

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO NO DESGASTE DO ELETRODO E NA PRODUTIVIDADE NO DESBASTE DO AÇO INOXIDÁVEL 304 E DO INCONEL 718

Helaine Pereira Neves, helaine.neves@fieb.org.br¹

Guilherme Oliveira de Souza, guilherme.souza@fieb.org.br¹

¹ SENAI CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador - Ba

Resumo: O conhecimento dos parâmetros que permitem uma maior produtividade é importante para redução do tempo de fabricação de uma peça. Ao mesmo tempo, faz-se necessário reduzir o custo do processo através da diminuição do consumo de insumos. No processo de eletroerosão por penetração, o principal insumo utilizado é o eletrodo-ferramenta e, portanto, a redução do seu desgaste leva a uma diminuição nos custos associados à fabricação de uma determinada peça. Combinar estes dois fatores, não é uma atividade muito fácil. Para tanto, é necessário um entendimento sobre como os parâmetros do processo afetam a produtividade e o desgaste relativo do eletrodo para estabelecimento de valores que potencializem o processo em relação a estes dois aspectos. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo encontrar os parâmetros mais influentes sobre a produtividade e o desgaste do eletrodo durante a etapa de desbaste no processo de eletroerosão por penetração das ligas aço inoxidável 304 e INCONEL 718. Para isso, foram realizados ensaios com estes materiais, nos quais 9 parâmetros do processo foram variados em dois níveis e foi medida a sua produtividade e calculado o desgaste relativo do eletrodo. A duração do processo de eletroerosão foi de 30 min para todas as amostras. Para obtenção da produtividade do processo, foi considerada a taxa de remoção de material da peça através da medição da diferença de massa antes e após a usinagem. Da mesma forma, foi medido o desgaste relativo do eletrodo. Com o auxílio de um software de estatística, os resultados dos ensaios foram tratados e analisados. Como resultado destes experimentos constatou-se que ambos os materiais estudados apresentaram resultados parecidos, sendo que os parâmetros mais influentes na produtividade do processo foram: polaridade, corrente de pico e lavagem. Entretanto, para o desgaste relativo do eletrodo, nenhuma variável apresentou influência estatística considerável.

Palavras-chave: EDM, INCONEL 718, Aço Inoxidável 304

1. INTRODUÇÃO

O processo de usinagem por eletroerosão (EDM – Electrical Discharge Machining) é muito utilizado na fabricação de peças compostas por materiais que apresentam usinabilidade ruim pelos processos convencionais e na obtenção de formas complexas com elevada precisão dimensional. A aplicação mais usual deste processo está ligada às ferramentarias na produção de moldes e estampos e à indústria aeroespacial no que tange a fabricação de componentes em ligas de alta resistência como os aços inoxidáveis e as superligas de titânio e a base de níquel (Amorim, 2002).

Na eletroerosão por penetração, o eletrodo-ferramenta possui a forma espelhada da desejada para a cavidade a ser produzida na superfície do eletrodo-peça e a obtenção desta forma se dá através da remoção sucessiva de pequenas quantidades de material por microfusão localizada através da aplicação de descargas elétricas pontuais entre os eletrodos que se encontram submersos em um meio isolante. Neste tipo de usinagem, não há contato mecânico entre a ferramenta e a peça, evitando assim a formação de tensões mecânicas e problemas de vibração durante o processo. Desta forma, a eletroerosão pode ser aplicada em qualquer material condutor elétrico e em alguns materiais semicondutores, sendo que as propriedades mecânicas dos mesmos, como resistência e dureza, apresentam pouca influência sobre o desempenho do processo. Entretanto, as propriedades termofísicas como condutividade térmica e elétrica, a expansão térmica, a temperatura de fusão e ebulição, influenciam consideravelmente o processo (Ho, Newman, 2003; Amorim, 2007).

Algumas teorias foram desenvolvidas para explicar o fenômeno que ocorre durante o processo de eletroerosão. Contudo, a teoria mais aceita no meio científico é a termoelétrica que distingue quatro fases consecutivas durante a ocorrência de uma descarga elétrica, que podem ser identificadas na Fig. (1): ignição (fase 1), formação do canal de plasma (fase 2), fusão e evaporação de material em ambos os eletrodos (fase 3) e ejeção do material fundido causando a formação de uma microcratera (fase 4) (Dibitonto *et al.*, 1989).

