

## **INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DA OPERAÇÃO NO PROCESSO DE USINAGEM POR ELETROEROSÃO**

**Erick Patrocínio de Souza Oliveira, erickufmg@bol.com.br<sup>1</sup>**  
**Alexandre Mendes Abrão PhD., Abrão@ufmg.br<sup>1</sup>**  
**Fábio Nogueira Leão, fabio.leao@yahoo.co.uk<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais – Depto. Eng. Mecânica – Av. Pres. Antônio Carlos 6627, Belo Horizonte – MG – Brasil - CEP 31270.901.

<sup>2</sup>Mecânica União Ltda – Av. Rio Branco, 430 – Formiga – MG – Brasil – CEP 35570-000.

**Resumo:** *A usinagem por eletroerosão tem sido largamente utilizada na usinagem de materiais com elevada dureza e baixa tenacidade por não haver contato entre a ferramenta e a peça, minimizando problemas como deformações plásticas e vibrações mecânicas. Porém, além dos altos custos de operação, as taxas de remoção de material são baixas em relação aos processos convencionais. Fazem-se então necessários estudos que analisem o comportamento da operação e projetem operações mais econômicas. Este trabalho tem por objetivo realizar ensaios estatisticamente planejados com a finalidade de compreender melhor o comportamento da operação de eletroerosão por penetração do aço ferramenta ABNT H13 no estado temperado (42HRC), empregando eletrodos de grafita. Os resultados indicaram que a taxa de remoção de material e a rugosidade são dependentes principalmente da corrente elétrica e, em menor intensidade, do tempo de pulso que apresentou uma interação com a corrente elétrica.*

**Palavras-chave:** *eletroerosão, parâmetros do processo, planejamento estatístico do experimento*

### **1. INTRODUÇÃO**

O crescente volume de produtos fabricados no mundo globalizado acirra a competitividade. Com uma demanda tão expressiva, as empresas têm buscado a modernização e otimização de seus processos. Com os crescentes requisitos de “design” dos produtos da indústria moderna, as formas a serem usinadas têm se tornado cada vez mais complexas. A usinagem por eletroerosão é um processo térmico que utiliza a energia proveniente de descargas elétricas como fonte de calor para fundir e vaporizar porções de material da peça usinada, (Puertas e Luis, 2003, e Kiyak e Akir, 2007). Este processo tem sido largamente utilizado na usinagem de materiais com elevada dureza e baixa tenacidade devido ao fato de não haver contato entre a ferramenta e a peça, sendo assim, problemas como deformações plásticas e vibrações mecânicas (típicos dos processos de usinagem convencional como torneamento, furação e fresamento) são eliminadas. Como não há esforço significativo na ferramenta, cavidades com diâmetros mínimos podem ser usinadas sem que haja deflexão em superfícies complexas e ângulos rasos de penetração (Ho e Newman, 2003).

Basicamente, o princípio de funcionamento da eletroerosão consiste em uma peça de material condutor e uma ferramenta, também condutora, colocadas em uma posição de trabalho de tal forma que não se toquem. Elas são separadas por um espaçamento que é preenchido por um fluido dielétrico, processo que, normalmente, é realizado dentro de um tanque. Peça e eletrodo são conectados a uma fonte de corrente contínua pulsada. Desta forma, quando o espaçamento entre a peça e o eletrodo é suficientemente pequeno ocorre uma descarga elétrica que se concentra numa área muito pequena da peça como, por exemplo, uma crista de rugosidade. No ato da descarga a energia elétrica é convertida em calor e aquece uma pequena porção de matéria até que esta se funda e vaporize. As temperaturas variam da na faixa de 8000 a 20000°C (Shobert e Boothroyd, apud Ho e Newman, 2003). Se o fluxo de corrente subitamente cessa, o canal da descarga entra em colapso expulsando o material da região e criando uma pequena cratera. Quando uma descarga é seguida de outra e assim sucessivamente, por meio de uma corrente contínua pulsante, a superfície é continuamente erodida. Assim a quantidade de material removida pode ser efetivamente controlada para produzir componentes precisos e complexos.

O processo de usinagem por eletroerosão é uma tecnologia relativamente nova, criada nos anos 40. Apesar do processo ser amplamente utilizado em diferentes segmentos industriais, pouca pesquisa é realizada no Brasil e no Estado de Minas Gerais em particular. As empresas que trabalham com o processo se baseiam em informações de catálogo dos fabricantes para ajustarem a máquina, na expectativa de conseguirem um rendimento melhor, o que nem sempre acontece. Esse estudo tem como objetivo investigar a influência de alguns parâmetros do gerador de pulsos na

usinagem do aço ferramenta ABNT H13 com eletrodo de grafite. Técnicas de planejamento estatístico dos experimentos foram empregadas para alcançar o objetivo proposto.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Planejamento Estatístico do Experimento

Planejamento Estatístico do Experimento (PEE), conhecido na língua inglesa como Design of Experiments (DoE), consiste de um método robusto utilizado para o estabelecimento de relações causa-efeito em qualquer processo que tenha entradas e saídas mensuráveis. PEE pode ser utilizado tanto para identificar os parâmetros de entrada que mais afetam as saídas de um processo como também para a otimização do mesmo.

