

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA E MATERIAL DA FERRAMENTA NA TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL NO PROCESSO DE USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS

Luciano José Arantes - ljarantes@mecanica.ufu.br

Alberto Arnaldo Raslan - ltm-raslan@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica - Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1M - Uberlândia - MG - 38400-902

Resumo. Controlar a Taxa de Remoção de Material (TRM) no processo de Usinagem por Descargas Elétricas, através de suas variáveis, tem sido objetivo de muitas pesquisas, uma vez que este parâmetro define o custo de fabricação de moldes e matrizes obtidos por este processo. Nesse custo faz-se presente o ferramental empregado, que engloba não só a ferramenta propriamente dita mas também o sistema de fixação da peça e o sistema de lavagem do par ferramenta-peça. Especificamente, este trabalho lida com a forma geométrica de ferramentas de face plana e mostra que ela é uma das variáveis influentes na TRM. Nos ensaios efetuados, foram usadas várias formas geométricas de mesma área de seção transversal. Além disso, o tempo de usinagem, em cada ensaio, foi mantido constante com o objetivo de tornar mais fácil o cálculo da TRM e mais visíveis os resultados. Foram ensaiadas ferramentas de dois tipos de materiais mais comuns, cobre eletrolítico e grafite. Além da constatação de grandes diferenças nas TRM encontradas em vários dos casos ensaiados, percebeu-se que as maiores taxas de remoção de material aconteceram sempre em cortes mais estáveis. A explicação para tal fenômeno parece estar na qualidade do sistema de lavagem que cada geometria proporciona com importantes reflexos na economicidade do processo produtivo.

Palavras-chave: EDM, TRM, Ferramentas e RD.

1. INTRODUÇÃO

Em muitas operações de usinagem por eletroerosão, uma pequena variação do material e geometria da ferramenta pode proporcionar grandes diferenças nas TRMs e nas RDs, o que torna o processo de seleção do material e projeto da ferramenta crucial para o bom desempenho do processo, não somente na questão da operação ser mais ou menos rápida (TRM), mas também, quando queremos ótima acuracidade e precisão dos detalhes usinados (RD), pois ao se utilizar uma ferramenta que se desgasta demasiadamente, a superfície e contornos da cavidade final não será como desejada. Este trabalho teve como objetivo principal testar algumas formas geométricas e dois tipos dos mais usados de material para construção de ferramentas para EDM. Foram utilizados dois tipos de materiais, cobre eletrolítico e grafite.

2. FERRAMENTAL

2.1. Material da ferramenta

Há uma extensa lista de materiais empregados para ferramentas de EDM, porém os mais usados são cobre e grafite. As principais características de cada um desses materiais são:

Cobre: baixo custo, bom para operadores inexperientes, superfícies espelhadas, excelente condutor e grande facilidade de fabricação de ferramentas de pequenas dimensões, baixas TRMs e maior desgaste, além de produzir menos “carvão” durante o processo, que é a deposição de partículas de carbono no fluido dielétrico.

Grafite: alto custo, alto ponto de fusão, altas TRMs, alta resistência ao desgaste e dificuldade para fabricação de ferramentas de pequenas dimensões por ser relativamente frágil.

Normalmente, os melhores valores são obtidos com o grafite, pelo ponto de fusão mais alto desse material. No entanto, como o grafite é um material que se contamina com muita facilidade e se apresenta com diferentes porosidades, muitas vezes pode apresentar baixo desempenho quanto à RD. Por isso, geralmente é utilizado o cobre pela sua melhor condutibilidade elétrica (Benedict, 1987).

2.2. Geometria da Ferramenta

O ferramental pode ser definido como o conjunto que engloba a geometria da ferramenta propriamente dita, o sistema de fixação da peça e o sistema de lavagem. A geometria da ferramenta modifica a velocidade de usinagem e a TRM. Um exemplo é um eletrodo cilíndrico maciço e um eletrodo cilíndrico vazado. A usinagem por EDM com eletrodo cilíndrico maciço com parâmetros do processo constantes, terá uma velocidade menor que a usinagem com eletrodo cilíndrico vazado. Isso acontece porque com o eletrodo vazado, o volume de material a ser fundido é bem menor que no caso do eletrodo maciço, onde todo o volume do furo, por exemplo, deverá ser fundido. No eletrodo vazado, o tarugo interno não será fundido, terá que ser fundido apenas o material em volta do mesmo para obtenção da geometria desejada (McGeough, 1988).

Atualmente, com o advento de máquinas CNC, as ferramentas se restringem a uma fina haste com extremidade esférica. Com métodos computacionais, são possíveis obter trajetórias definidas, o que viabiliza a obtenção de superfícies complexas, como se

fosse uma fresadora CNC. Isto favorece o processo, pois não há a necessidade de se fabricar ferramentas com geometrias não convencionais, que com o decorrer da usinagem requer novas correções de forma (Guitral, 1997).

