

ELETROEROSÃO POR FIO DE METAL DURO UTILIZADO PARA FERRAMENTAS DE ESTAMPAGEM

Fred AMORIM

Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR

Departamento de Engenharia Mecânica

Rua Imaculada Conceição, 1155 - Prado Velho - 80215-901 - Curitiba, PR - Brasil

fred.amorim@pucpr.br

Carlos TEIXEIRA

Institut National des Sciences Appliquées - Rouen

Département de Mécanique

Avenue de l'Université BP08 - 76801 Saint-Étienne-du-Rouvray Cedex - France

carlos.teixeira@insa-rouen.fr

Resumo. O metal duro é um material cada vez mais utilizado na fabricação de punções e matrizes de estampagem. Esse material oferece, dentre outras vantagens, propriedades mecânicas adequadas para esse tipo de conformação, como, por exemplo, uma dureza e uma resistência à compressão elevadas. As ferramentas de estampagem são normalmente usinadas pelo processo de eletroerosão por fio (WEDM - Wire Electrical Discharge Machining). Isso acontece porque essas ferramentas apresentam formatos geométricos altamente complexos e são produzidas em materiais de elevada dureza, que muitas vezes restringem a potencialidade de aplicação dos processos convencionais de usinagem. As máquinas modernas de WEDM CNC possuem, inseridas em sua unidade de controle, tabelas de tecnologia para diversas combinações do par material de ferramenta (fio) e material de peça. No entanto, essas tabelas - que consistem de parâmetros recomendados de usinagem - não são adequadas para muitos de tipos de materiais de peça. Este trabalho teve por objetivo melhorar as condições de usinagem de desgaste do metal duro H40S pelo processo de eletroerosão por fio. Foram executados testes de WEDM utilizando dois materiais de fios, o cobre revestido com zinco e o latão sem revestimento, assim como foram variados os seguintes parâmetros do processo: (a) tempo de intervalo, (b) velocidade linear de desenrolamento do fio e (c) tensão média de referência do servo-controle. Os resultados dos testes foram organizados na forma gráfica e discutidos tecnicamente. Ao final, o trabalho sugere algumas condições adequadas de eletroerosão para o metal duro H40S com fios de cobre e de latão.

Palavras-chaves: Eletroerosão por fio, metal duro, parâmetros do processo.

1. INTRODUÇÃO

A estampagem é um processo de conformação mecânica utilizado para a produção de diversos tipos de peças fabricadas em grandes lotes, como, por exemplo, portas e capôs de automóveis, componentes de motores elétricos etc. Os punções e as matrizes de estampagem são ferramentas submetidas a elevadas tensões durante o trabalho. Por isso, essas ferramentas são normalmente feitas de aços de elevada dureza e que possuem uma alta resistência à compressão e ao desgaste abrasivo. O metal duro por oferecer essas características é utilizado como um outro material para a fabricação de tais ferramentas.

O processamento de materiais de alta dureza é normalmente difícil pelos métodos tradicionais de usinagem, pois envolve o uso de máquinas e ferramentas de corte de alto custo, dentre outros aspectos. Neste sentido, a usinagem por eletroerosão por fio (*Wire Electrical Discharge Machining - WEDM*) se apresenta com um processo muito vantajoso para a produção de ferramentas de estampagem. Na WEDM não existe contato mecânico entre a ferramenta e a peça. Neste caso, um fio bobinado que se desenrola continuamente durante a usinagem é utilizado como ferramenta, sendo a peça produzida pelo movimento relativo entre o fio e a peça, como destaca a Fig.1. A remoção de material decorre de fenômenos térmicos gerados por descargas elétricas entre o eletrodo-ferramenta e o eletrodo-peça. Assim, as propriedades mecânicas do material da peça como, por exemplo, a dureza não afeta a sua usinabilidade.

