

Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão

Luciano José Arantes

M. Sc., Univ. Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica. E-mail: ljarantes@mecanica.ufu.br

Márcio Bacci da Silva

Dr., Univ. Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica. E-mail: mbacci@mecanica.ufu.br

Evaldo Malaquias da Silva

Dr., Univ. Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica. E-mail: emalaqui@mecanica.ufu.br

Alberto Arnaldo Raslan

Dr., Univ. Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica. E-mail: ltm-raslan@ufu.br

Resumo

O processo de Usinagem por Descargas Elétricas é muito utilizado na usinagem de materiais de elevada dureza, difíceis de serem usinados por processos convencionais, além de permitir a confecção de geometrias bem complexas e de dimensões diminutas. O objetivo principal desse trabalho é o estudo das superfícies usinadas pelo processo EDM com diferentes tipos de fluidos dielétricos em três regimes de usinagem.

Os diversos fluidos dielétricos utilizados possibilitam diferentes condições de usinagem e muito pouco se sabe sobre qual o fluido mais indicado para operações de acabamento ou desbaste. Foram feitos ensaios com cinco tipos diferentes de fluidos dielétricos e com uma ferramenta cilíndrica vazada de cobre eletrolítico. Verificou-se que há diferenças importantes quando usina-se com fluidos diferentes, mantendo-se constantes todas as demais condições de operação, embora todos os fluidos, com exceção do querosene, são vendidos como se fossem exatamente iguais entre si, o que se mostrou falso. Porém a maior conclusão desse trabalho foi a de que o querosene, apesar de ser até três vezes mais barato que os demais fluidos, apresentou piores acabamentos superficiais com grande formação de bolhas durante o processo, pois sua menor densidade confere também excessiva evaporação durante a usinagem, o que acabou por conferir uma superfície muito irregular e com muita porosidade e presença de microtrincas, além de maiores riscos ao operador.

Palavras-chave: EDM, Fluidos Dielétricos, Topografia e Rugosidade.

Abstract

The Electrical Discharge Machining process is very useful while machining very hard materials, which are very difficult to be machined by traditional process, while can make complex geometries and minimum dimensions. One of the materials that are very used in this process is high-speed steel (ABNT M2), which is very hard and has a high mechanical resistance. This work has as main objective the study of performance of different dielectric fluids used in EDM in three different pre chosen set-ups of work in terms of metal removal rate (MMR) and wear ratio (WR), roughness parameter (Ra), then discuss and analyze the most important factors that can produce different performance when machining with this process. Have been done five tests with different types of dielectric fluids using a cooper tool. Can be noticed that occurred very important different performance between the fluids, which all the other conditions of operation were unchanged. When using such a fluid the workpiece presented less roughness and a higher MMR in some cases. In other cases, a higher MMR produced in the other hand a Recast Layer less uniform. However, the most important conclusion of this work is about kerosene, which costs 3 times less than the specific dielectric fluids for EDM, presented worst finishing surfaces and not too high MMR as expected, despite all the risks for the operator.

Keywords: EDM, Dielectric Fluids, MRR, Topography and Roughness.

1. Introdução

A usinagem por descargas elétricas, ou EDM (*Electrical Discharge Machining*), ou, como é conhecida ainda na indústria, usinagem por eletroerosão, é um processo indicado na usinagem de formas complexas em materiais condutores elétricos, especialmente aqueles de alta dureza, difíceis de serem usinados por processos tradicionais. Suas maiores aplicações são: fabricação de matrizes para estampagem, forjamento, feiras para trefilação, extrusão, moldes de plástico, enfim, para o setor de ferramentaria em geral (Cruz, 1999).

O fluidos dielétricos especificamente desenvolvidos para o processo EDM são óleos hidrocarbonetos altamente refinados ou sintéticos. Existem inúmeras características físicas e químicas que podem ser usadas para definir e identificar o desempenho de cada fluido. Nesse trabalho serão abordadas as características mais importantes no processo, mais aquelas que são fornecidas pelos fabricantes, já que não se trata de um trabalho com análises químicas, mas, sim, de desempenho (Intech EDM, 1996).