O sistema de lavagem é outro fator de significativa importância no ferramental, tendo várias funções importantes. Uma delas é a de arrastar todo material erodido entre a ferramenta e peça, garantindo um avanço contínuo da ferramenta. Outra função é a renovação constante do fluido dielétrico na interface, mantendo as características físicas e químicas do mesmo. Esta renovação garante também o resfriamento mais pronunciado através da ferramenta ou peça. As vantagens de um ou outro sistema depende de cada caso e deve ser levado em conta não só a geometria da peça mas também a precisão requerida (Bhattacharyya, 1973). Neste trabalho, foi utilizado apenas sistema de lavagem por jateamento.

2.3. Desgaste da Ferramenta

Quando se pretende prever o desgaste da ferramenta, vários parâmetros combinados vão determinar a quantidade de desgaste após a usinagem. Num primeiro instante, é a capacidade que o material tem de resistir aos danos térmicos, mas a densidade do eletrodo, a polaridade e as freqüências de usinagem são também usadas na maior parte da “equação de desgaste” (Fuller, J. E, 1989). A Fig. (1) mostra a grande diferença entre o desgaste de ferramentas de cobre e grafite, em um determinado *setup* de usinagem (altas freqüências e polaridade negativa) (Guitral, 1997).

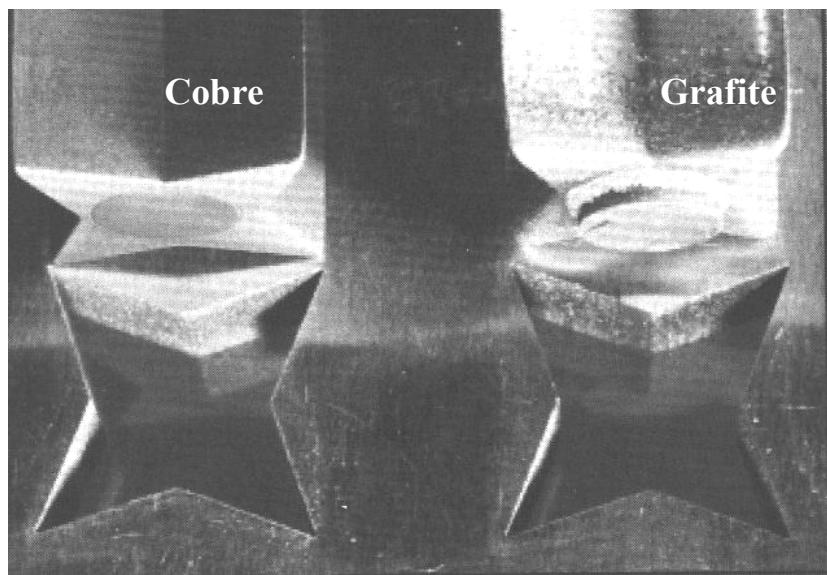


Figura 1. Diferenças no desgaste das ferramentas de cobre e grafite na usinagem por EDM com altas freqüências e polaridade negativa (Guitral, 1997).

Eletrodos de grafite possuem maior resistência ao desgaste em baixas freqüências, mas vai ser significativamente maior em altas freqüências e/ou aplicações com polaridade negativa. O uso de altas freqüências com eletrodos de grafite é usualmente reservado para operações de acabamento com baixas TRMs, ou altas velocidades e operações de polaridade negativa, e em ambos os casos o eletrodo é considerável “descartável”, ou seja, o consumo está em segundo plano (Guitral, 1997).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram divididos em duas partes, primeiro foram feitas ferramentas cilíndricas de área da seção transversal de 100mm^2 , porém, variando as geometrias e o material da ferramenta. As geometrias foram ferramenta vazada, maciça e cônicas, e os materiais foram cobre e grafite. A Fig. (2) apresenta de forma esquemática as diversas etapas para a execução deste trabalho e a Fig. (3) apresenta as geometrias das ferramentas da primeira etapa.