Outra vantagem da WEDM é a possibilidade de se usinar peças com paredes altas e que apresentam algo grau de inclinação, além de pequenos raios de canto, que são características presentes em algumas ferramentas de estampagem. Isto acontece porque as máquinas modernas de WEDM CNC possuem até 5 eixos programáveis (X,Y,U,V,Z). Além disso, essas máquinas possuem autonomia de usinagem superior a 24 horas, ou seja, ausência de intervenção do operador para ajuste e controle das condições de usinagem, como relata Amorim⁽¹⁾.

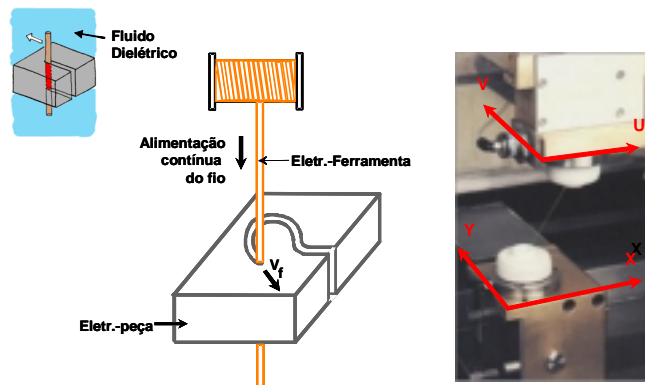


Figura 1. Esquema de funcionamento de uma máquina de eletroerosão por fio, Amorim⁽¹⁾.

A Figura 2 apresenta o panorama internacional atual de utilização da WEDM na indústria metal-mecânica. Observa-se que 5% do total correspondem a usinagem de matrizes de estampagem em metal duro. No entanto, segundo Charmilles⁽²⁾, a tendência mundial é aumentar a utilização da WEDM na produção de ferramentas de estampagem desse material.

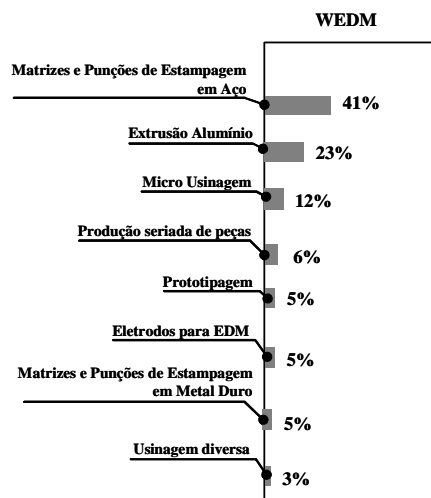


Figura 2. Panorama de utilização da WEDM, segundo Charmilles⁽²⁾.

Löttgen⁽³⁾ relata que ao longo dos últimos anos os fabricantes de máquinas têm desenvolvido as tabelas de tecnologia das máquinas de EDM baseando-se preponderantemente nas condições descritas na norma VDI 3402 de 1990⁽⁴⁾. Entenda-se por "tabelas de tecnologia" os parâmetros ótimos recomendados para a usinagem, os quais estão inseridos no sistema computacional das máquinas de EDM. Acontece que os resultados de processo, principalmente a taxa de corte de material e a rugosidade, descritos nestas tabelas de tecnologia são alcançados sob condições ótimas de testes de usinagem e com a utilização de materiais padronizados.

Na prática industrial cotidiana estas condições ótimas de usinagem são relativamente raras, como é o caso da fabricação de matrizes de estampagem em diferentes classes de metal duro. Além disso, em muitos casos, os materiais utilizados nas ferramentarias não são aqueles adotados pelos fabricantes para a elaboração das tabelas de tecnologia. Desta forma, os consumidores enfrentam sérios problemas no momento de estabelecer parâmetros adequados de usinagem para o alcance de resultados econômicos para o trabalho em questão.

O presente trabalho teve como finalidade a melhoria do processo de WEDM de desbaste do metal duro classe H40S. Com o objetivo de aumentar a velocidade de remoção da material V_w [mm^2/min], foram executados testes utilizando dois materiais de fios, cobre revestido com zinco e latão sem revestimento, assim como foram variados os seguintes parâmetros do processo: (a) o tempo de intervalo t_o [μs], (b) a velocidade linear de desenrolamento do fio W_s [m/min] e (c) a tensão média de referência do servo-controle A_j [V].