As características físico-químicas dos fluidos para EDM podem ou não influenciar o desempenho do processo. Entre as características que têm influência decisiva estão: resistividade dielétrica, viscosidade, ponto de fulgor, estabilidade à oxidação. Outras características com pouca ou nenhuma influência no desempenho do processo são: odor, cor e ponto de fluidez. Atualmente, um fator importante quanto à escolha do fluido é a segurança quanto ao armazenamento e uso nas operações de EDM. Um fluido pode apresentar características químicas que proporcionam elevada qualidade no acabamento da superfície usinada e altas Taxas de Remoção de Material (TRM), mas ser nocivo à saúde do operador. A questão da qualidade do ambiente de trabalho e da saúde ocupacional deve ser levada em consideração devido à legislação ambiental e trabalhista, uma vez que os fluidos dielétricos mais tóxicos podem causar problemas sérios de dermatites e intoxicações pela inalação do produto evaporado (Intech EDM, 1996).

O principal objetivo desse trabalho é discutir e analisar alguns dos fatores mais importantes que influenciam no processo de usinagem por descargas elétricas, e, além disso, o de avaliar o desempenho de alguns fluidos dielétricos comerciais no Brasil, suas características e possíveis aplicações, já que existem poucos trabalhos relacionados especificamente ao estudo dos fluidos dielétricos.

A principal justificativa para realização desse trabalho se baseia no fato de existir a necessidade de uma literatura voltada para a indústria no sentido de orientar qual o fluido dielétrico mais indicado para cada aplicação (acabamento, desbaste, semi-acabamento, tipo diferente de material). Isso se comprovou durante a procura por artigos sobre o assunto, onde foi grande a dificuldade de se encontrarem trabalhos restritos ao uso do fluido dielétrico na usinagem por eletroerosão. Alguns trabalhos foram realizados quanto ao estudo do desempenho de fluidos dielétricos, porém com adição de pó de carboneto de silício, realizados por Fernandes, 1999, e Rodrigues, 1999, o que não será realizado nesse trabalho. Portanto espera-se que esse trabalho contribua tanto para a indústria quanto para orientação de novos estudos acadêmicos.

2. Fluido dielétrico

O fluido dielétrico é muito importante para o desempenho do processo EDM, pois atua diretamente em vários aspectos da usinagem. Conforme Fuller (1989), o fluido dielétrico tem um papel fundamental no processo: controlar a potência de abertura da descarga. O fluido pode ser querosene, hidrocarbono aditivado - ambos derivados do petróleo - água deionizada e até mesmo certas soluções aquosas. Ele exerce duas outras funções no processo: promove a lavagem da interface ferramenta-peça (*gap*), arrastando para fora as partículas erodidas, e auxilia no arrefecimento do sistema, nas vizinhanças das descargas. O arrastamento adequado é muito importante para o desempenho otimizado do processo, sendo o grande responsável pela presença de uma camada refundida mais ou menos profunda. A capacidade de arrefecimento influencia também no

desempenho do processo, pois uma capacidade adequada permite um resfriamento relativamente rápido das partículas erodidas, evitando-se, assim, um aumento de partículas que voltarão a se solidificar e integrar o material constitutivo da camada refundida, o que acaba por ser muito prejudicial à integridade superficial da peça.

2.1 Principais propriedades dos fluidos dielétricos

Para bem cumprir suas funções, o fluido dielétrico deve ser avaliado principalmente em relação às seguintes propriedades:

- **Rigidez dielétrica:** Rigidez Dielétrica, ou Resistividade Dielétrica é uma medida da capacidade de insulação de um dado fluido para EDM. Maior rigidez dielétrica implica menor distância entre ferramenta-peça, com o conseqüente aumento da precisão da usinagem.
- **Tempo de deionização:** Um dos fatores que implicam altas TRMs é o tempo de deionização. Esse refere-se ao tempo para íons e elétrons se recombinarem depois de uma descarga. Quanto menor é o tempo de deionização, menor é o tempo T_{off} necessário entre os pulsos subseqüentes. Essa característica faz com que se evitem curtos-circuitos.
- **Viscosidade:** Viscosidade é uma medida da resistência ao escoamento do fluido. No geral, quanto menor for a viscosidade, melhores serão as características de escoamento, particularmente em cavidades profundas, pequenos detalhes, etc., apesar de alta viscosidade poder proporcionar bom desempenho em alguns tipos de operações de desbaste (Intech EDM, 1996).
- **Calor específico:** Quanto maior o calor específico, mais energia térmica pode acumular sem grande aumento na temperatura, o que aumenta o rendimento do processo e aumenta a vida do fluido dielétrico. O elevado crescimento da temperatura aumenta a difusão de átomos da peça para o fluido e vice-versa, o que pode causar altera-