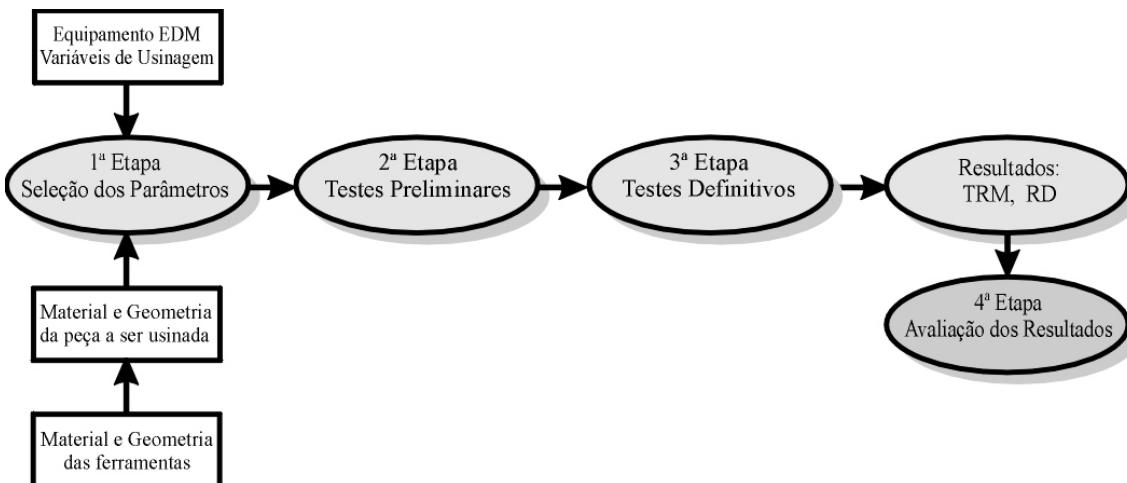


Figura 2. Esquema sob diagrama de blocos para a metodologia.

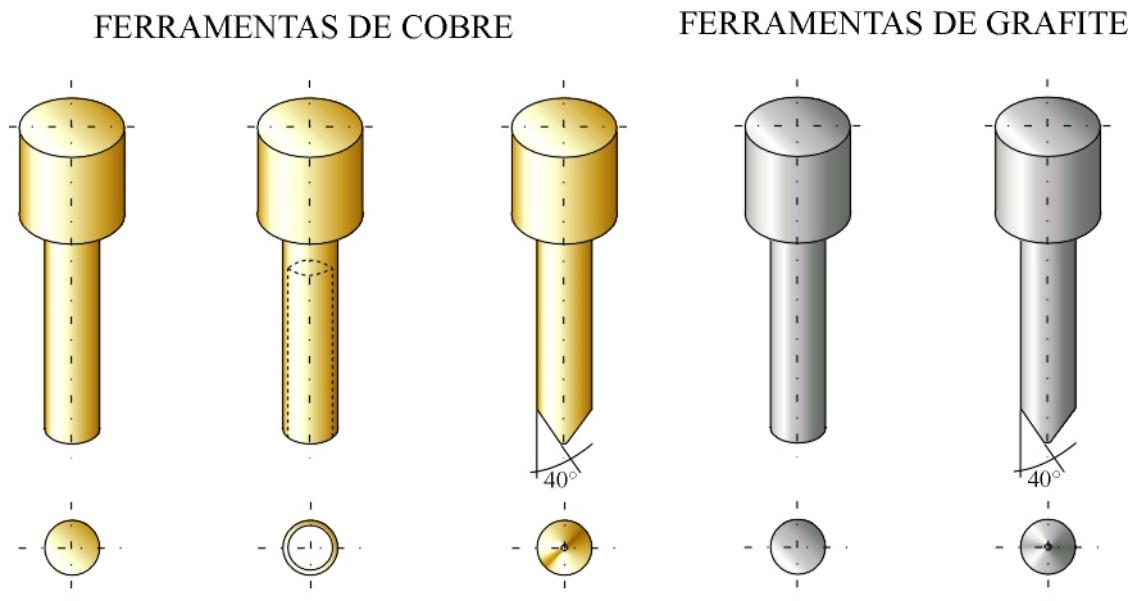


Figura 3. Geometrias das ferramentas utilizadas na primeira etapa de ensaios.

Os materiais usinados foram alumínio, aço 1020 e aço VC 130. Foram realizados 5 ensaios para cada condição de usinagem, que entende-se por material da peça, material e geometria da ferramenta. Portanto, nesse primeira etapa, foram realizados 75 furos cilíndricos, todos com profundidade de 5mm. Foram feitas medidas da massa de material antes de depois de cada usinagem das peças e das ferramentas. Cada ferramenta foi lixada e repesada a cada nova usinagem. Com esses valores de

massa, e os respectivos massas específicas de cada material chegamos a valores das variações de volume das peças e das ferramentas, para assim calcular-se as TRMs e RDs.

Na Segunda etapa, foram realizados ensaios com ferramentas de mesma área da seção transversal das ferramentas da primeira etapa, porém com seções quadrada e retangular, segundo Fig. (4). O objetivo foi de analisar a importância da seção transversal da ferramenta, uma vez que a área e consequentemente o volume de material é aproximadamente constante. Foram realizados 5 ensaios para cada condição de usinagem (material da ferramenta e geometria da ferramenta), sendo mantido constante o material da peça (Aço ABNT M2). O total de operações de usinagem foi de 30 furos, todos com profundidade de 5 mm. As dimensões das seções transversais das ferramentas são: A (10mm x 10mm), B (5mm x 20mm) e C (2mm x 50mm). Portanto, a área foi mantida constante em 100 mm².