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os testes foram executados no Laboratório de Pesquisa em Usinagem - LAUS da Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR. Utilizou-se uma máquina de WEDM CNC do fabricante Charmilles modelo Robofil 290, como apresenta a Fig. 3.



ROBOFIL 290 CNC 5 eixos

CARACTERÍSTICAS da máquina:

- Dielétrico: água deionizada a 15 μS
- Diâmetro de fio: 0,1 a 0,3 mm
- Tensão do fio: 0 a 30 N
- Inclinação do fio: 0° a 30°
- Corrente máx. descarga: 15 A
- Altura máx. peça: 200 mm
- Resolução de medição: 0,5 μm
- Velocidade de desenrolamento: 0 a 15 mm/min

Figura 3. Máquina de WEDM utilizada nos testes.

O material da peça usinado foi o metal duro da classe H40S, apresentando as seguintes características: (a) tamanho médio de grão = 1,5 μm , (b) 12 % Co e balanço de WC, (c) dureza HRA = 90 e HV30 = 1340, (d) resistência a compressão = 5000 N/mm^2 e (e) módulo de elasticidade 600 kN/mm^2 . Para cada condição de teste foram feitos três cortes retos verticais em corpos de prova do H40S com 20 mm de altura por 20 mm de comprimento, espaçados de 2 mm entre si.

Como eletrodos-ferramenta foram utilizados dois tipos de fios: (a) cobre revestido com zinco e (b) latão (63% Cu + 37% Zn) sem revestimento. Ambos os fios possuíam diâmetro de 0,25 mm. Para todos os testes se aplicou a tensão de 10 N no fio, que é adequada para as condições de

usinagem de desbaste. A lavagem das partículas eletroerodidas foi executada por jatos de água com pressão de 8 bar pelo bocais superior e inferior da máquina.

Em todos os ensaios realizados foram executadas três repetições para cada condição de usinagem. A seguir trabalhou-se com os valores médios obtidos para a construção dos gráficos. É oportuno colocar que os resultados obtidos não apresentaram dispersões significantes de valores entre si.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Variação do tempo de intervalo t_0

O tempo de intervalo t_0 exerce forte efeito sobre o rendimento da usinagem por WEDM, pois influencia de forma significativa na frequência de descargas. Além disso, o controle de t_0 permite regular o grau de limpeza da fenda de trabalho, ou seja, a expulsão adequada das partículas eletroerodidas. Neste caso, quanto menor for o tempo de intervalo, menos eficiente será o processo de ejeção das partículas. Além disso, a utilização de tempos de intervalo muito curtos podem promover o rompimento do fio, pelo fato de favorecer sobre-contaminação da fenda. Por outro lado, quanto maior o valor de t_0 menor será a frequência de descargas, acarretando, por sua vez, no aumento do tempo de usinagem e queda da taxa de corte V_w [mm²/min].

Nos testes executados neste trabalho, o tempo de intervalo t_0 foi variado de 3,4 μ s até 12 μ s a fim de se estabelecer a máxima taxa de corte V_w para os dois tipos de fios testados. A Figura 4 apresenta a influência de t_0 sobre o comportamento da taxa de corte de material V_w [mm²/min]. Cabe acrescentar que após pré-testes com a variação do tempo de descarga t_e de 0,6 a 1,2 μ s observou-se pouca influência do mesmo sobre a taxa de corte. No entanto, para $t_e = 0,6 \mu$ s observou-se melhor estabilidade da usinagem em relação a ocorrência de arcos e de curtos-circuitos, sendo assim utilizado para todos os testes principais. A tensão em aberto \hat{u}_i foi estabelecida em 80 V com polaridade negativa para o fio. A velocidade de desenrolamento $W_s = 9$ m/min é a recomendada pelo fabricante.