ções significativas na estrutura do material usinado, além do aparecimento de uma maior quantidade de microtrincas causadas pela calor excessivo (Fernandes, 1999).

- **Condutividade térmica:** Quanto maior a condutividade térmica do fluido dielétrico, menor é o tempo necessário para solidificar e refrigerar as gotas de metal expelidas da zona de erosão. Isto reduz a possibilidade de partículas se aderirem ao eletrodo ou redeporem na superfície da peça. Essas duas características (calor específico e condutividade térmica) aliadas dão alta capacidade de refrigeração, preservando a integridade da estrutura metálica do material da peça durante a operação.
- **Ponto de ebulição:** Quanto maior o ponto de ebulição do dielétrico, mais estável se mantém o fluido em temperaturas elevadas sem perder suas propriedades originais, perdendo frações menores de componentes pela evaporação seletiva das frações mais voláteis (Intech EDM, 1996).

Foi realizada junto aos fabricantes dos fluidos dielétricos uma pesquisa de mercado e foram levantados os preços com ICMS inclusos e foi montada a Tabela 1 para realização das análises.

3. Procedimento experimental

Os regimes de usinagem utilizados nos ensaios foram três regimes diferentes de usinagem: Desbaste Severo, Médio e Leve. Para cada regime, teoricamente, espera-se que qualidades diferentes dos óleos dielétricos promovam rendimentos diferenciados nas TRMs, RDs e acabamento superficial. Utilizou-se do manual da máquina EDM para determinação das variáveis mais adequadas para nossa pesquisa. As variáveis estão detalhadas na Tabela 2.

Utilizando os parâmetros selecionados na Tabela 2, iniciou-se a 3ª Etapa, onde tais parâmetros foram avaliados quanto à Rugosidade Média Aritmética (Ra) e à análise Topográfica. O total de peças usinadas ou número total de ensaios é igual ao número de regime de

usinagem (NR=3) vezes o número de fluidos dielétricos (NFD=5) vezes o Número de repetições (NR=5), dando um total de 75 operações de usinagem.

Um número de repetições igual a cinco gera uma maior confiabilidade nos resultados, uma vez que o processo EDM é influenciado por vários fatores, tais como umidade no fluido dielétrico, temperatura ambiente e do fluido, grau de contaminação por partículas erodidas, grau de degradação do fluido, etc., o que modifica sensivelmente os valores de TRM e RD. Portanto foi realizado um total de setenta e cinco operações de usinagem, gerando 150 entalhes semi-circulares.

A Figura 1 apresenta de forma esquemática as diversas etapas para a execução desse trabalho.

4. Análise e discussão dos resultados

4.1 Rugosidade média aritmética (Ra) e topografias (MEV)

As Figuras 2, 4 e 6 apresentam os gráficos das rugosidades médias aritméticas (Ra) para os três regimes de opera-

ção. Analisou-se a região usinada com um comprimento de 4mm. O comprimento de amostragem adotado foi 2,5 mm. Para cada amostra, foram feitas 12 leituras no sentido do eixo central da mesma.