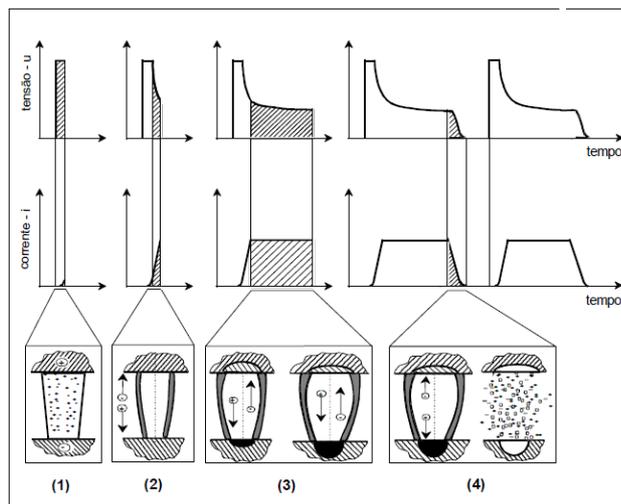


Figura 1: Fases de uma descarga elétrica no processo EDM (Amorim, 2002).

Na peça eletroerodida ocorrem algumas transformações superficiais no metal base decorrentes da formação de uma zona termicamente afetada pelo calor gerado durante as descargas elétricas e de uma camada de material ressolidificado denominada “camada branca”, durante o resfriamento brusco que o fluido dielétrico proporciona no fim da descarga. Estas regiões estão mais propícias à ocorrência de defeitos e falhas que podem comprometer a aplicação do produto final (Santos, 2007).

O desempenho do processo de eletroerosão e a sua capacidade em conferir as características necessárias à peça estão diretamente ligados aos parâmetros elétricos utilizados. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo a identificação dos parâmetros mais influentes no desgaste relativo do eletrodo e na taxa de remoção da etapa de desbaste do processo de eletroerosão por penetração do aço inoxidável austenítico 304 e da liga de níquel INCONEL 718, utilizando eletrodos de cobre eletrolítico.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O aparato experimental e o procedimento adotado para todas as séries de ensaios realizados são apresentados a seguir.

2.1. Aparato Experimental

Os ensaios foram realizados em uma máquina de eletroerosão por penetração CNC da ACTSpark, modelo SA 20.

Como fluido dielétrico foi utilizado um hidrocarboneto hidrogenado produzido pela Archem Química e aplicado convencionalmente para este tipo de processo na indústria.

Os eletrodos-ferramenta foram usinados em cobre eletrolítico na forma de barras cilíndricas escalonadas com uma seção principal medindo 20 mm de diâmetro e 53 mm de comprimento, além de um furo central de 4 mm de diâmetro para lavagem pelo centro do eletrodo, e outra seção com diâmetro 50,8 mm de diâmetro e 7 mm de comprimento, que serviu como base para fixação do eletrodo ao System 3R. A Fig. (2) mostra o desenho e a foto de um dos eletrodos utilizados nestes ensaios. A fixação do eletrodo-ferramenta na máquina foi realizada por um sistema System 3R.

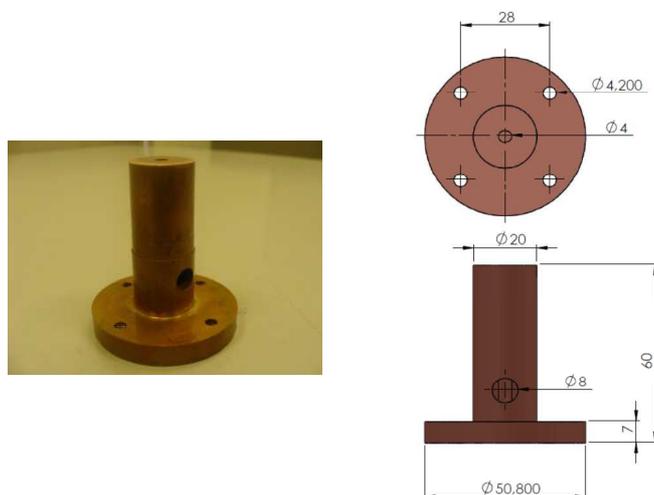


Figura 2. Eletrodo-ferramenta utilizado nos experimentos.