Existem vários tipos de PEE, cada qual com suas vantagens, desvantagens e aplicações específicas. Dentre os diversos tipos se destacam o fatorial completo e fracionado de dois níveis, Plackett-Burman, Taguchi, Composto Central e Box-Behnken. Uma característica comum entre os tipos de PEE mencionados é a estrutura fatorial da matriz experimental, i.e., durante a realização dos experimentos mais de um fator (ou dado de entrada) é variado simultaneamente, ao contrario do método tradicional de se variar um fator de cada vez. O uso de fatorial torna possível a identificação de interações entre fatores – o que é extremamente importante tanto na otimização de processos quanto na identificação dos parâmetros que mais afetam o desempenho de um processo.

Após a construção da matriz experimental, condução dos experimentos e coleta de dados, os resultados são analisados por meio de uma serie de ferramentas estatísticas tais como o teste de hipóteses, análise de variância (ANOVA), análise de regressão, método dos mínimos quadrados, gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, gráfico de interações e de contorno. A análise dos resultados bem como a construção dos modelos estatísticos pode ser feita através de softwares tais como o Minitab e Design-Expert.

Existem diversas publicações sobre o Planejamento Estatístico do Experimento, dentre as quais se destacam Montgomery (2001), Antony (2005) e Anderson (2000). Importante mencionar também o excelente “Engineering Statistics Handbook” publicado pela NIST/SEMATECH e disponível gratuitamente em [www.itl.nist.gov/div898/handbook/](http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/).

Neste trabalho, o planejamento fatorial completo de dois níveis foi utilizado para construir a matriz experimental apresentada na Tab. (1). O software Minitab V15 foi utilizado para a construção da matriz, processamento dos dados e análise dos resultados. A Análise de Variância, assim como o cálculo dos efeitos padronizados foram realizados utilizando-se um nível de significância estatística  $\alpha = 0.05$ .

**Tabela 1. Matriz Experimental**

Experimento	Corrente [A]	T. de pulso [ $\mu$ s]	T. de descanso [ $\mu$ s]
1	51,4	50	15
2	51,4	50	50
3	6,8	50	15
4	6,8	50	50
5	51,4	200	15
6	51,4	200	50
7	6,8	200	15
8	6,8	200	50

### 2.2. Materiais e Equipamentos

O material usinado foi o aço ferramenta ABNT H13 no estado temperado, revenido para uma dureza média de 42 HRC e dimensões de 240mm x 180mm x 30mm. Os eletrodos foram confeccionados em grafita (fornecida pela SGL Carbon) de forma a se obter uma seção transversal quadrada (24 x 24 mm) e com furo axial passante de 4mm de diâmetro. O fluido dielétrico utilizado nos experimentos (Arclean Eletron ) foi aplicado na área de usinagem (através de um jato lateral e do furo existente no eletrodo) a uma pressão de 1,7 kgf/cm<sup>2</sup>.

Os ensaios foram realizados numa máquina de usinagem de eletroerosão por penetração, Engemaq EDM 200NC, com gerador de 60A. O tempo fixado para cada ensaio foi de 25 minutos. Após os testes as cavidades resultantes foram medidas para que o volume de material removido e a taxa de remoção de material fossem calculados. As cavidades foram medidas por meio de um equipamento de medição tridimensional TESA modelo Micro-Hite 3D.

A rugosidade superficial das cavidades geradas pela usinagem foi medida por um rugosímetro Taylor Hobson modelo Surtronic 25. As grandezas obtidas foram  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_t$ , sendo que para cada parâmetro foram realizadas quatro medições. O comprimento de amostragem foi de 8mm. O resultado apresentado é a média aritmética de três das quatro medições realizadas.

### 2.3. Ensaios Preliminares

Por se tratar de uma operação onde a estabilidade da operação é mantida devido a um equilíbrio entre a limpeza do espaçamento peça-eletrodo e conseqüentemente do tempo de pulso, a formação de arcos destrutivos e curtos-circuitos se tornam freqüentes em determinadas combinações. Com a realização dos ensaios preliminares buscou-se escolher parâmetros que possibilitassem operações mais estáveis e evitassem a influência desses fenômenos no resultado do experimento. Os ensaios preliminares também serviram de experiência na operação do equipamento evitando que os erros de operação cometidos nos ensaios preliminares afetassem o resultado nos ensaios definitivos.