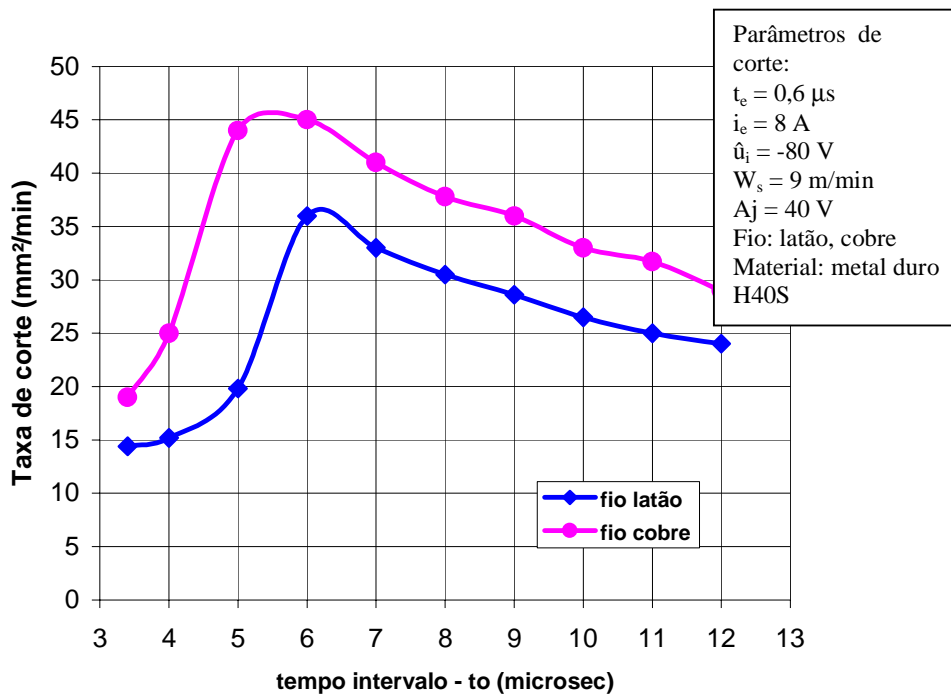


Figura 4. Taxa de remoção V_w em função do tempo de intervalo t_0 .

A curva da taxa de corte de material V_w em função do tempo de intervalo t_0 pode ser analisada em duas partes. Na primeira, observa-se um aumento da taxa V_w para ambos os fios, ao se aumentar gradualmente o tempo de intervalo de 3,4 μ s para 6 μ s. Neste caso, para $t_0 = 3,4 \mu$ s não ocorre uma lavagem eficiente da fenda de trabalho. Observam-se muitos curtos-circuitos causados pela alta contaminação da fenda com partículas eletroerodidas, que promovem uma baixa taxa de Corte V_w de aproximadamente 15 mm^2/min para WEDM com fio de latão e de 18 mm^2/min ao se utilizar o fio de cobre revestido. Na medida em que se eleva o valor de t_0 nota-se um aumento gradual da taxa de corte V_w . O valor máximo de $V_w = 45 \text{ mm}^2/\text{min}$ foi obtido para usinagem com fio de cobre revestido com zinco e de $V_w = 35 \text{ mm}^2/\text{min}$ para WEDM com fio de latão sem revestimento, ambos com tempo de intervalo t_0 ótimo de 6 μ s. Isto se explica pela melhoria das condições de limpeza da fenda, que promove melhor estabilidade da usinagem.

Na segunda parte da curva, ou seja, para valores de t_0 maiores que 6 μ s a taxa de corte V_w tende a cair progressivamente. A explicação está na diminuição da frequência de descarga F , que tem como expressão $F = 1/(t_0 + t_e)$. Então, um aumento de t_0 , mantendo t_e constante, provoca uma diminuição da frequência de descargas das faíscas, traduzida por uma taxa de corte de material V_w mais lenta. É o fenômeno que está acontecendo entre os valores $t_0 = 7 \mu$ s e $t_0 = 12 \mu$ s.

