et al.* (1989) mencionam, ainda, que no caso de operações de acabamento com o fluido convencional, a distância entre eletrodo e peça é tão pequena que descargas anormais ocorrem várias vezes.

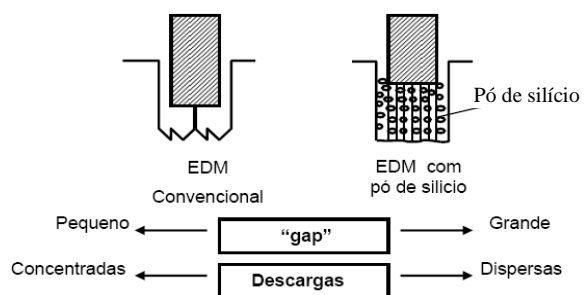


Figura 2. Relação entre o gap e a dispersão das descargas.
Fonte: Kobayashi et al. (1989).

Na Figura 3, apresenta-se o diagrama esquemático da distância entre o eletrodo e a peça quando ocorre a descarga de único pulso sugerida por Okada e Uno (1997). Na figura, é apresentado que o gap teve comprimento de $92\ \mu\text{m}$ ao se utilizar o fluido misturado com pó de silício, enquanto que, para querosene, a distância foi de $17\ \mu\text{m}$ sob as mesmas condições (voltagem de 90 V, corrente da descarga de 3 A, pulso de $2\ \mu\text{s}$), isto é, pela diferença de resistividade dos fluidos dielétricos e também pela influência de detritos em movimento no gap. Portanto, o impacto da força ocorre pelas diferenças de descargas elétricas, que diferem entre os dois casos por causa da diferença no gap.

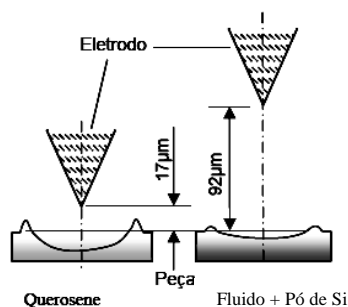


Figura 3. Diagrama esquemático do gap.
Fonte: Okada e Uno (1997).

Kobayashi (1995) destacam que a obtenção de uma superfície bem acabada por EDM é dificultada quando a área do eletrodo se torna grande. Isto se deve à alta capacidade eletrostática da área entre o eletrodo e a peça. Constatou-se efetiva solução para este problema, pelo uso de eletrodo de silício sinterizado. Este método produz uma superfície finamente acabada e altamente resistente à corrosão e ao desgaste. Porém, como o Si é muito duro e frágil, torna-se difícil a fabricação de um eletrodo-ferramenta. O próprio autor afirma que a adição de silício no fluido dielétrico é uma solução viável, levando-se em consideração o fato de haver grande quantidade de pó de silício fora do eletrodo na região do gap. Este afeta o acabamento, mesmo com o uso de eletrodo de cobre.

Constatou-se pelos resultados dos experimentos realizados por Kobayashi (1995) que a utilização de diversos tipos de pós, tais como silício, alumínio e grafite, adicionados em um óleo hidrocarbono, é bastante efetiva no sentido de se conseguir um fino acabamento em curto tempo de usinagem. Pós de alumínio e grafite produzem superfície mais uniforme do que silício, nas mesmas condições de usinagem. Comprovou-se que a dispersão de corrente de descargas é maior por toda área do eletrodo na qual possa estar o fluido misturado com pós. Isso torna o processo EDM com pós adicionados ao fluido altamente atrativo na indústria, uma vez que superfícies com melhores características técnicas podem ser obtidas.

Material e métodos

Por este trabalho ser desenvolvido aplicando-se eletrodo de cobre durante o processo de usinagem por descargas elétricas, mencionam-se, na Tabela 1, algumas características específicas dos bits de aço rápido, que serão de fundamental importância para compreensão deste trabalho. As vistas lateral e frontal da peça de aço rápido ABNT M2 são apresentadas na Figura 4.