Os ensaios preliminares foram extremamente úteis principalmente no que se refere à fabricação do eletrodo. Inicialmente foram utilizados eletrodos fabricados manualmente através de furadeira manual, limas e lixas. Porém a forma irregular dos eletrodos aliada à ineficiência da circulação de dielétrico resultaram em operações extremamente instáveis. Arcos destrutivos e curtos-circuitos provocaram o desgaste extremo do eletrodo ocasionando a degradação das superfícies de usinagem e a expulsão de grafite do eletrodo para o tanque. Esse resíduo do eletrodo foi responsável pela formação de depósitos de grafite entre o eletrodo e a peça. Esse depósito provocava a formação de um curto circuito permanente, o que eliminava a diferença de potencial entre a peça e o eletrodo e provocava a interrupção da operação de usinagem. Um exemplo de cavidade e o ponto onde ocorreu o curto-circuito podem ser visto na Fig. (1).



**Figura 1. Depósito de grafite que anulou a diferença de potencial peça-eletrodo nos ensaios preliminares**

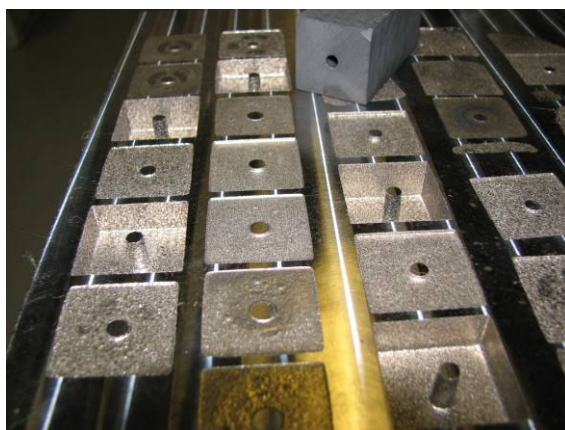
Após uma análise da operação decidiu-se por usinar os eletrodos com a finalidade de melhorar sua geometria. Além do fresamento das superfícies optou-se por confeccionar furos passantes de 4mm de diâmetro na direção axial do eletrodo. Esses furos teriam como finalidade a injeção de dielétrico facilitando a limpeza do espaçamento peça-eletrodo. Após a aplicação dos novos eletrodos a operação se tornou muito mais estável. Cavidades puderam ser feitas com a injeção do dielétrico através do eletrodo sem a formação dos depósitos de grafite que ocorriam antes. Os parâmetros a serem combinados no planejamento estatístico fatorial de dois níveis foram então decididos.

Os valores de corrente, tempo de pulso e de descanso foram escolhidos de forma a cobrir a maior faixa possível fornecida pelo gerador para uma operação de usinagem estável.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As cavidades geradas nos experimentos, após usinagem de 25 minutos por ensaio, podem ser observadas na Fig. (2).

Os valores de rugosidade e material removido resultantes de cada ensaio são apresentados na Tab.(2) e (3), respectivamente. Um dos pressupostos básicos para a condução da análise de variância, parte integrante das análises realizadas no âmbito do PEE, é que os dados de saída apresentem uma distribuição estatística normal. Como os dados de taxa de remoção não atendiam a esse pressuposto os mesmos foram transformados matematicamente (Montgomery, 2001) por meio de logaritmo natural de modo a atender ao requisito de distribuição normal.



**Figura 2. Cavidades resultantes dos ensaios**

**Tabela 2. Síntese dos resultados de rugosidade**

Nº ensaio	Corrente [A]	Tempo de pulso [ $\mu$ s]	Tempo de descanso [ $\mu$ s]	Rugosidade Ra [ $\mu$ m]	Rugosidade Rz [ $\mu$ m]	Rugosidade Rt [ $\mu$ m]
1	51,4	50	15	6,61	33,7	41,8
2	51,4	50	50	6,48	31,2	46,2
3	6,8	50	15	4,02	23,3	28,5
4	6,8	50	50	4,25	22,8	29,7
5	51,4	200	15	7,49	38,2	54,6
6	51,4	200	50	8,06	39,1	57,1
7	6,8	200	15	3,61	17,4	22,9
8	6,8	200	50	4,34	23,5	30,5

**Tabela 3. Síntese dos resultados de remoção de material.**

Nº ensaio	Corrente [A]	Tempo de pulso [ $\mu$ s]	Tempo de descanso [ $\mu$ s]	Volume removido [ $\text{mm}^3$ ]	Taxa de remoção de material [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ]	ln da taxa de remoção de material
1	51,4	50	15	6515,6	260,6	5.56
2	51,4	50	50	5353,9	214,2	5.37
3	6,8	50	15	447,8	17,9	2.88
4	6,8	50	50	268,2	10,7	2.37
5	51,4	200	15	6032,9	241,3	5.49
6	51,4	200	50	7957,6	318,3	5.76
7	6,8	200	15	142,4	5,7	1.74
8	6,8	200	50	121,1	4,8	1.57