No regime de desbaste leve, Figura 2, notou-se uma pequena diferença de rugosidade, da ordem de 15% a diferença de rugosidade com o óleo de melhor desempenho (óleo B) com o de pior desempenho (óleo D). Isso pode ter ocorrido pelo fato de que alguns óleos produzem mais vapor que os outros, lembrando que maior vaporização pode resultar também em maior quantidade de bolhas formadas durante as descargas elétricas, o que gera uma piora no acabamento da superfície usinada, no que diz respeito à rugosidade (Ra). Porém, fazendo uma observação detalhada das topografias das Figura 3, ou seja, uma vista superior da superfície usinada, com aumentos de 100x, pode-se analisar que entre os óleos A, B, C e D não houve uma considerável diferença visual, enquanto que o querosene, apesar de ter apresentado menor rugosidade que o óleo D, mostrou-se com topografia inferior, com um número muito alto de bolhas de metal redepositado. Esse fato se deve ao fato já mencionado de excessiva evaporação do dielétrico, em que quanto maior o número de bolhas durante cada descarga, associado ao fato de habilidade in-

Tabela 1 - Preços de mercado para os fluidos testados.

FLUIDO DIELÉTRICO	PREÇO DE MERCADO (US\$/litro)
ÓLEO A	1,96
ÓLEO B	0,88
ÓLEO C	1,28
ÓLEO D	1,68
ÓLEO E	0,60

Tabela 2 - Parâmetros empregados nos testes definitivos.

REGIME	T _{on} [μs]	D _T [%]	T _s	Corrente [A]	Tensão [V]
Desbaste Severo	400	95	6	20	60
Desbaste Médio	200	95	4	15	50
Desbaste Leve	75	90	3	10	40

ferior de lavagem e remoção rápida do calor das partículas implodidas após a descarga elétrica, pior será qualidade da superfície usinada. O querosene mostrou no regime de desgaste leve uma pior superfície usinada, o que prejudica principalmente peças que irão trabalhar com contato de superfície e alta precisão geométrica. Nas topografias observa-se que as superfícies geradas pelos óleos A, B, C e D possuem uma camada refundida ou camada branca bem homogênea.

Já para o regime de desgaste médio, Figura 4, notou-se uma diferença maior entre os óleos, que chegou a 36% entre o óleo A e o óleo E. Confirma-se uma tendência importante: quanto mais severo o regime, mais discrepante é o desempenho dos fluidos. Comparando esses resultados com os resultados das topografias, Figuras (5), fica bem claro que o melhor desempenho foi do óleo A, pois, além de apresentar menor rugosidade, apresentou uma camada refundida ainda mais homogênea que a dos outros óleos, B, C e D. De forma análoga, o querosene (óleo E) apresentou rugosidade inferior e confirmou esse desempenho pelas topografias, com um elevado número de bolhas refundidas do material da peça, de diversos tamanhos e formas.

No regime de desgaste severo, Figura (6), notou-se uma diferença da ordem de 36% entre o óleo B e o óleo C, os quais foram os extremos do desempenho em termos de Ra. Mais uma vez o óleo A apresentou bom resultado, sendo superado apenas pelo óleo B. O querosene apresentou novamente um desempenho ruim. Porém, quando comparado com as topografias, Figura (7), as superfícies já tiveram uma identificação maior, onde esse óleo demonstrou visualmente uma superfície bem semelhante com as dos demais óleos. No caso da Figura (7) (b), nota-se que, em alguns pontos, a superfície está mais rugosa e com maior número de bolhas e microtrincas que na superfície usinada com querosene. Aparentemente, em condições de regime mais severo, as diferenças de rugosidade e topográficas vão diminuindo gradativamente.

É importante ressaltar que para todos os dados apresentados nos gráficos, a variação de resultado de um ensaio para outro não foi maior que 2 a 5%, demonstrando, assim, boa confiabilidade nos resultados devido ao pequeno desvio-padrão.

4. Conclusões

Atentando-se estritamente para o aspecto tecnológico de desempenho dos fluidos dielétricos para EDM nas condições testadas, pode-se concluir que:

- Nem todos os fluidos dielétricos específicos para EDM são recomendados para substituir o querosene, ou

por serem demasiadamente caros ou por apresentarem desempenho pouco melhor. Porém os aspectos de toxicidade e perigo no manuseio do querosene reafirmam que seu uso como dielétrico para EDM deve ser limitado no Brasil, assim como já acontece nos Estados Unidos.

- Os fluidos dielétricos apresentaram uma grande inconsistência no desempenho nos três diferentes regimes de usinagem, o que mostra uma considerável diferença entre os mesmos, apesar de todos apresentarem propriedades razoáveis dentro de uma mesma faixa tal como viscosidade e densidade.