Tabela 1. Características específicas da peça de aço rápido ABNT M2.

Ponto de Fusão (°C)	Ponto de Ebulição (°C)	Resistividade de Elétrica ($\mu\Omega\text{m}$)	Modulo de Elasticidade (N mm^{-2})	Utilização	Custo	Acabamento superficial
1.083	2.580	0.017	124×10^3	Larga	Baixo	Preciso

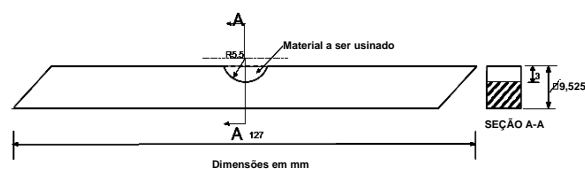


Figura 4. Configuração da geometria da peça usinada (aço rápido ABNT M2).

Foram utilizadas também peças de aço rápido ABNT M2, da marca Tool master (chamadas de Bits), com a seguinte composição química: 0,85% de Carbono; 4,30% de Cromo; 1,90% de Vanádio; 6,40% de Tungstênio e 5,00% de Molibdênio; segundo o fabricante, sua dureza varia de 64 a 66 RC. Entretanto, testes realizados, em 27 amostras, apresentam dureza média de 60 HRC, com desvio-padrão de 4,0 pontos. A escolha desse material se deve ao fato de ser largamente utilizado na fabricação de ferramentas e, principalmente, por ser considerado material de difícil usinagem por processos convencionais de usinagem.

O material utilizado foi adquirido na forma de barras de secção quadrada de 9.525 mm de lado e comprimento de 127 mm. Quanto à procedência, o material utilizado foi fabricado pelo fornecedor Avibas e beneficiado por Tool Master Ind. Metalúrgica Ltda.

O motivo para a fabricação da geometria do eletrodo-ferramenta apresentado na Figura 5 está diretamente relacionado com a lavagem, isto é, a circulação da mistura entre o eletrodo e a peça. A injeção do dielétrico por dentro do eletrodo, associada com o mecanismo de avanço e retrocesso ultra-rápido da máquina, permite a obtenção de condições de limpeza adequadas, que são essenciais para obter melhores rendimentos durante a usinagem dos *bits*. Outra colocação importante é que a conicidade existente, na extremidade do eletrodo, permite que os resíduos provenientes da usinagem passem lateralmente pela zona de trabalho entre o eletrodo e a peça.

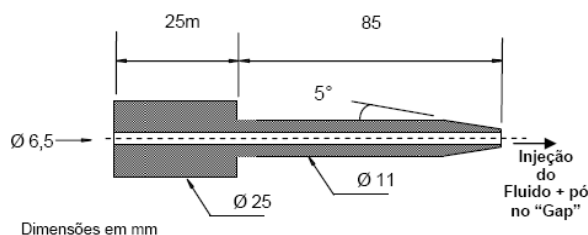


Figura 5. Representação esquemática do eletrodo-ferramenta de cobre.

Foram utilizados, ainda, pós de silício e carboneto de silício com granulometrias de: 220, 400, 600, 1.000 e 2.000 mesh.

Os equipamentos de agitação da mistura, eletrodo e porta-eletrodo foram projetados com o objetivo de permitir uma uniformidade na mistura (*pós + dielétrico*), uma concentração apropriada e também o modo de adição do pó no *gap* durante a usinagem dos *bits*. Nesta fase preliminar, denominada de pré-testes, foram utilizados querosene, SiC em pó com granulometrias de 200, 400, 600, 1.000 e 2.000 mesh e Si com granulometria 200 mesh (massa de 1.080 variando de acordo com a concentração), volume de dielétrico de 36 L, concentrações de 15, 30 e 60 g L⁻¹. Ao final desta fase, adotaram-se os parâmetros rugosidade média (Ra), relação de desgaste e TRM; verificaram-se as características da superfície usinada com pós de silício e Carboneto de silício. Para isso, foram levantados gráficos e tabelas que, depois de analisados, permitiram adotar os parâmetros que

foram de fundamental importância para serem aplicados nos testes definitivos. Os resultados dos testes preliminares são mostrados com maior detalhe na dissertação de Fernandes (1999).