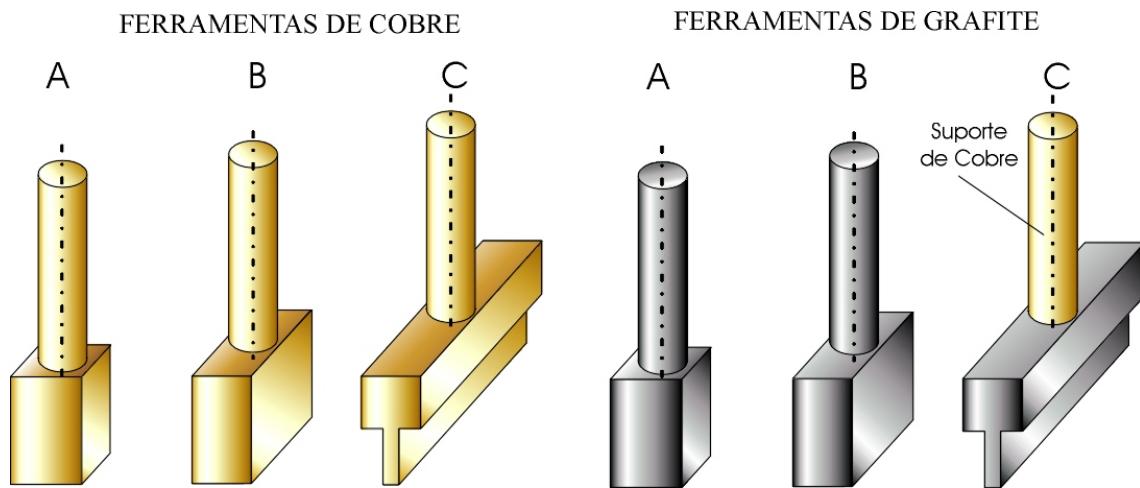


Figura 4. Geometrias das ferramentas utilizadas na segunda etapa de ensaios.

4. ANALISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para melhor compreensão dos resultados, encontra-se nas Tabelas (1) e (2), as características físicas dos materiais das peças e das ferramentas.

Tabela 1. Características físicas dos materiais das peças usinadas.

	Alumínio	Aço ABNT 1020	Aço VC 130
Ponto de Fusão[°C]	660	≈1500	≈1300
Densidade [g/cm ³]	2,70	7,80	7,84
Resistividade [μΩcm]	9	18	96
Dureza	16 HB	35 HRc	55 HRc

Tabela 2. Características físicas dos materiais das ferramentas.

	Cobre	Grafite
Ponto de Fusão[°C]	1083	3727
Densidade [g/cm ³]	8,9	2,1
Resistividade [μΩcm]	2	910

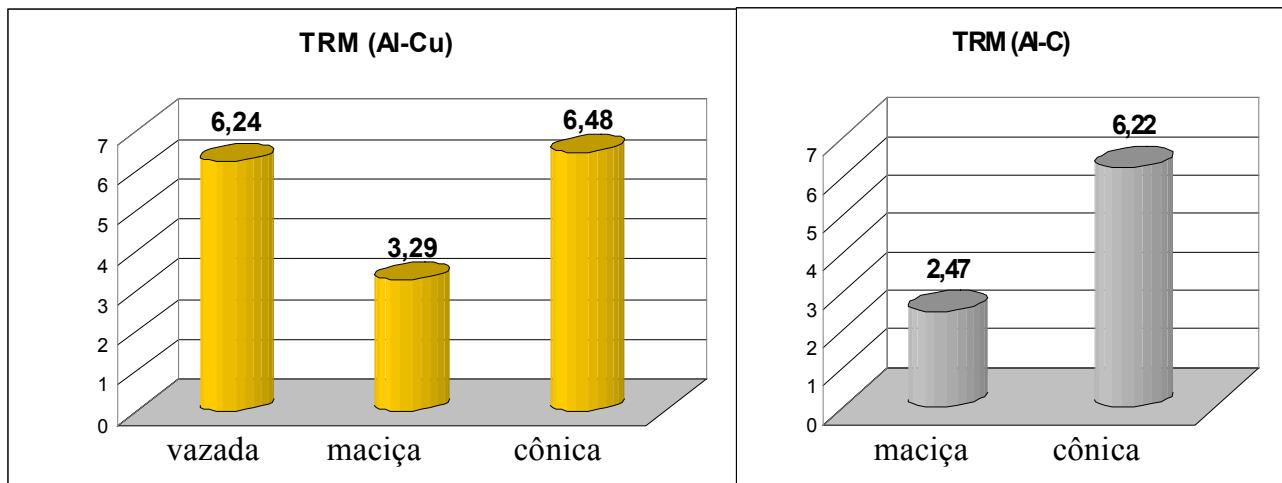


Figura 5. Resultados para TRM nos ensaios da primeira etapa para o alumínio.