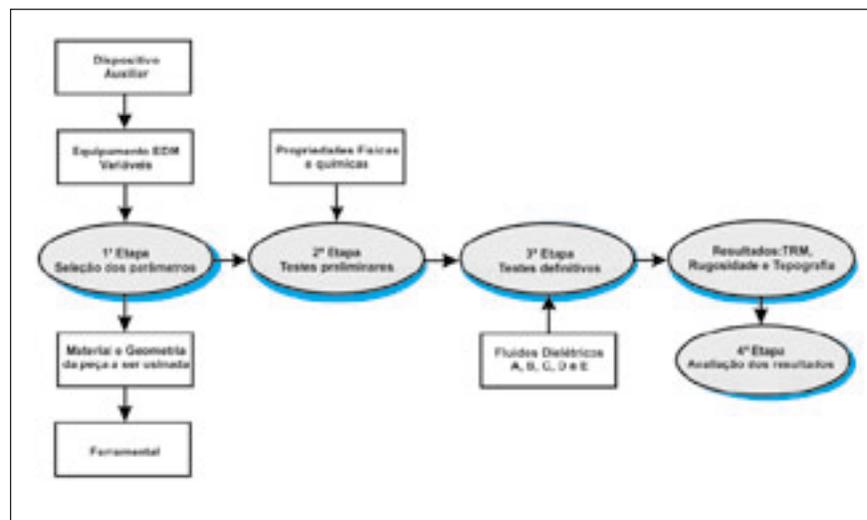


Figura 1 - Esquema sob diagrama de blocos para a metodologia.

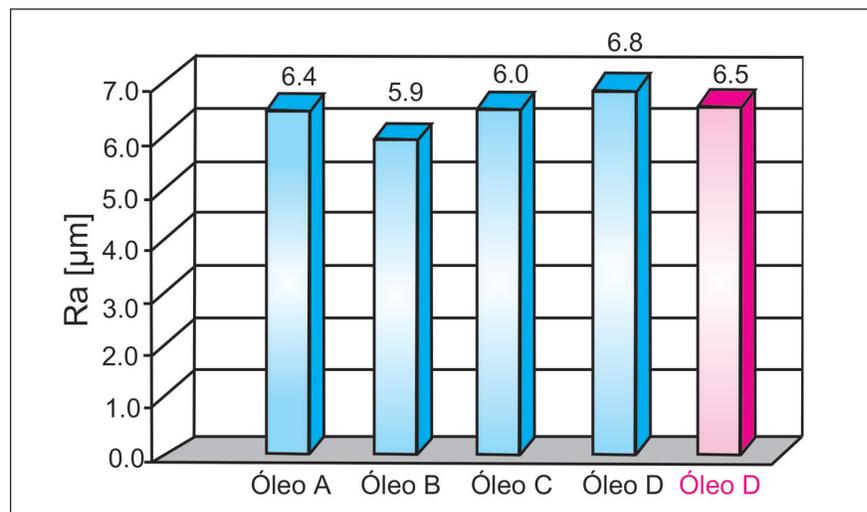


Figura 2 - Rugosidades Ra geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desgaste Leve.