Os parâmetros finais que permitiram obter bons resultados nos testes preliminares foram aplicados nos testes definitivos, em que podem ser citados: concentração = 30 g L⁻¹, granulometria = 600 mesh (15 μ m), vazão = 76,92 mL s⁻¹, volume de dielétrico = 36 L e massa = 1.080 g de SiC, além de serem utilizados três óleos hidrocarbonos de procedência industrial, citados em todo o texto como óleos A, B e C, identificados na lista de símbolos e cujas características são apresentadas na Tabela 2. Para as condições acima, conseguiu-se chegar a um ponto ideal de usinagem no qual foi fixada a condição de corte: tensão de 60 V, corrente de 25 A, Ton de 200 μ s e Toff = 10 μ s.

Tabela 2. Propriedades químicas dos fluidos dielétricos identificados por seus respectivos fabricantes e usados nos ensaios definitivos para usinagem no regime de desbaste do aço rápido ABNT M2.

Fluidos dielétricos	Viscosidade cSt a 40 °C	Massa específica ρ cm ⁻³	Ponto de Fugor °C
Óleo A	4,1	0,873	150
Óleo B	1-2	0,76-0,82	150-300
Óleo C	3,7-4,7	0,836-0,933	min. 104

As condições de corte adotadas para o regime de desbaste, na usinagem das peças de aço rápido ABNT M2 com eletrodo-ferramenta de cobre eletrolítico, podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3. Condições de corte adotadas para usinagem do aço rápido ABNT M2 com eletrodo-ferramenta de cobre eletrolítico no regime de desbaste.

Regime	Tensão (V)	Corrente (A)	Ton (μ s)	Toff (μ s)
Desbaste	60	25	200	10

A variável SiC foi convertida em um parâmetro, visando estudar o efeito microestrutural e mecânico sofrido pelo aço ABNT M2, quando usinado por descargas elétricas. Portanto, granulometria, concentração, homogeneidade de mistura, forma de adição, vazão, volume e massa de SiC foram fixados durante os testes.

O objetivo principal, após o desenvolvimento do agitador, era fornecer a mistura dielétrico mais pó na vazão pré-escolhida de forma homogênea, além de uma concentração adequada, bem como o modo de adição do pó de SiC, permitindo que os pós em suspensão atuassem ao redor das descargas elétricas,

direcionando-as na região do *gap* durante a usinagem, e que o arco elétrico se comportasse o mais uniforme possível em todos os testes. A Figura 6 ilustra, respectivamente, um esquema do sistema de agitação com seus componentes e o posicionamento da cuba auxiliar dentro da cuba da máquina de eletroerosão. Outros objetivos para construção do misturador foram: não utilizar o circuito dielétrico da máquina de modo a não danificá-lo com a contaminação dos pós adicionados aos dielétricos e utilizar apenas uma pequena quantidade de fluido, já que o reservatório da máquina comporta cerca de 420 L.

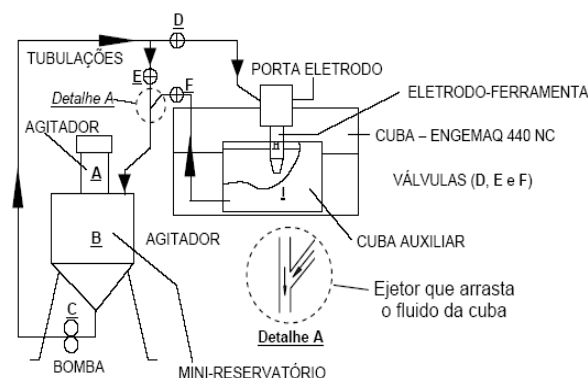


Figura 6. Equipamento auxiliar de Agitação para testes com adição de pó.