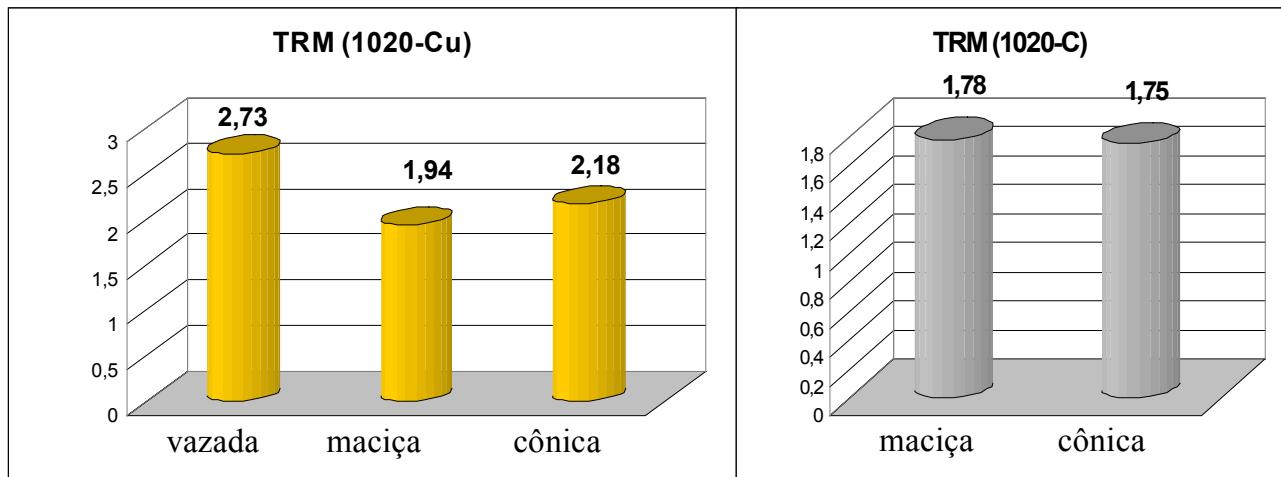


Figura 6. Resultados para TRM nos ensaios da primeira etapa para o aço 1020.

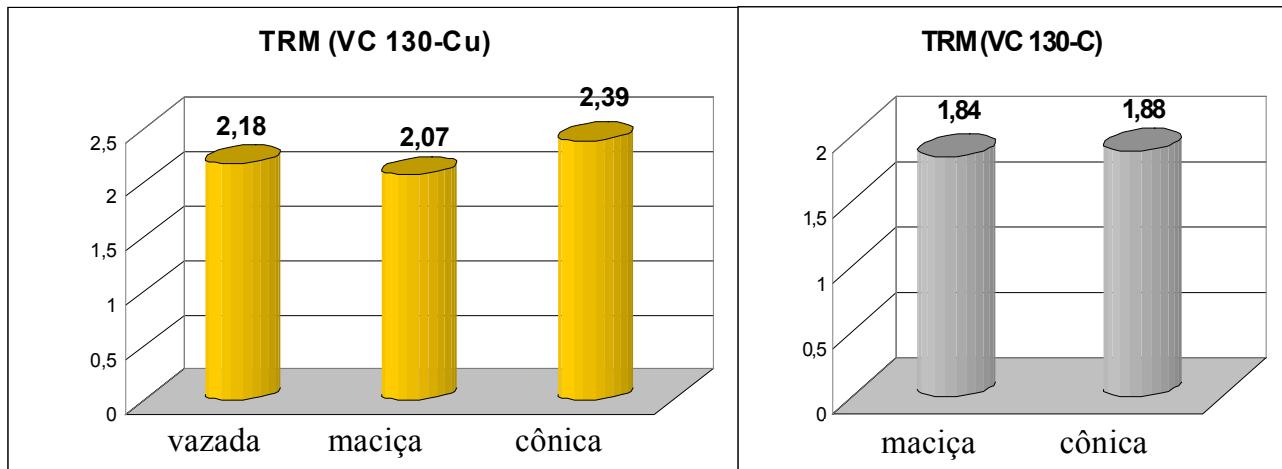


Figura 7. Resultados para TRM nos ensaios da primeira etapa para o aço VC 130.