As influências dos parâmetros de usinagem sobre a taxa de remoção de material e rugosidade média são apresentadas, respectivamente, nas Fig. (3) e (4). Os valores de “Efeitos Padronizados” apresentados no eixo das abscissas são utilizados para quantificar o efeito de cada parâmetro sobre os resultados. Os efeitos padronizados foram determinados dividindo-se o coeficiente de regressão de cada termo, apresentado no eixo das ordenadas, pelo erro padrão de cada coeficiente de regressão (Montgomery, 2001). As barras horizontais que se estendem além da linha tracejada vertical correspondem aos termos que são estatisticamente significantes para um nível de significância de  $\alpha = 0.05$ , i.e., existe uma probabilidade de 95% de que o termo seja significativo. A posição da linha tracejada foi determinada através do método de Lenth (Montgomery, 2001).

A corrente elétrica foi, de longe, o fator que mais influenciou tanto a taxa de remoção de material como a rugosidade. O tempo de descanso e suas interações com os outros parâmetros não tiveram um impacto significativo no processo de usinagem. Por outro lado, o tempo de pulso é importante para a taxa de remoção de material e sua interação com a corrente elétrica é importante tanto para a taxa de remoção quanto para a rugosidade superficial.

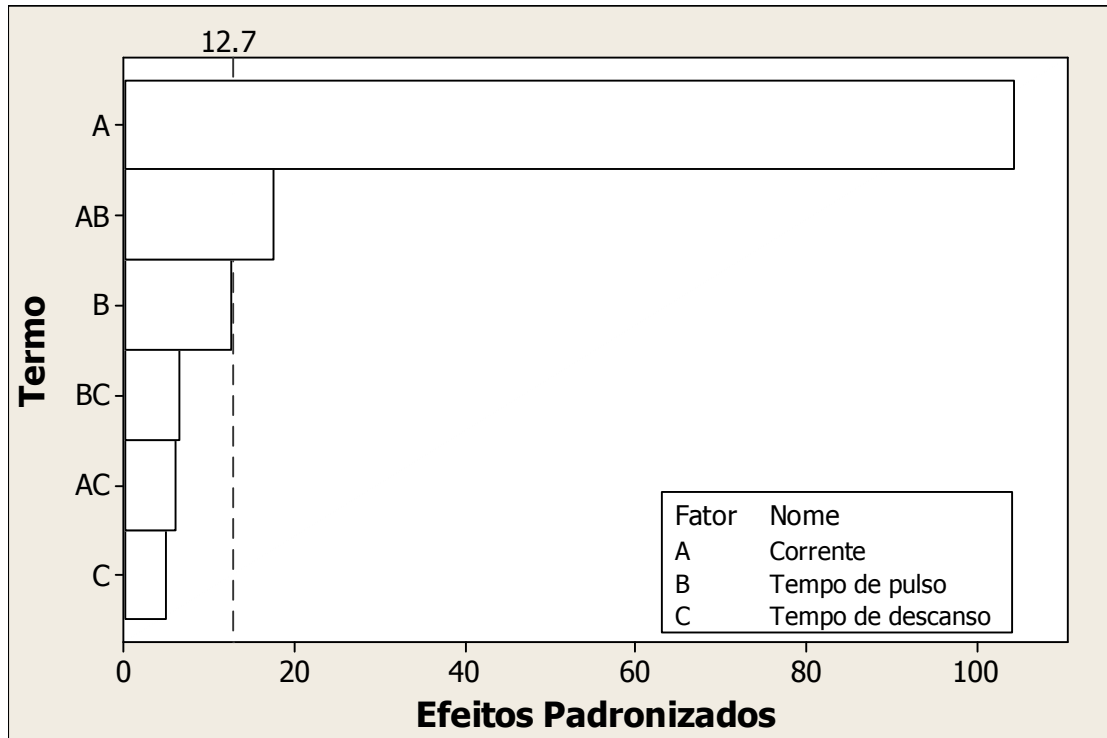


Figura 3. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados sobre a taxa de remoção de material (após transformação logarítmica) para nível de significância estatística  $\alpha=0.05$