Como corpos de prova foram utilizados blocos de aço inoxidável austenítico 304 e de INCONEL 718 com dimensões de 30 mm x 30 mm e espessura de 10 mm. Estes blocos foram cortados pelo processo de eletroerosão a fio e retificados para garantir um acabamento inicial uniforme. Amostras dos corpos de prova de aço inoxidável 304 e INCONEL 718 após a usinagem sobre as mesmas condições são apresentadas na Fig. (3).

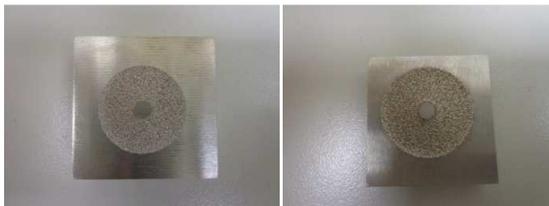


Figura 3. Corpos de prova de Aço Inoxidável 304 e INCONEL 718, respectivamente, após a usinagem sob as mesmas condições.

2.2. Procedimento Experimental

Para a identificação dos parâmetros mais influentes no desgaste relativo do eletrodo e na taxa de remoção da etapa de desbaste do processo de eletroerosão por penetração do aço inoxidável austenítico 304 e da liga de níquel INCONEL 718, utilizando eletrodos de cobre eletrolítico, foram realizados quatro experimentos fatorial fracionário com resolução IV. Foram considerados todos os efeitos principais e as interações duplas, e não foram realizadas réplicas. Estes experimentos foram planejados e analisados com o auxílio das ferramentas estatísticas da versão 14 do software Minitab.

Foram escolhidas como variáveis a serem avaliadas, os parâmetros do processo de eletroerosão descritos abaixo:

- **Polaridade:** quando o eletrodo-ferramenta está localizado no polo positivo do campo elétrico formado entre este e a peça, a polaridade do processo é definida como positiva.
- **Corrente de Pico:** corrente máxima aplicada ao processo.
- **t_{on} :** tempo do ciclo do processo onde há corrente e, conseqüentemente, a usinagem ocorre.
- **t_{off} :** tempo entre duas descargas elétricas consecutivas, necessário para a deionização do canal e o reestabelecimento das propriedades do fluido dielétrico.
- **Tensão:** o valor disposto na máquina é o da tensão em aberto, estabelecida no momento inicial do processo de eletroerosão. Com a intensificação dos canais transportadores de energia entre o eletrodo e a peça há a diminuição brusca deste valor até a tensão de ruptura do fluido e a conseqüente formação do canal de plasma.
- **Lavagem:** para todos os ensaios, foram adotados movimentos de afastamento do eletrodo-ferramenta a intervalos de tempo constantes para a limpeza da região erodida. Entretanto, neste trabalho foi avaliada a influência da adição de um sistema de lavagem central por meio de um furo localizado no centro da ponta do eletrodo, com pressão de adução de 0,1MPa.
- **Tempo de erosão:** duração da erosão entre as retrações do eletrodo para realização da limpeza da região usinada.
- **Modo de oscilação:** esta máquina de eletroerosão permite a escolha do modo de atuação do gerador. No modo pulso estático (pulsos iguais), as descargas têm duração constante. Por conseguinte, no modo frequência estática (frequências iguais), a frequência em que ocorrem as descargas é que permanece constante, conforme pode ser visto na Fig. (4).