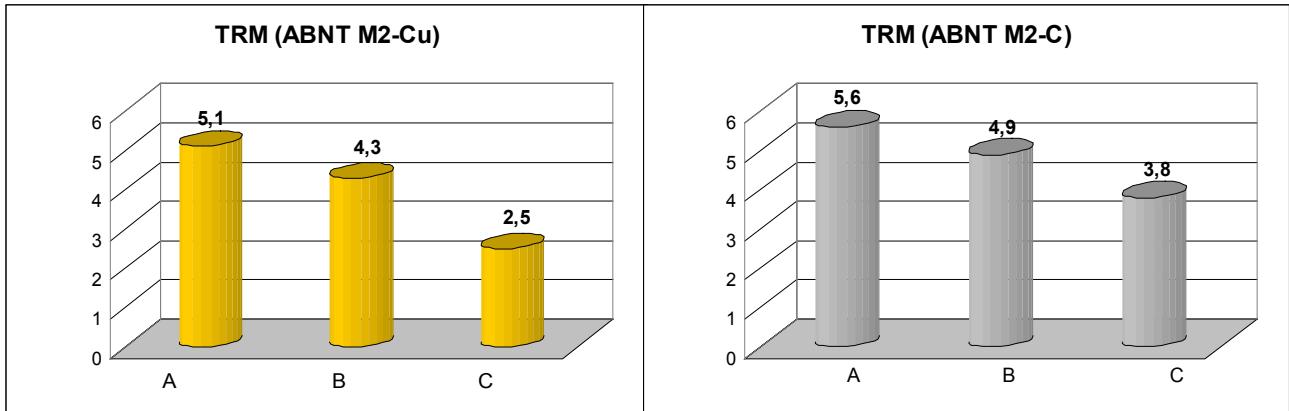


Figura 8. Resultados para TRM nos ensaios da segunda etapa para o aço ABNT M2.

Nas operações de usinagem da primeira etapa, onde houve variação dos materiais usinados, além de uso de ferramentas de geometrias e materiais diferentes, observou-se, tanto para o caso da ferramenta de cobre como para a ferramenta de grafite, na usinagem do alumínio (Fig. (5)), uma maior TRM quando usinado por ferramenta cônica. Isso se deve principalmente à maior concentração das descargas elétricas na ponta da ferramenta, aumentando a potência de usinagem e consequentemente aumentando o volume de material fundido em cada descarga subsequente. A geometria menos favorável, como esperado, foi a maciça, em que todo o material deve ser fundido, como no caso da cônica, porém, com muito menor concentração das descargas elétricas, e portanto, muito menor a eficiência de cada descarga isoladamente. Com ferramenta vazada o bom rendimento se deve ao fato de que somente a parede do furo foi usinada, ficando no final da operação um tarugo; esse recurso, porém, somente pode ser utilizado quando na usinagem de furos e cavidades passantes.

Na usinagem do aço 1020 (Fig. (6)), observou-se um comportamento semelhante à usinagem do alumínio, porém, na usinagem com ferramenta de grafite, os valores de TRM estiveram muito próximos, o que indica que na usinagem de materiais de ponto de fusão maiores, como o aço 1020 e o VC 130, o tempo de usinagem aumenta, o que provoca maior desgaste da ferramenta e piora sensível na TRM. Comparando com a usinagem do alumínio, as TRMs em todos os casos foram menores, isso porque o fator mais importante, nessa situação, é o ponto de fusão do material, que é bem maior no 1020 do que no alumínio, como pode-se ver na Tab. (1). Quanto a usinagem com ferramentas de grafite, observa-se uma diferença muito pequena entre maciça e cônica, porém, dessa vez, em favor da ferramenta maciça. Nesse caso, parece que o desgaste prematuro da ferramenta cônica diminui o fator de concentração das descargas, diminuindo a TRM.

Usinando-se o aço VC 130 (Fig. (7)), cuja dureza é bem maior que a do 1020, o que observou-se, com exceção da ferramenta vazada de cobre, uma maior TRM em todos os casos, esse fato pode ser explicado devido ao fator mais importante nessa situação, o ponto de fusão do material usinado. Evidencia-se assim uma das grandes vantagens do processo EDM, que é a não dependência da dureza do material usinado na TRM. É mais fácil usinar o VC 130, que tem dureza na ordem de 55 HRc, que usinar o 1020, cuja dureza fica em torno de 35 HRc, conforme a Tab. (1).