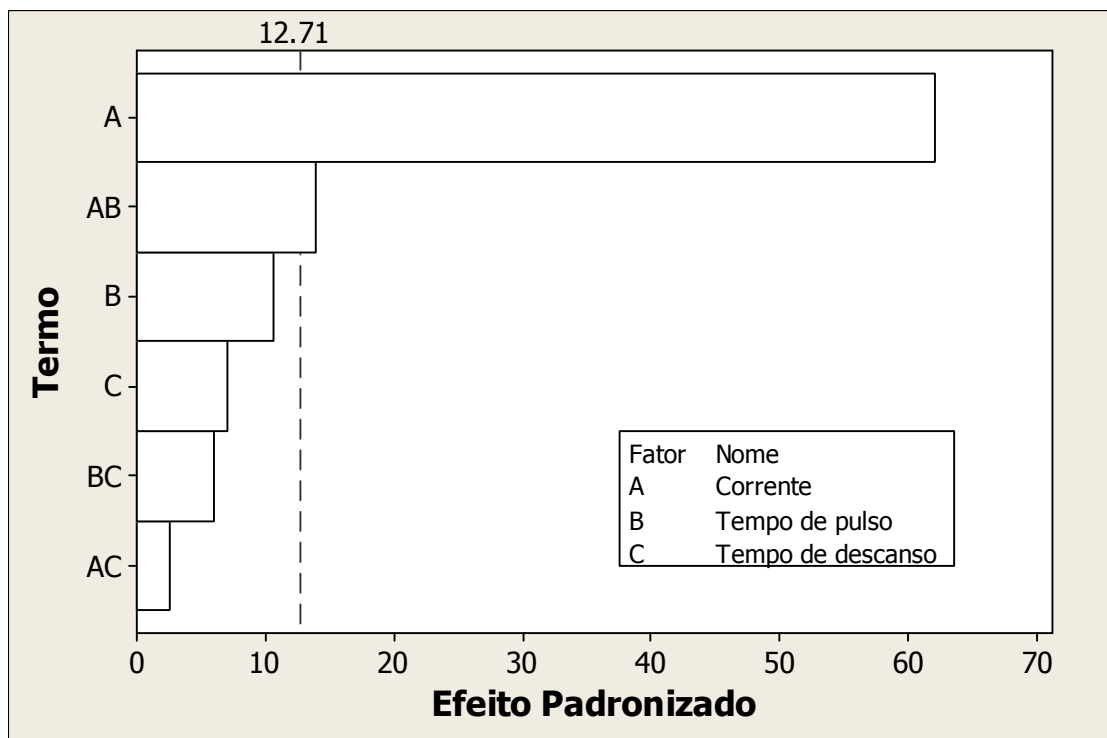
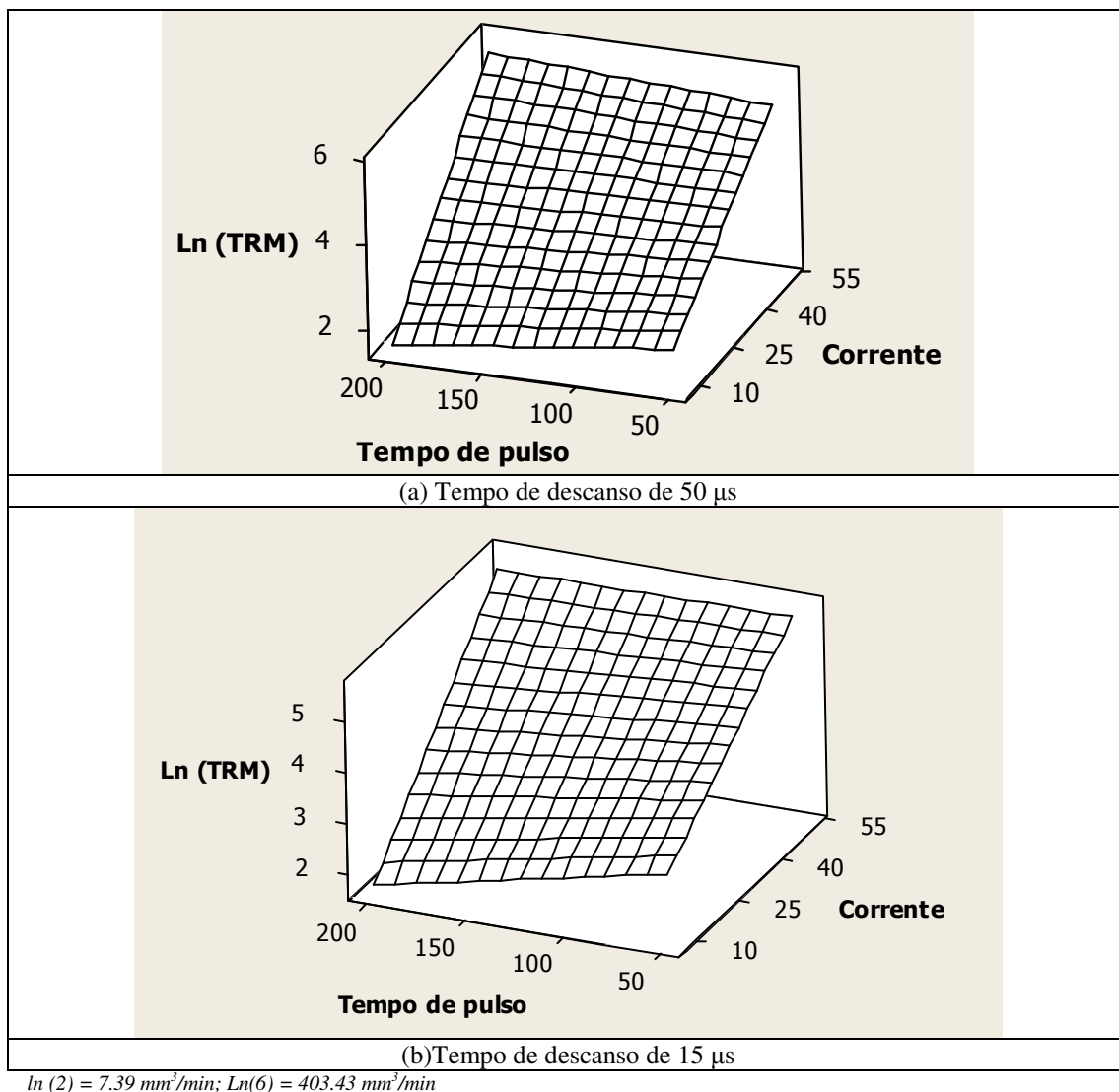