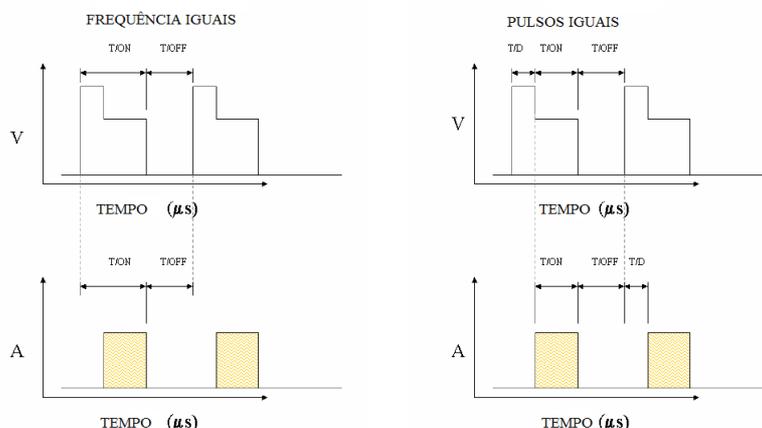


Figura 4. Modos de atuação do gerador da máquina de eletroerosão utilizados nos experimentos – Frequências e Pulsos Iguais (ACTSpark, 2006).

Os parâmetros utilizados foram variados em dois níveis, conforme valores apresentados na Tab. (1).

Tabela 1. Valores dos parâmetros trabalhados nos ensaios.

Parâmetros	1º Nível	2º Nível
Polaridade	Negativa	Positiva
Corrente de Pico (A)	13	29
t_{on} (µs)	115,5	237,1
t_{off} (µs)	115,5	237,1
Lavagem Central	Sem	Com
Tensão (V)	75	125
Tempo de Erosão (s)	0,4	0,8
Modo de Oscilação	Frequências Iguais	Pulsos Iguais

O tempo de usinagem para cada ensaio foi de 30 minutos. Após este período, o eletrodo e a peça foram secados em uma estufa por 10 minutos a uma temperatura de 150°C, com a finalidade de retirar qualquer resíduo do fluido dielétrico sobre a superfície dos mesmos. Para obtenção da produtividade do processo foi considerada a taxa de remoção de material da peça através da medição da diferença de massa do corpo de prova, antes e após a usinagem, em uma balança com resolução de 1 mg, marca BEL, modelo Mark M503. Também foi medida a taxa de remoção de material do eletrodo-ferramenta. O desgaste relativo foi obtido pela razão entre a taxa de remoção do eletrodo-ferramenta e da peça.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a análise estatística dos resultados, constatou-se que, para a taxa de remoção, a polaridade, a corrente de pico e a lavagem foram os fatores que mais influenciaram, tanto para o aço inoxidável 304 como para o INCONEL 718. A interação entre polaridade e corrente de pico e a interação entre polaridade e lavagem também influenciaram significativamente a taxa de remoção. A Fig. (5) e a Fig. (6) mostram os gráficos de Pareto dos efeitos na taxa de remoção destes materiais.

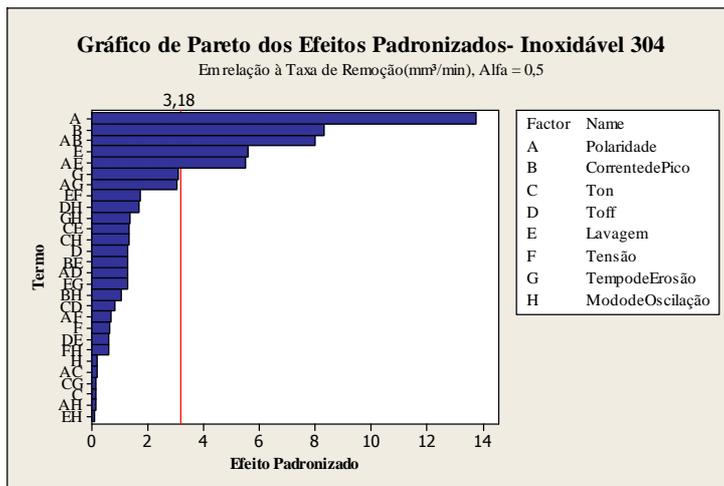


Figura 5. Gráfico de Pareto dos Efeitos para a Taxa de Remoção do Aço Inoxidável 304.