Aparece um fato importante nessa análise: a variação do tempo de intervalo t_0 com fio de latão sem revestimento e fio de cobre revestido com zinco resulta em duas curvas de andamento similares. No entanto, os resultados mais interessantes para aumento da taxa de remoção V_w são obtidos com o fio de cobre revestido com zinco. O máximo está em torno de $V_w = 45 \text{ mm}^2/\text{min}$ para o cobre, contra $V_w = 36 \text{ mm}^2/\text{min}$ para o latão sem revestimento, isso com o valor do tempo de intervalo ótimo $t_0 = 6 \mu$ s, como destacado anteriormente na Fig. 4.

Segundo Prohaszka et.al.⁽⁵⁾, o material ideal para fios de WEDM deve apresentar três características importantes: (a) alta condutividade elétrica, (b) boa resistência mecânica e (c) promover boas condições de lavagem da fenda de trabalho e de formação da descarga elétrica. Durante o processo de usinagem é desejável que o fio também seja eletroerodido. Neste ponto, este fato possibilita que o material vaporizado do fio melhore as condições de rompimento da rigidez do dielétrico e de formação do canal de plasma. Além disso, no lugar de fundir-se, a vaporização em altas taxas do material do fio em partículas microscópicas, promovem melhoria das condições de lavagem da fenda de trabalho e, por reduzir a formação de arcos e curtos-circuitos, aumentam a estabilidade da usinagem.

Estas características explicam os melhores resultados obtidos com o fio de cobre revestido com zinco em relação a usinagem com fio de latão sem revestimento. O filme de zinco que recobre o fio de cobre possui baixo ponto de fusão e alta capacidade de vaporização, promovendo um melhor rendimento do processo de WEDM.

3.2 Variação da Velocidade de Desenrolamento do Fio W_s

A velocidade linear de desenrolamento do fio W_s foi variada de 1 até 9 m/min. Os resultados aparecem na Fig 5. A velocidade W_s é um parâmetro que influencia particularmente no desgaste do fio. Quanto mais rápido o fio passar pela peça menor será a ocorrência de descargas no mesmo ponto do fio. Se W_s for muito baixa a probabilidade de ocorrerem descargas repetidas em um mesmo ponto do fio será bem mais alta. Isso pode promover a quebra do fio e conseqüentemente queda do rendimento da usinagem, já que envolve a parada do processo para recolocação fio.

Pela análise da Fig. 5 se observa que o fio de cobre quebrou para uma velocidade de desenrolamento mais baixa que para o latão, ou seja, respectivamente $W_s = 1 \text{ m/min}$ para o fio de cobre e $W_s = 2 \text{ m/min}$ para o fio de latão. No entanto, para ambos os materiais, a quebra do fio é devida à ocorrência repetida de descargas elétricas num mesmo ponto do fio, envolvendo uma diminuição do diâmetro do fio. Essa diminuição e a tensão mecânica constante de 10 N aplicada ao fio provoca a sua quebra.

Constata-se para o fio de latão uma estabilidade do valor da taxa de corte V_w em torno de 36 mm^2/min , para valores de W_s de 3 m/min até 9 m/min. Neste caso, a variação da velocidade W_s do fio não promoveu um aumento significativo da taxa de remoção de material V_w .

Para o caso do fio de cobre, o aumento da velocidade do fio entre $W_s = 3$ m/min e 9 m/min promoveu respectivamente valores de taxas de corte V_w de 36 mm²/min e 44 mm²/min. Isto significa que um aumento da velocidade W_s de 3/min para 9 m/min promoveu um aumento de aproximadamente 22% na taxa de corte V_w .

A fim de se comparar o rendimento da usinagem em termos da quantidade de fio de cobre consumido para os dois valores de W_s , toma-se o exemplo de uma amostra de 400 mm² (20 mm de altura X 20 mm comprimento). Neste primeiro caso, o tempo de usinagem é cerca de 11 minutos para $W_s = 3$ m/min com $V_w = 36$ mm²/min, o que representa um consumo de 33 metros de fio. Num segundo caso, para usinagem com $W_s = 9$ m/min que promove uma taxa de corte V_w 44 mm²/min, o tempo de usinagem é cerca de 9 minutos, e o consumo de fio de cobre é de 81 metros.