Figura 4. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados sobre a rugosidade média (Ra) para nível de significância estatística  $\alpha=0.05$

As influências do tempo de pulso e da corrente elétrica sobre o logaritmo da taxa de remoção de material (TRM) e a rugosidade média (Ra) são apresentadas, respectivamente, nas Fig. (5) e (6). É interessante observar que esses gráficos tridimensionais apresentam formas bem semelhantes, i.e., os efeitos do tempo de pulso e da corrente elétrica sobre a

taxa de remoção e a rugosidade são semelhantes; da mesma forma que ocorreu nos gráficos de Pareto apresentados nas Fig. (3) e (4). Tanto a taxa de remoção de material quanto a rugosidade aumentam linearmente com o aumento da corrente elétrica; sendo que os maiores valores de taxa de remoção e de rugosidade foram obtidos com os níveis máximos de corrente elétrica e de tempo de pulso.

A corrente elétrica é a principal fonte de calor na usinagem por eletroerosão e, portanto, é de se esperar que a mesma seja o principal parâmetro a afetar a taxa de remoção de material e a integridade superficial, incluindo a rugosidade (Leão, 2007). Se o valor de corrente elétrica é fixado a 1 A, por exemplo, o catodo emitira  $6.25 \times 10^8$  elétrons por segundo. Esses elétrons, que se locomovem a velocidade da luz (Jameson, 2001) e os íons positivos, que se locomovem a uma velocidade inferior devido a maior massa, tem suas energias cinéticas transformadas em calor quando os mesmos colidem com as superfícies do eletrodo e da peça de trabalho. É de esperar, portanto, que quanto maior a corrente elétrica maior o calor gerado e, conseqüentemente, maior a taxa de remoção de material e a rugosidade, fato que foi confirmado nesse trabalho e mostrado nas Fig. (5) e (6). Entretanto, a aplicação de valores excessivos de corrente elétrica não resulta em um correspondente aumento da taxa de remoção de material como tem sido observado por alguns pesquisadores (Lee, 2001; Iwai, 2001). Ou seja, embora os gráficos apresentados nas Fig. (5) e (6) indiquem uma relação linear entre a corrente elétrica e a taxa de remoção de material, caso a faixa de corrente elétrica utilizada nesse trabalho fosse maior, é possível que a relação entre corrente elétrica e taxa de remoção apresentasse uma forma quadrática como foi demonstrado em um estudo anterior (Leão, 2007).



**Figura 5. Influência do tempo de pulso e da corrente elétrica sobre o logaritmo da taxa de remoção de material para tempo de descanso de (a) 50 µs e (b) 15 µs**

As Figuras (3) e (4) mostraram uma importante interação entre a corrente elétrica e o tempo de pulso que influenciou nos valores de taxa de remoção de material e de rugosidade superficial média apresentados nas Fig. (5) e (6). Quando a corrente elétrica é mantida constante em níveis mais baixos, como por exemplo, 10 A, o aumento do tempo de pulso diminui a taxa de remoção de material (Fig. (5)) e, em menor intensidade, a rugosidade média (Fig. (6)).