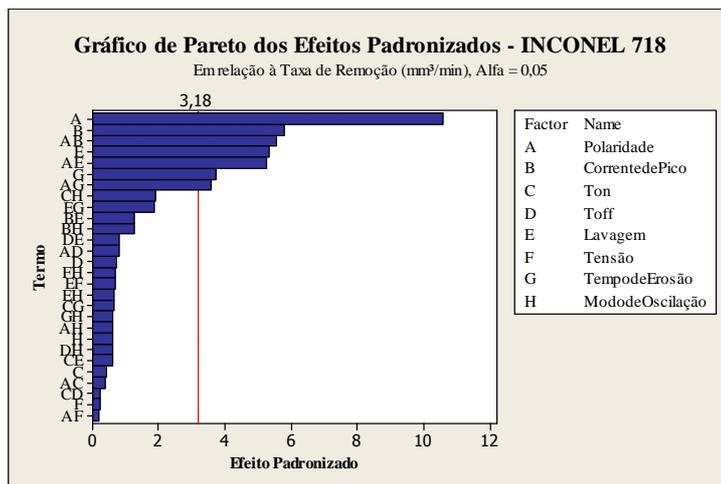


Figura 6. Gráfico de Pareto dos Efeitos para a Taxa de Remoção do INCONEL 718.

A Fig. (7) mostra o efeito na taxa de remoção do Aço Inoxidável 304 quando os parâmetros polaridade, corrente de pico e lavagem são variados nos dois níveis analisados neste experimento. Dos resultados apresentados, a polaridade positiva e a corrente de pico de 29 A foram favoráveis a taxa de remoção. Entretanto, o uso da lavagem central diminuiu a taxa de remoção.

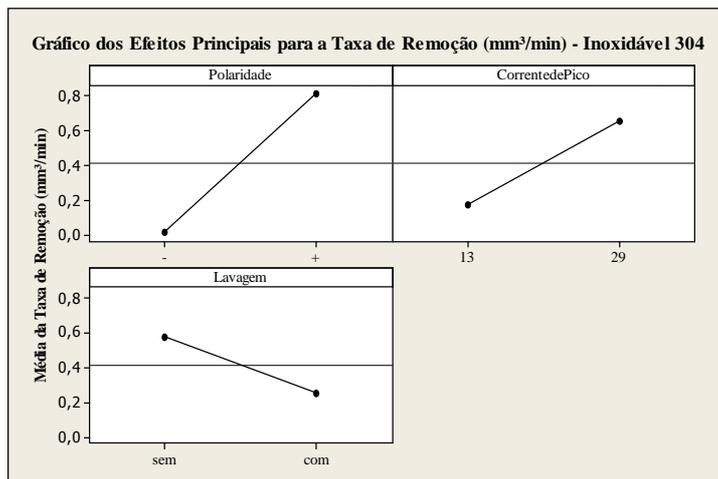


Figura 7. Gráfico dos Efeitos Principais na Taxa de Remoção do Aço Inoxidável 304.

A Fig. (8) mostra o efeito das interações entre os parâmetros polaridade, corrente de pico e lavagem sobre a taxa de remoção nos ensaios com o Aço Inoxidável 304. Pode-se perceber que, com a adoção da polaridade negativa, o aumento da corrente ou a utilização da lavagem central pouco influenciaram na variação da taxa de remoção. Por outro lado, a adoção da polaridade positiva no eletrodo-ferramenta em conjunto com uma corrente de pico maior e a não utilização da lavagem central forneceram os melhores resultados em relação à taxa de remoção de material da peça.

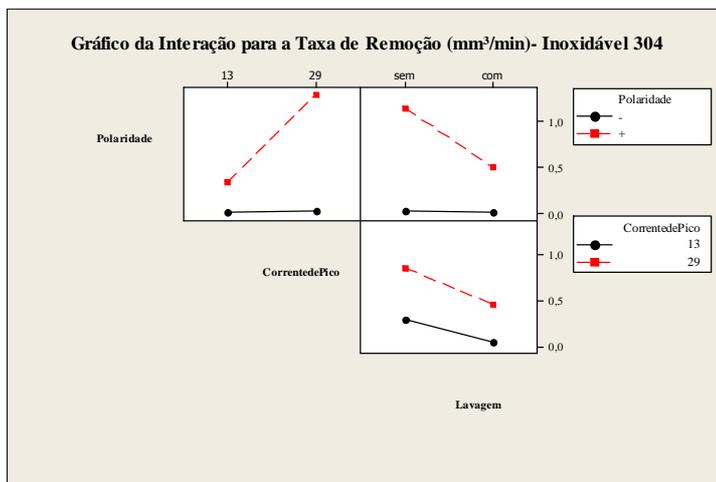


Figura 8. Gráfico das Principais Interações na Taxa de Remoção do Aço Inoxidável 304.