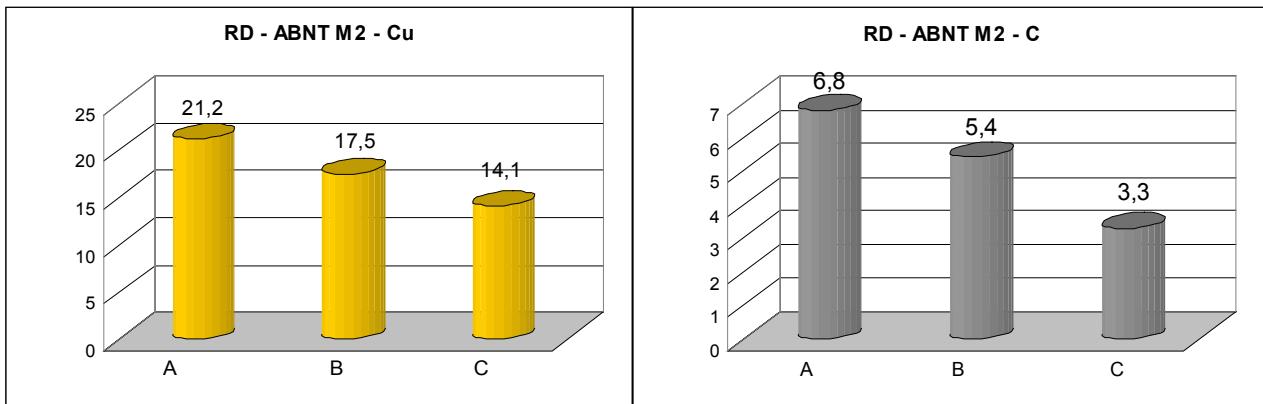


Figura 9. Resultados para RD nos ensaios da segunda etapa para o aço ABNT M2.

Em todos os casos de usinagem da primeira etapa, observou-se que a ferramenta maciça, de cobre ou de grafite, obteve sempre uma TRM pior em relação às outras, enquanto que a ferramenta vazada de cobre obteve maior TRM em apenas uma situação, na usinagem do 1020 quando comparada com a ferramenta cônica de cobre. Portanto, nem sempre a ferramenta vazada obterá maiores TRMs, isso porque comparando com a cônica, apresenta piores concentrações das descargas elétricas, fazendo com que o processo perca eficiência, uma vez que na vazada ocorrerão também descargas laterais no interior da mesma.

Comparando agora as ferramentas de cobre com as de grafite, em todos os casos, as TRMs foram maiores para as ferramentas de cobre, sem exceção. Isso se deve ao fato de que em potências de usinagem medianas, como testado, a menor condutividade elétrica do grafite passa a impossibilitar maiores TRMs. Outro fator pode ser a porosidade do grafite utilizado. Uma das dificuldades da utilização do grafite é que esse não pode estar contaminado com partículas de água, ar, querosene e fluidos dielétricos específicos. As ferramentas de grafite mais porosas vão apresentar pior desempenho que as de grafite mais densas, devido a esse fator de contaminação. Uma outra desvantagem das ferramentas de grafite é que permitem apenas uma utilização, pois o próprio contato com o fluido dielétrico ocasiona elevada contaminação da ferramenta, mudando suas características de condutividade elétrica e ponto de fusão, cruciais para seu bom desempenho.

Nas operações de usinagem da segunda etapa, onde não houve variação dos materiais usinados, apenas de uso de ferramentas de geometrias e materiais diferentes, conforme a Fig. (4), observou-se, na Fig. (8), tanto para ferramentas de cobre como de grafite, um padrão de comportamento: quanto mais homogênea a geometria, ou seja, quanto mais próximas as dimensões de um quadrado, maiores serão as TRMs, justificado pelo sistema de lavagem. Quanto melhor a lavagem pelo fluido dielétrico das partículas fundidas, melhores e mais potentes serão as descargas subseqüentes, aumentando consideravelmente as TRMs. Conforme a Fig. (8), há uma tendência de sempre decrescer a TRM, conforme aumentamos a complexidade da geometria da seção transversal da ferramenta. Se continuássemos o processo de modificação da seção retangular, até alcançarmos uma fina chapa como ferramenta, as TRMs seriam ainda bem menores. Por menor que seja a viscosidade do fluido dielétrico, em ferramentas muito finas e complexas, haverá uma maior dificuldade do mesmo penetrar nas regiões mais apertadas, principalmente em um sistema de lavagem externo, por jateamento, que foi utilizado nesse trabalho.

Quanto a comparação de TRM entre as ferramentas de cobre e grafite, como nessa etapa foi utilizado maior potência de usinagem, o grafite proporcionou TRMs um pouco maiores para todas as geometrias. Quanto maior a complexidade da geometria, maiores foram as diferenças de TRM. Para a ferramenta A, uma diferença de 10%, para a ferramenta B, 14%, já para a ferramenta C, 52%.