Por outro lado, para valores mais elevados de corrente fixados em 55 A, o aumento do tempo de pulso tende a diminuir um pouco a taxa de remoção de material (Fig. (5)) e, consideravelmente, a rugosidade média (Fig. (6)).

O tempo de pulso compreende o intervalo em que a descarga elétrica se realiza. Pode-se se esperar, portanto, que quanto maior a o tempo de pulso maior será a taxa de remoção de material e a rugosidade superficial. Por outro lado, para valores mais baixos de corrente elétrica, a Fig. (5) mostra que valores elevados de tempo de pulso resultam em menor taxa de remoção de material. É possível que isso tenha acontecido devido a uma menor estabilidade do canal de descarga.

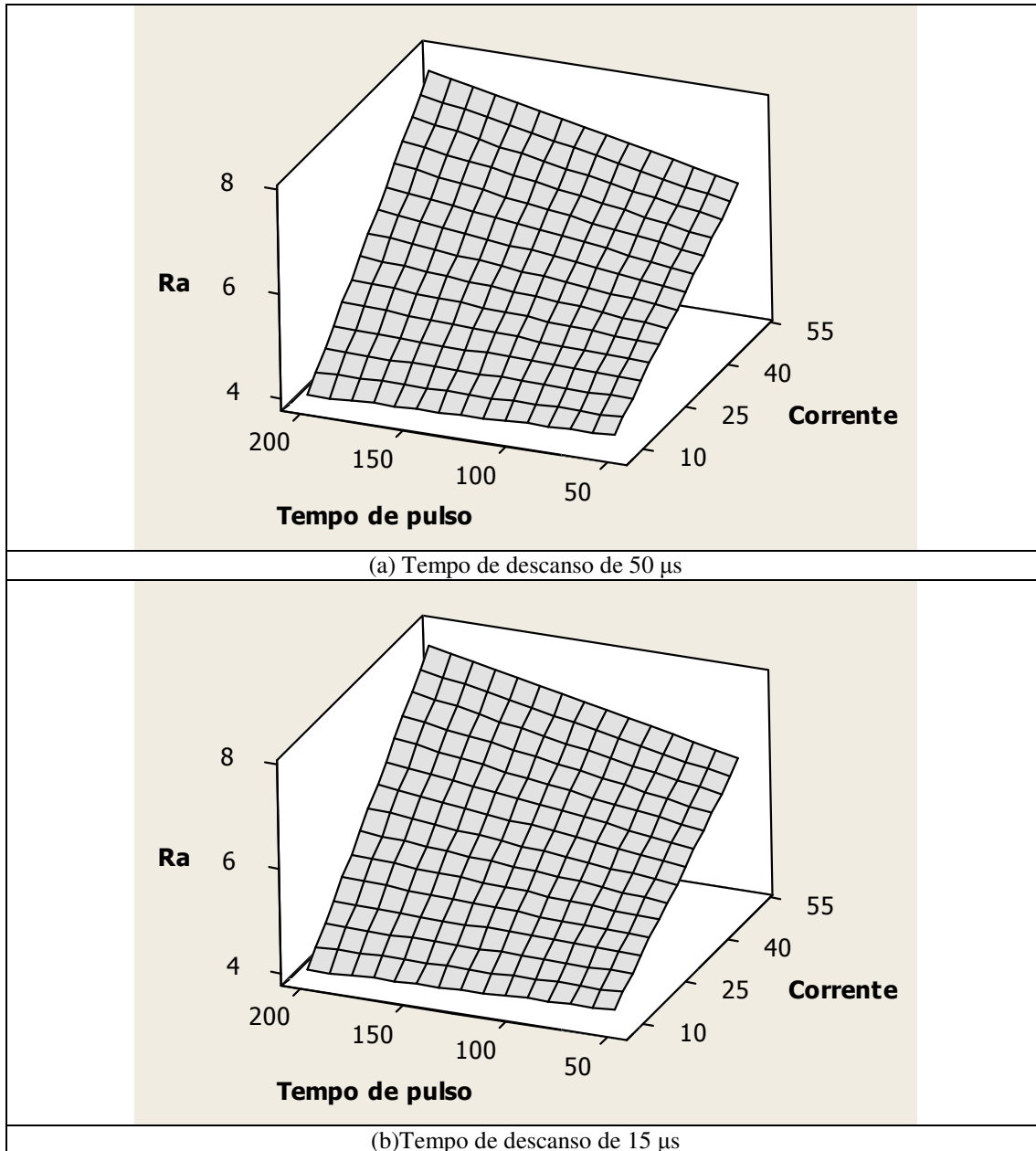


Figura 6. Influência do tempo de pulso e da corrente elétrica sobre a rugosidade média ( $R_a$ ) para tempo de descanso de (a) 50  $\mu$ s e (b) 15  $\mu$ s

#### 4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados o parâmetro que mais influenciou no acabamento e na taxa de remoção de material durante a usinagem por eletroerosão do aço ABNT H13 com eletrodos de grafita, para faixa de valores testados, foi a corrente elétrica. O tempo de pulso e sua interação com a corrente elétrica também foram importantes. Por outro lado, o tempo de descanso teve sua influência considerada estatisticamente insignificante.