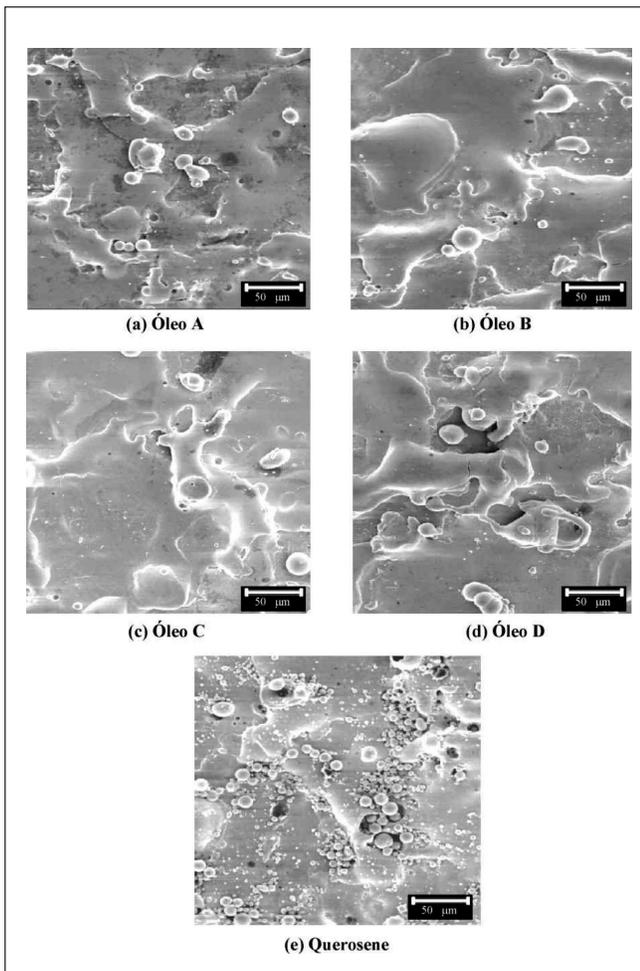


Figura 3 - Topografias obtidas por MEV (aumento de 100x) das superfícies usinadas por EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Leve.

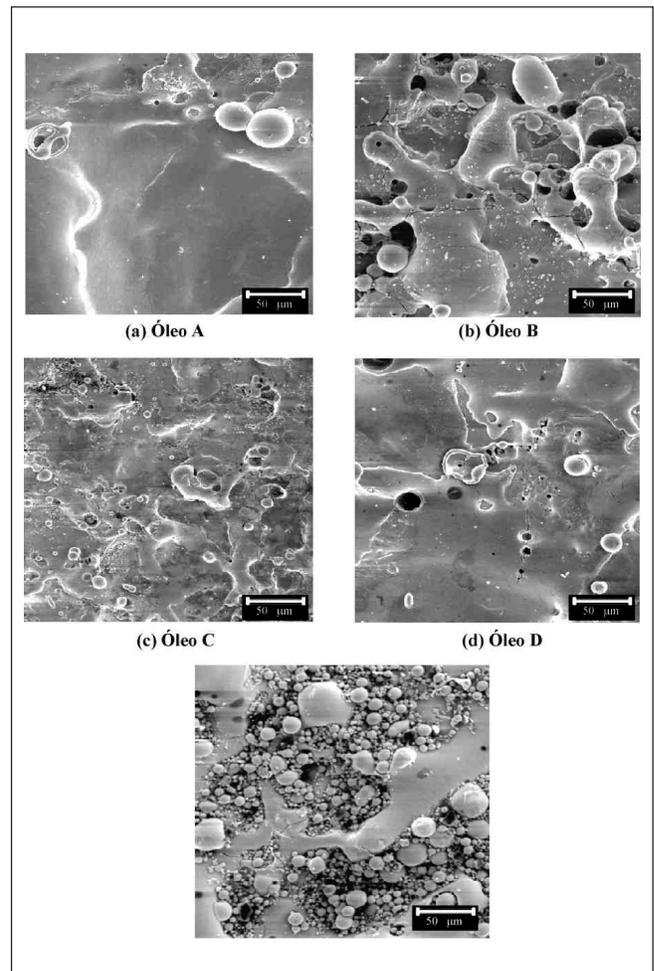


Figura 5 - Topografias obtidas por MEV (aumento de 300x) das superfícies usinadas por EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Médio.

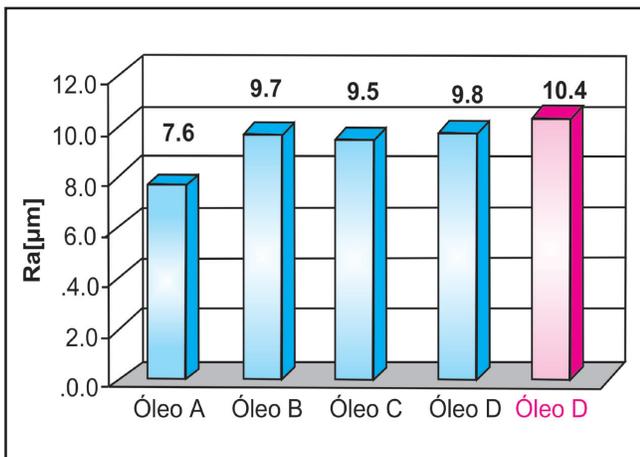


Figura 4 - Rugosidades Ra geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Médio.