A Fig. (9) e a Fig. (10) trazem as mesmas análises realizadas acima para o INCONEL 718. Pode-se perceber que há uma grande semelhança entre o comportamento destes dois materiais. Desta forma, as conclusões realizadas para o Inoxidável 304 são semelhantes às obtidas para o INCONEL 718.

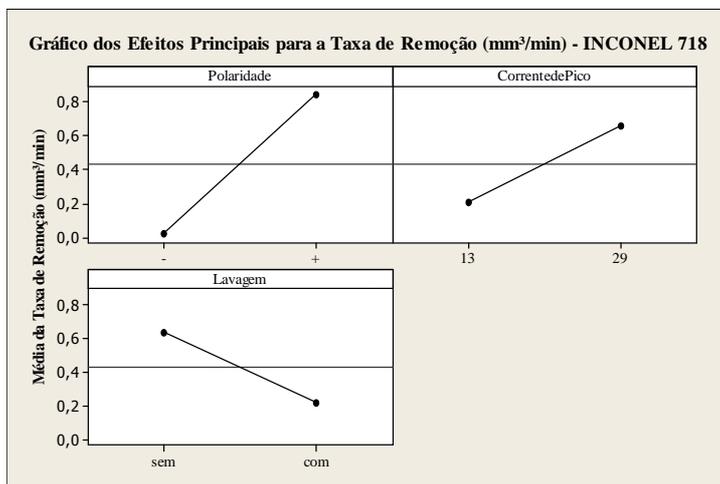


Figura 9. Gráfico dos Efeitos Principais na Taxa de Remoção do INCONEL 718.

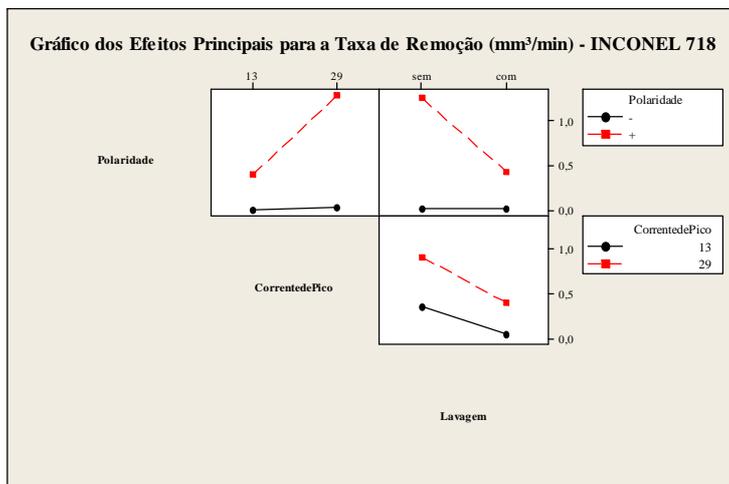


Figura 10. Gráfico das Principais Interações na Taxa de Remoção do INCONEL 718.

Realizando uma análise estatística nos resultados obtidos, não se pode afirmar que há diferença na taxa de remoção obtida nos ensaios realizados para o INCONEL 718 e para o Inoxidável 304, com nível de significância de 0,05. Na Fig. (11) são apresentadas as médias das taxas de remoção destes dois materiais, assim como seus intervalos de confiança.