Tanto a taxa de remoção de material quanto a rugosidade média  $R_a$  aumentam com a elevação da corrente elétrica. Os valores mais elevados de taxa de remoção de material (318,3mm<sup>3</sup>/min) e de rugosidade média  $R_a$  (39,1 $\mu$ m) foram

obtidos com corrente elétrica e tempo de pulso fixados em 51.4 A e 200 $\mu$ s, respectivamente. Por outro lado, o valor mínimo de corrente elétrica (6.8 A) combinado com o tempo de pulso de 200 $\mu$ s resultaram em mínima rugosidade  $R_a$  (17.4 $\mu$ m) e taxa de remoção de material (4.8mm<sup>3</sup>/min).

Este trabalho mostrou que a influência do tempo de pulso na taxa de remoção de material e na rugosidade superficial depende dos valores de corrente elétrica empregados. Para valores mais baixos de corrente elétrica, a diminuição do tempo de pulso aumenta a taxa de remoção de material e, de maneira menos significativa, a rugosidade média. Por outro lado, quando a corrente elétrica é mantida fixa em seu nível mais elevado, a diminuição do tempo de pulso reduz significativamente a rugosidade média e, de maneira menos intensa, a taxa de remoção de material.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG (Processo nº TEC 281/06), SGL Carbon e Villares Metals S/A pelo fornecimento do material de consumo e Traterminas Ltda. pelo tratamento térmico do corpo de prova.

## 6. REFERÊNCIAS

- Ho K.H., Newman S.T., State of the art electrical discharge machining (EDM), *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 43 (2003) 1287–1300.
- Kiyak M., Akır O.C., Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel, *Journal of Materials Processing Technology* 191 (2007) 141–144.
- Puertas I., Luis C.J., A study on the machining parameters optimisation of electrical discharge machining, *Journal of Materials Processing Technology* 143–144 (2003) 521–526.
- Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*, 5<sup>TH</sup> Edition, John Wiley & Sons, New York, USA, 2001.
- Anderson, M.J., Whitecomb, P.J., *DOE Simplified – Practical Tools for Effective Experimentation*, Productivity, Oregon, USA, 2000.
- Antony, J., *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, Butterworth Heineman, 2005.
- Leão, F.N., *Optimisation of EDM Fast Hole Drilling for Aerospace Applications*, Tese de Doutorado, Universidade de Nottingham, 2007, Inglaterra.
- Jameson, E.C., *Electrical Discharge Machining*, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, USA, 2001.
- Lee, S.H.; Li, X.P.; “Study of the Effect of Machining Parameters on the Machining Characteristics in Electrical Discharge Machining of Tungsten Carbide”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 115, pp. 344-358, 2001.
- Imai, Y.; Hiroi, M.; Nakano, M.; “Investigation of EDM Machining States Using Ultrasonic Waves”, *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium for Electromachining ISEM XIII*, Vol. 1, pp.109-116, 2001.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



## INFLUENCE OF OPERATIONAL PARAMETERS ON ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Erick Patrocínio de Souza Oliveira, erickufmg@bol.com.br<sup>1</sup>

Alexandre Mendes Abrão PhD., Abrão@ufmg.br<sup>1</sup>

Fábio Nogueira Leão, fabio.leao@yahoo.co.uk

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais – Depto. Eng. Mecânica – Av. Pres. Antônio Carlos 6627, Belo Horizonte – MG – Brasil - CEP 31270.901,

### **Abstract:**

*Electrical discharge machining has been widely used for the machining of materials with high hardness and low tenacity. Since there is no contact between tool and workpiece, typical problems associated with conventional machining such as plastic deformation and vibrations are avoided. However, material removal rates are lower and operational costs are higher. Studies aiming to improve the performance and costs of electrical discharge machining are, therefore, necessary to be carried out in order to improve its costs effectiveness. The objective of this work is to investigate the influence of generator parameters in the die sink electrical discharge machining of tool-steel ABNT H13 (hardened to 42HRC) using graphite electrodes. Through the use of the Design of Experiments approach it was found that material removal rate and surface roughness depend mainly on the electric current employed and, to some extent, on the pulse On-time that showed a significant interaction with electric current.*

**Keywords:** *electrical discharge machining, generator parameters, design of experiments*