Comparando-se os dois casos acima, observa-se que para $W_s = 9$ m/min se obtém um aumento do consumo de fio de cobre da ordem de 145% para um aumento de apenas 22% da taxa de corte V_w , sendo de apenas 2 minutos a redução do tempo de usinagem. Aparece desta análise que, em termos de trabalho econômico, o valor de desenrolamento do fio de cobre de $W_s = 3$ m/min para o fio de cobre revestido é o mais interessante, dado que o aumento da taxa de corte V_w não é bastante significativo. Por análise direta do gráfico, esta conclusão é igualmente válida para o fio de latão.

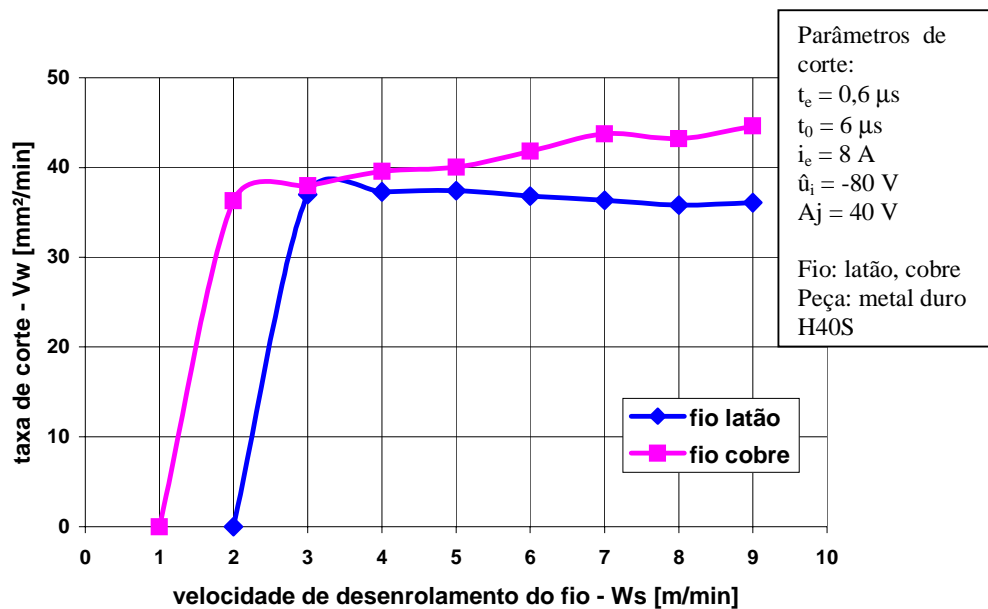


Figura 5 - Influência da velocidade de desenrolamento do fio W_s na taxa de corte V_w para fios de latão sem revestimento e de cobre com revestimento de zinco.

3.3 Variação da Tensão Média de Referência do Servomecanismo A_j

A tensão média de referência A_j do servomecanismo foi variada de 30 V a 55 V a fim de se observar a sua influência sobre a taxa de corte de material V_w , como destaca a Fig 6. Valores superiores a 55 V são utilizados somente em usinagem de acabamento do processo de WEDM. A tensão média de referência do servo A_j exerce uma importante influência sobre o rendimento da usinagem. Em primeiro lugar, a utilização de uma tensão A_j muito elevada significa uma diminuição da taxa de corte V_w pelo fato de aumentar demasiadamente a abertura da fenda de trabalho. Em segundo lugar, a utilização de uma tensão A_j muito baixa significa uma fenda de trabalho muito pequena e também uma taxa de corte V_w baixa. Neste ponto é importante estabelecer o nível de A_j que promova uma abertura da fenda de adequada para a obtenção da melhor taxa de corte V_w .

Pela análise da Fig. 6 é possível notar que variando o valor da tensão média A_j , ou seja, a amplitude de abertura da fenda de trabalho, aparecem diversos fenômenos. Entre os valores $A_j = 30$ V e $A_j = 40$ V, as taxas de corte V_w apresentam um elevado crescimento. Para o fio de cobre revestido com zinco é possível observar um aumento da taxa de corte V_w de respectivamente 15 mm²/min para aproximadamente 39 mm²/min. No caso do fio de latão acontece um aumento de 12 mm²/min para V_w de aproximadamente 36 mm²/min.