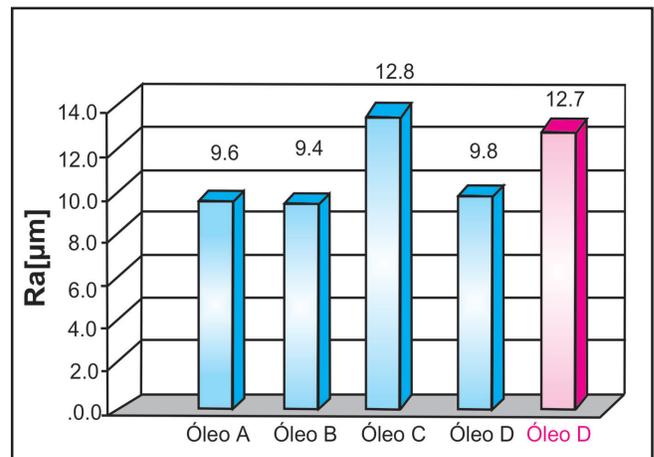


Figura 6 - Rugosidades Ra geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Severo.

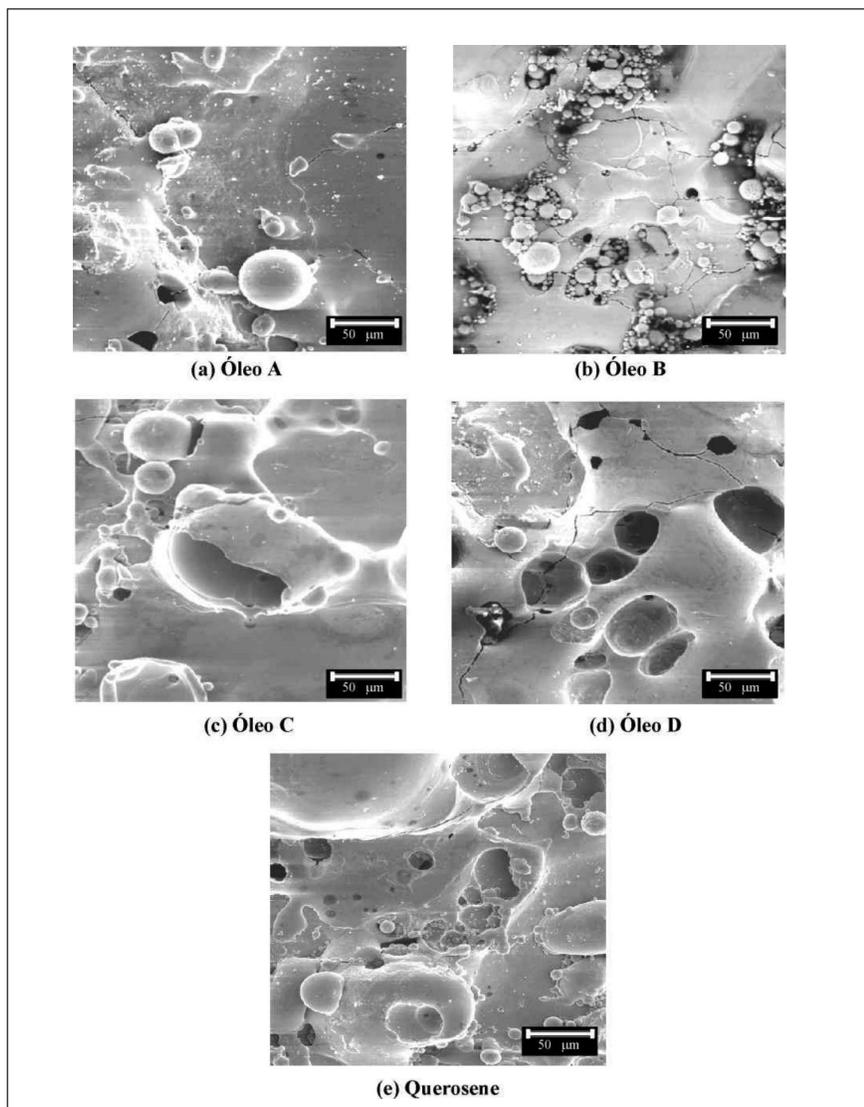


Figura 7 - Topografias obtidas por MEV (aumento de 300x) das superfícies usinadas por EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Severo.