Resultados e discussão

A Figura 7 ilustra como as microtrincas se propagam na superfície. É possível observar que as microtrincas não se limitam apenas à camada de material refundido, mas estendem-se até a zona afetada pelo calor e, em alguns casos, atingem o material-base. Além de trincas verticais, nota-se a presença de trincas subsuperficiais, localizadas tanto dentro da camada refundida quanto dentro do material base (exemplo: Figuras 7A e C). As microtrincas subsuperficiais apresentam-se normalmente associadas às trincas de tração (verticais). Outro aspecto a ser notado é o fato de que as trincas verticais, muitas vezes, estarem associadas a defeitos tais como bolhas ou vazios (exemplo: Figuras 7A, C e F).

O efeito da adição de pó de SiC é, todavia, notório na densidade de microtrincas. Em todos os dielétricos, houve redução da densidade linear de microtrincas.

Comparando-se os gráficos das Figuras 8 e 9 seguintes, pode-se afirmar que as amostras de aço rápido ABNT M2, usinadas com a mistura (óleo C +

SiC), apresentaram microtrincas com comprimento médio bastante elevado. Por outro lado, foram observados valores relativamente baixos na densidade de microtrincas.

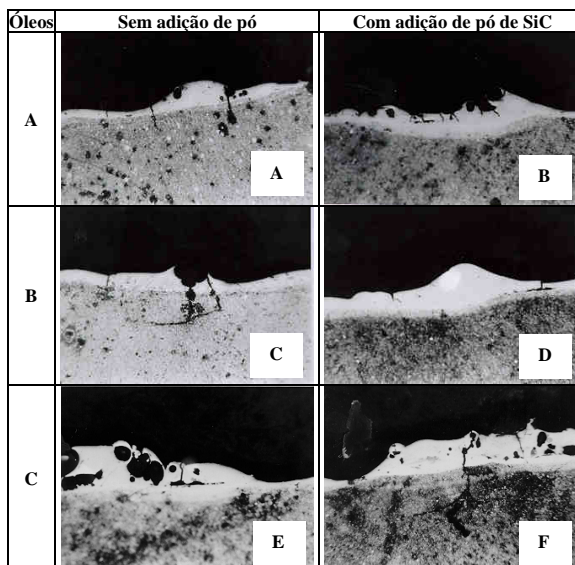


Figura 7. Seção transversal da superfície usinada do aço rápido ABNT M2 por EDM com os fluidos dielétricos A, B e C, obtida por MO e atacada com Nigreen.

Pela análise detalhada do gráfico da Figura 8, percebe-se que as amostras usinadas com pó de SiC adicionado no fluido dielétrico A apresentam microtrincas com comprimento médio em torno de $15,9 \mu\text{m}$, com desvio-padrão de $8,0 \mu\text{m}$, portanto, inferior quando comparadas até mesmo com amostras usinadas com adição de pó, como, por exemplo, a mistura (óleo C + SiC em pó), em que essas apresentavam comprimento médio de $23,0 \mu\text{m}$ e desvio-padrão de $16,5 \mu\text{m}$.

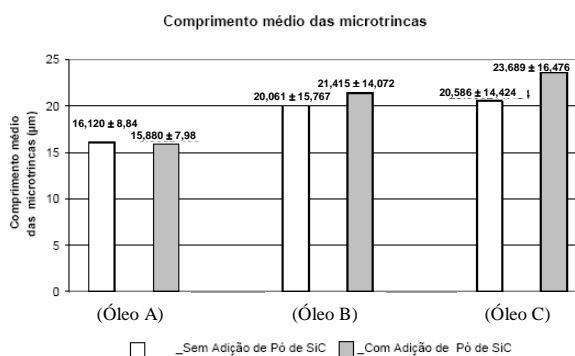


Figura 8. Comprimento médio das microtrincas ao longo da superfície usinada.