Na Fig. (9), observa-se os resultados para a Relação de Desgaste (RD) das ferramentas de cobre e grafite, que é a razão entre o volume de material removido da peça pelo material removido da ferramenta. Quanto mais complexa a geometria da ferramenta, notou-se menores TRMs, consequentemente, maiores tempos de usinagem. Portanto, esse tempo adicional, proporciona maiores quantidade de descargas elétricas subseqüentes, o que acaba ocasionando maior desgaste da ferramenta. Resumindo, a RD é inversamente proporcional ao tempo de usinagem. Analisando agora as grandes diferenças entre as ferramentas de cobre e grafite, observa-se que a RD do cobre é bem maior que do grafite. Seria comum imaginar que o desgaste do grafite seria menor, pelo fato do mesmo possuir um ponto de fusão muito maior que do cobre, conforme a Tab. (3), por resistir melhor às altas temperaturas de usinagem. Porém, é sabido pela bibliografia e experiência industrial, que o fator mais importante para a RD é o tempo de usinagem, e as ferramentas de cobre apresentaram praticamente sempre TRMs maiores, o que já foi discutido anteriormente, e acrescentado ao fato importante de que o cobre possui uma resistividade elétrica muito menor que a do grafite, conforme a Tab. (3). Esse fator proporciona potências de descargas maiores para as ferramentas de cobre.

5. CONCLUSÕES

Atentando-se estritamente para o aspecto tecnológico das ferramentas utilizadas no processo EDM nas condições testadas, pode-se concluir que:

- Quanto mais complexa a geometria da ferramenta, seja ela de cobre ou carbono, em iguais condições de usinagem pelo processo EDM, melhor será a lavagem do material fundido em cada descarga elétrica, proporcionando maiores TRMs;
- Na usinagem do aço VC 130 cuja dureza é bem maior que a do 1020, o que observou-se, com exceção da ferramenta vazada de cobre, uma maior TRM em todos os casos. Esse fato pode ser explicado devido ao fator mais importante nessa situação, do ponto de fusão do material usinado.
- Comparando as ferramentas de cobre com as de grafite, em todos os casos, as TRMs foram maiores para as ferramentas de cobre, sem exceção. Isso se deve ao fato de que em potências de usinagem medianas, como testado na primeira etapa dos ensaios, a menor condutividade elétrica do grafite passa a impossibilitar maiores TRMs;
- Em geral, as TRMs obtidas pelas ferramentas de cobre, independentemente da geometria, foram maiores que as obtidas pelas de grafite, devido, entre outros fatores, pela maior potência das descargas subseqüentes devido à muito menor resistividade elétrica do cobre;
- Sempre que possível, deve-se utilizar ferramentas vazadas, para aumentar a velocidade de usinagem por ser necessário fundir menor volume de material da peça, além de melhorar o sistema de lavagem, que remove da cavidade que se usina o material fundido pelas descargas anteriores.

6. REFERÊNCIAS

- Arantes, L.J., 2001, "Performance Evaluation of Dielectric Fluids for Electrical Discharge Machining Process", Master's Dissertation, Federal University of Uberlândia, MG-BR / MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), MA, USA.
- Benedict, G.F., 1987, "Nontraditional Manufacturing Processes", New York, Marcel Dekker, pp.207-246.
- Cruz, C., Malaquias, E.S., Fernandes, L.A., 1999, "Introdução à Usinagem Não Tradicional", DEEME, UFU, Uberlândia-MG, pp. 7-19.
- Fuller, J.E., 1989, "Electrical Discharge Machining", Metals Handbook, 9^a Ed. Vol. 16, machining, pp. 557-564.
- Guitral, E. B., 1997, "The EDM Handbook", Hanser Gardner Publication, Cincinnati, 306 pp.
- Kaminski, P.C., Capuano, M.N., 1999, "Usinagem de microfuros por Eletroerosão", Revista OESP Metal-Mecânica, Ano 4, nº 25, OESP Mídia, São Paulo, p.p. 42-47.
- McGeough, J.A., 1988, "Advanced Methods of Machining", London, Chapman and Hall, pp.128-152.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

STUDY OF INFLUENCE OF ELECTRODE'S MATERIAL AND GEOMETRY ON THE METAL REMOVAL RATE FOR ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PROCESS

Luciano José Arantes - ljarantes@mecanica.ufu.br

Alberto Arnaldo Raslan - ltm-raslan@ufu.br

Federal University of Uberlândia – Faculty of Mechanical Engineering - Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1M - Uberlândia - MG - 38400-902

Abstract. *Control the Metal Removal Rate (MRR) on the EDM process by their variables, has been objective of several researches because this parameter defines the machining cost in this process. Belongs to this cost the electrodes and flushing ability of the system. Specifically, this work deals with the geometrical form of the electrode and shows that this is one of the important variables on the MRR. It has been used several different geometric forms of same area of the transversal section. Has been tested two different electrode's material, cooper and graphite. Despite all big differences on the MRRs, has been noticed that bigger MRRs occurs always with more stable geometry of the EDM electrode. The explanation for this phenomenon seems to be related with the better flushing quality that each geometry provides with important reflexes on the productive process.*

Keywords: *EDM, , MRR, Electrodes and Wear Rate.*