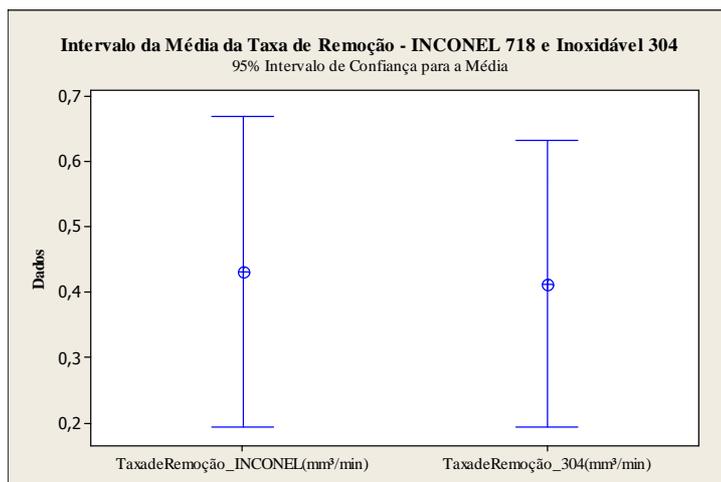


Figura 11. Médias da Taxa de Remoção para o INCONEL 718 e para o Inoxidável 304.

Para o desgaste relativo do eletrodo-ferramenta, não houve fatores principais ou interações duplas que influenciaram estatisticamente neste efeito, tanto para o Aço Inoxidável 304 como para o INCONEL 718. A Fig. (12) e a Fig. (13) mostram os gráficos de Pareto dos efeitos no desgaste relativo do eletrodo na usinagem destes materiais.

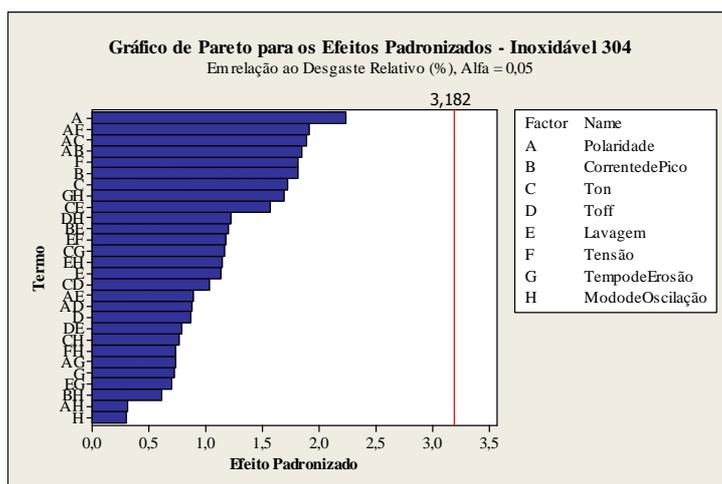


Figura 12. Gráfico de Pareto dos Efeitos para o Desgaste Relativo do Eletrodo na usinagem do Aço Inoxidável 304.

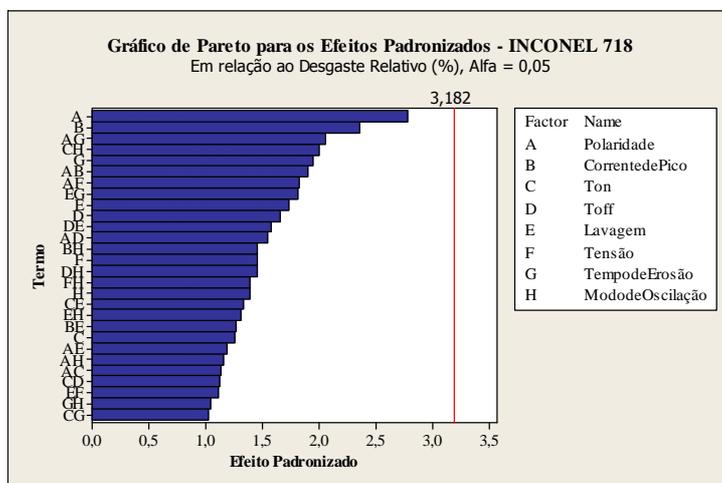


Figura 13. Gráfico de Pareto dos Efeitos para o Desgaste Relativo do Eletrodo na usinagem do INCONEL 718.