Sob o aspecto de microtrincas, o fluido dielétrico A, com adição de SiC, representa

alternativa atraente para a usinagem do aço rápido ABNT M2.

As trincas geradas, durante processo EDM, no aço rápido ABNT M2, podem ainda circundar as crateras e bolhas do material refundido e ressolidificado. Segundo Pandey e Shan (1985), essas microtrincas têm suas profundidades e extensões determinadas pela energia de descarga. As superfícies apresentadas anteriormente se mostram também bastante semelhantes às observadas por Kremer *et al.* (1997). Este autor afirma, nos seus trabalhos, que o desenvolvimento das microtrincas está relacionado com o surgimento de elevadas tensões térmicas que superam a tensão máxima de resistência do material.

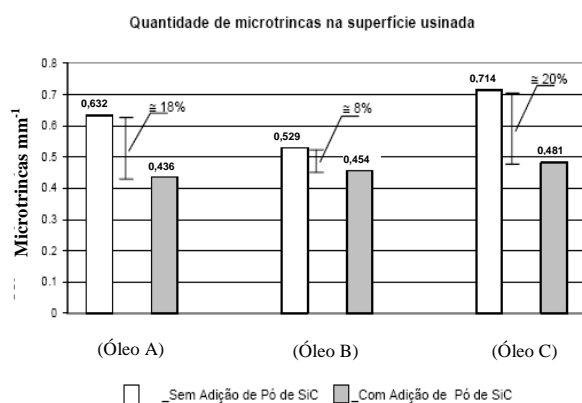


Figura 9. Quantidade de microtrincas por milímetro da superfície usinada.

Por meio da Figura 8, nota-se ainda a existência de grandes desvios-padrão do comprimento das trincas em relação aos valores médios. Isso pode ser notado na Figura 7A, na qual são observadas trincas com grandes diferenças de tamanho. Nota-se também tendência de aumento do comprimento das trincas ao se passar do dielétrico A para o B, e deste para o C. Ademais, percebe-se que a adição de pó de SiC no fluido dielétrico A obteve valores relativamente baixos, mas, no contexto geral, observa-se que a adição de pós não conduziu a reduções significativas no comprimento médio das microtrincas.

A Tabela 4 apresenta os valores da altura média da camada de material fundido e redepositado sobre a superfície, além da espessura média da zona afetada pelo calor com e sem adição de SiC em pó. Os efeitos da adição de pó de SiC sobre essas camadas foram analisadas por Fernandes (1999).

Tabela 4. Espessura média das camadas superficiais e subsuperficiais e zona afetada pelo calor (ZAC) sobre a superfície usinada do aço rápido ABNT M2, com e sem adição de SiC no fluido dielétrico no regime de desbaste (Unidade: μm).

Óleo		Camada Refundida	Camada Branca	Camada Revenida	ZAC
A	S/ pó de SiC	43,27	22,87	12,98	28,61
	C/ pó de SiC	44,27	14,85	13,31	34,1
B	S/ pó de SiC	38,14	14,02	15,88	43,82
	C/ pó de SiC	30,79	7,86	12,23	28,56
C	S/ pó de SiC	42,24	19,53	16,2	45,62
	C/ pó de SiC	40,55	6,47	16,98	42,16

Fonte: Fernandes (1999).

Conclusão

Os testes realizados com e sem adição de pó de SiC no fluido dielétrico, na usinagem de barras de aço rápido ABNT M2 pelo processo EDM, permitem que sejam obtidas as seguintes conclusões:

- existe ligeira tendência de aumento no comprimento médio das microtrincas, quando se usina com fluidos dielétricos na sequência A, B e C. Associado a isso, percebe-se que a adição de SiC no fluido dielétrico não conduziu a reduções significativas no comprimento médio, quando comparada com EDM convencional. Por outro lado, a ação do SiC foi mais evidente na densidade de microtrincas, obtendo-se valores relativamente baixos e próximos entre si em relação à EDM convencional;