- O fluido dielétrico E (querosene), ainda muito utilizado nas indústrias, apresentou um fraco desempenho em relação aos fluidos específicos para EDM, com relação a todos os fluidos em todos os aspectos analisados (Ra e Topografia). Porém, em condições de regime mais severo, praticamente há uma equiparação, tanto em termos de Ra como de Topografia.
- Verificou-se que o desempenho não está relacionado com o custo, um óleo mais barato pode proporcionar melhor desempenho que um óleo mais caro, apesar de que o óleo de melhor desempenho ser o mais caro de todos.
- A grande diferença de desempenho se deve muito ao processo EDM, que é altamente dependente de inúmeros fatores, onde até a umidade e temperatura ambiente podem afetar sensivelmente o processo.

Sugere-se a criação de normas de desempenho para fluidos dielétricos para EDM, como ocorre para óleos lubrificantes. Assim, saber-se-á no ato da compra qual o óleo mais indicado para o seu tipo de trabalho, material usinado, material da ferramenta e condições de desbaste.

5. Agradecimentos

Nossos agradecimentos ao MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), Boston, MA, EUA, através do Professor Daniel Roos, pelo acesso livre às suas bibliotecas para realização da revisão bibliográfica desse trabalho e ao CNPq, pelo financiamento da visita.

Referências Bibliográficas

- ALLISON, SAM. *The case for additive technology in EDM*, ONLINE ARTICLE From the Editorial Staff of Modern Machine Shop. 2000. Internet address: www.mmsonline.com/articles
- BENEDICT, G. F. *Nontraditional manufacturing processes*. New York: Marcel Dekker, 1987. p.207-246.
- BHATTACHARYYA, A. *New technology*. Calcutá: Hooghly Printing Company, 1973. p.144-177.
- CRUZ, C., MALAQUIAS, E. S., FERNANDES, I. A. *Introdução à usinagem não tradicional*. Uberlândia-MG: DEEME, UFU, 1999. p. 7-19.
- EDM Today, January/Fabruary 1999 Issue, *The Electrodes Tell the Story*. Internet address: www.edmtoday.org
- FERNANDES, A. LUCIANO. *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*. Uberlândia-MG: UFU, 1999. 72 p. (Dissertação de Mestrado).
- FIELD, M., KAHLES, J. F., KOSTER, W. P., *Surface finish and surface integrity*, Metcut Research Associates Inc., Metals handbook - 9th Ed., Machining, v. 16, p.19-36.
- FULLER, J. E. *Electrical discharge machining, metals handbook*, 9ª ed. v. 16, machining, p. 557-564, 1989.
- GUITRAL, E. BUD. *The EDM Handbook*. Cincinnati: Hanser Gardner Publication, 1997. 306 pp.
- Intech EDM. *A guide to understanding and selecting EDM dielectric fluids*. Broadview, IL. 1996. Internet address: www.edmtalk.com
- KAMINSKI, P. C., CAPUANO, M. N. *Revista OESP Metal-Mecânica*, Ano 4, n. 25, OESP Mídia, São Paulo, p. 42-47. 1999.
- McGEOUGH, J. A. *Advanced methods of machining*, London: Chapman and Hall, 1988. p.128-152.
- RODRIGUES, J.R.P. *Efeito da adição de carboneto de silício em pó na geração de microtrincas e na topografia da superfície usinada por descargas elétricas do aço rápido ABNT M2*. Uberlândia-MG: UFU, 1999. 47 p. (Dissertação de Mestrado).
- WELLER, E. J. *Nontraditional manufacturing processes*. Dearborn, Michigan, Society of Manufacturing Engineers, p. 162-201, 1984.

**Artigo recebido em 17/02/2003 e
aprovado em 16/06/2003.**