Para valores de A_j superiores a 45 V para os dois fios, a Fig. 6 indica que o processo apresenta redução gradativa da taxa de remoção V_w . Isto se deve a uma abertura excessiva da fenda de trabalho. A vista desses resultados, o valor ótimo da tensão média de referência para usinagem econômica com o fio de cobre e de latão é 40 a 45 V.

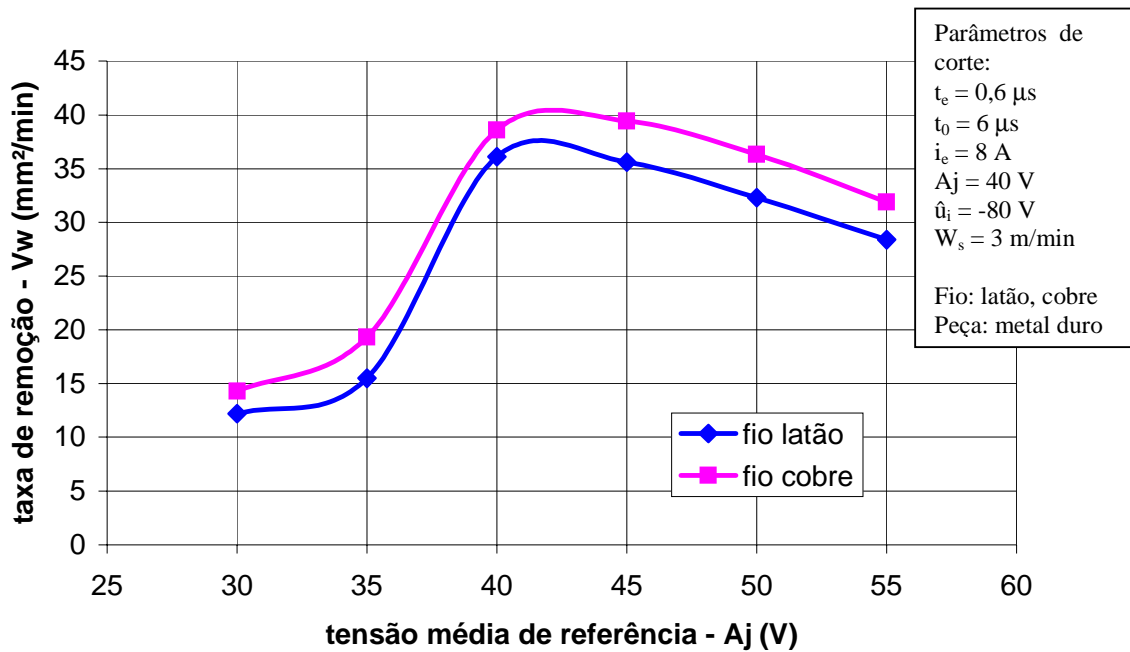


Figura 6 – Taxa de remoção V_w em função da tensão média de referência A_j .

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados e discussões apresentadas neste trabalho, podem-se estabelecer as seguintes conclusões sobre a WEDM de desbaste do metal duro H40S com fios de cobre revestido com zinco e fio de latão sem revestimento:

(a) As curvas de resultados da usinagem obtidas para os dois tipos de fio testados e para os três parâmetros variados apresentam comportamentos similares. No entanto, em termos de rendimento do processo, pode-se concluir que o fio de cobre revestido é o mais adequado para a fase de desbaste do metal duro H40S. No geral, o fio de cobre revestido promove uma taxa de corte V_w superior a 10 mm²/min em relação à alcançada com o fio de latão. Isto se deve ao fato de o zinco que recobre o fio de cobre possuir baixo ponto de fusão e alta capacidade de vaporização, promovendo um melhor rendimento do processo de WEDM.