- as amostras de aço rápido ABNT M2 usinadas com a mistura (óleo C + SiC) apresentaram os maiores valores de comprimento médio de microtrincas. Por outro lado, observaram-se, nessa configuração, as menores densidades de microtrincas;

- na usinagem com fluido dielétrico A sem adição de pó, foi constatado que a maioria das microtrincas se faz presente na ZAC. Em casos isolados, essas trincas estendem-se até o material base. Já com adição de pó de SiC, constatou-se situação semelhante, porém essas microtrincas não atingem o substrato;

- na usinagem com fluido dielétrico B, as microtrincas geradas são bem maiores, quando comparadas com as obtidas por meio do dielétrico A. Associado ao fato de que a ZAC no dielétrico B sem adição de pó é menor do que a obtida por A, isso levou à formação de maior quantidade de microtrincas que atingiram o substrato;

- nas superfícies usinadas por EDM convencional com o dielétrico C, um número elevado de microtrincas está contido na camada material fundido, ou até mesmo na ZAC. Por outro lado, ao se usinar com adição de SiC, essas microtrincas podem atingir o substrato;

- na usinagem com a mistura (óleo A + pó), as microtrincas apresentaram comprimento médio em torno de $15,9 \mu\text{m}$, com desvio-padrão de $8,0 \mu\text{m}$; um comprimento médio, portanto, inferior, quando comparadas até mesmo às demais amostras usinadas com adição de pó, como, por exemplo, a mistura (óleo C + SiC em pó), em que apresentaram comprimento médio de $23,0 \mu\text{m}$ e desvio-padrão de $16,5 \mu\text{m}$;

- o fluido dielétrico A com SiC é o mais indicado para a usinagem do aço rápido ABNT M2, devido aos aspectos positivos que este promoveu sobre as microtrincas superficiais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes e ao CNPq, pelo suporte financeiro na forma de bolsa; à Liasa S/A, pela doação do Silício em pó; à Mitsubishi Materials Corporation, pelo fornecimento de material didático para disciplinas do curso de Engenharia Mecânica.

Referências

BENEDICT, G.F. *Nontraditional manufacturing process*. New York: Marcel Dekker, 1987.

CRUZ, C. Análise da usinagem do aço-villares: VC-131 para matrizes com diferentes térmicos no processo de usinagem por eletroerosão. In: COBEM, 10., 1989, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABCM, 1989. p. 5.

FERNANDES, L.A. *Efeito da adição de SiC em pó no fluido dielétrico, sobre o desempenho da usinagem por descargas elétricas*

do aço-rápido ABNT M2. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1999.

KOBAYASHI, K. *et al.* *EDM by powder-suspended working fluid*. Nagoya: Toyota Technological Institute and Mitsubishi Electrical Corporation, 1989.

KOBAYASHI, K. The present and future technological developments of EDM and ECM. ISEM. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR ELECTROMACHINING, 11., 1995, Lausanne. *Proceedings...* Lausanne/Suíça. 1995. p. 121.

KREMER, D. *et al.* Quantificação da integridade das superfícies. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECÁNICA – CIDIM'97, 3., 1997, La Habana. *Anais...* La Habana: Instituto Superior Politécnico Jose Antonio Echeverria, 1997. p. 38.

OKADA, A.; UNO, Y. Surface generation mechanism in electrical discharge machining with silicon powder mixed fluid. *Int. J. Electrical. Machin.*, Japan, v. 25, n. 2, p. 48-52, 1997.

PANDEY, P.C.; SHAN, H.S. *Modern machining process*. New Delhi: McGraw Hill, 1985.

RODRIGUES, J.R.P. *et al.* Efeito da adição de carboneto de silício em pó na topografia da superfície usinada por descargas elétricas do aço rápido ABNT M2. In: CONEM, 4., 2006, Recife. *Anais...* Recife: ABCM, 2006. p. 115.

Received on December 07, 2007.

Accepted on July 15, 2008.