(b) Uma velocidade de desenrolamento do fio W_s muito baixa promove a ruptura do fio. Essa ruptura aparece para um valor de $W_s = 2$ m/min para o fio de latão e de $W_s = 1$ m/min para o fio de cobre revestido. Para o fio de latão, o valor taxa de corte V_w se mantém constante em torno de 35 mm²/min para uma velocidade de desenrolamento do fio entre 2 e 9 m/min. Para o fio de cobre revestido observa pouca influência da velocidade W_s variando de 3 a 9 m/min sobre a taxa de corte

V_w . Logo, se recomenda que para WEDM com fios de cobre revestido e de latão seja utilizada uma velocidade W_s de 3 m/min, que representa um valor para uma usinagem econômica.

(c) A variação do tempo de intervalo t_o demonstra forte influência sobre o rendimento do processo, ou seja, obtém-se um aumento da taxa de corte V_w até um máximo de 44 mm²/min para o eletrodo de cobre revestido para um ótimo valor de $t_o = 6 \mu s$. No caso do latão alcançou-se o V_w máximo de 35 mm²/min com t_o ótimo de 6 μs . Após este valor de t_o , a taxa de corte cai progressivamente.

(d) O aumento da tensão A_j do servomecanismo provoca duas fases na variação taxa de corte V_w . Uma fase de aumento de V_w para valores de A_j entre 30 e 40 V e uma diminuição de V_w a partir de $A_j = 45$ V. O valor ótimo da tensão média de referência A_j para usinagem econômica com o fio de cobre revestido e de latão está entre 40 e 45 V.

5. REFERÊNCIAS

1. AMORIM, F.L. **Tecnologia de eletroerosão por penetração da liga de alumínio AMP8000 e da liga de cobre CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos**. 2002. 147f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
2. CHARMILLES Technologies. Disponível em: <<http://www.agie-charmilles.com>>. Acesso em: janeiro 2004.
3. LÖTTGEN, R. EDM DieSinking –state of the art. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR ELECTROMACHINING, 12, 1998, Aachen. Proceedings...Aachen:VDI,1998,1v., p.341-350.
4. VEREIN DEUTSCHER INGENIEUR. Elektroerosive Bearbeitung: Kennzeichnung und Abnahme von Anlagen, Richtlinie 3402. Dusseldorf, 1990. 2v.
5. PROHASZKA, J., et. al.. The effect of electrode material on machinability in wire electro-discharge machining. **Journal of Material Processing Technologies**, UK, v.69, n.1, p.233-237, 1997.

WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF CARBIDE USED TO PRODUCE PUNCHES AND DIES

Fred AMORIM

Pontifca Universidade Católica do Paraná - PUCPR
Departamento de Engenharia Mecânica
Rua Imaculada Conceição, 1155 - Prado Velho - 80215-901 - Curitiba, PR - Brasil
fred.amorim@pucpr.br

Carlos TEIXEIRA

Instituto Nacional das Ciências Aplicadas de Rouen - INSA
Departamento de Engenharia Mecânica
Avenue de l'Université BP08 - 76801 Saint-Étienne-du-Rouvray Cedex - France
carlos.teixeira@insa-rouen.fr

***Abstract.** Carbides are a sort of material that has been more and more used to produce punches and dies. This material offers good mechanical properties, such high strength and hardness. Punches and dies are normally produced by Wire Electrical Discharge Machining (WEDM). This occurs because these tools have very complex geometrical shapes that must be machined in very hard materials, which in many situations cannot be done by the conventional machining processes. The most up-to-date WEDM machines have their technological tables developed for some different pairs of wire electrode and work piece. However, these technological tables are not suitable for many different types of workpiece materials. This work has had as its main objective the development of process parameter settings for WEDM of H40S carbide. WEDMachining experiments using zinc-coated copper wire and brass wire were carried out. The process variables named: (a) interval time, (b) wire unwinding speed and (c) servo-control voltage were varied. The results of the experiments are organized as graphs and then discussed. The paper suggests proper parameter settings for WEDMachining the H40S carbide using zinc-coated copper wire and brass wire.*

***keywords:** Wire EDM, Carbides, Process parameters*