Foi realizada uma análise da influência dos parâmetros que apresentaram efeito representativo sobre a taxa de remoção dos materiais estudados sob a perspectiva do desgaste relativo do eletrodo. Por conseguinte, verificou-se que, para os dois materiais, o desgaste relativo do eletrodo-ferramenta foi menor durante os ensaios com polaridade positiva e com a corrente de pico de 29 A. Em contrapartida, a adoção da lavagem central aumentou o desgaste relativo do eletrodo. Estes resultados estão representados na Fig. (14) e na Fig. (15).

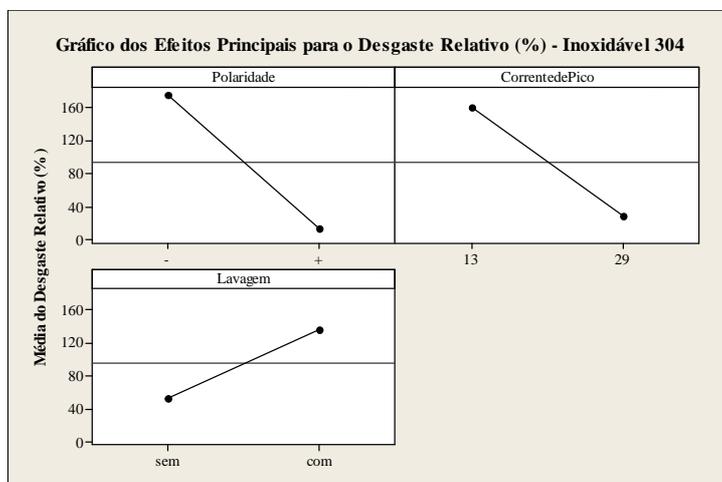


Figura 14. Gráfico dos Efeitos Principais no Desgaste Relativo do Eletrodo na Usinagem do Aço Inoxidável 304.

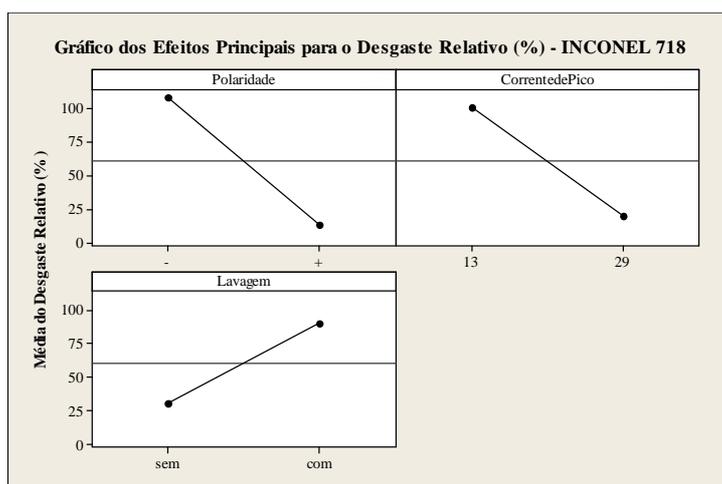


Figura 15. Gráfico dos Efeitos Principais no Desgaste Relativo do Eletrodo na Usinagem do INCONEL 718.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- Tanto o aço inoxidável 304 quanto a liga de níquel INCONEL 718 apresentaram resultados parecidos para a taxa de remoção, resultando em uma equivalência estatística entre as médias globais da taxa de remoção para ambos os materiais.
- Os parâmetros mais influentes na taxa de remoção do processo de eletroerosão por penetração destes materiais com a utilização de eletrodos de cobre eletrolítico e nas condições de teste anteriormente explicitadas são: polaridade, corrente de pico e a lavagem central.
- Para o desgaste relativo do eletrodo na usinagem de ambos os materiais, nas condições de teste apresentadas, não houve parâmetro com influência estatística representativa.
- A adoção de polaridade positiva e do valor maior para a corrente de pico favoreceram ao processo, gerando maiores taxas de remoção e menores desgastes relativos do eletrodo-ferramenta, durante a usinagem dos dois materiais estudados.
- A utilização da lavagem central mostrou-se prejudicial ao processo em ambos os aspectos avaliados. Este resultado pode ser esclarecido com a análise da profundidade da cavidade erodida que foi pequena nas condições de usinagem realizadas nestes ensaios. Portanto, para esta situação, não se justifica a utilização

da lavagem central, que é indicada para a limpeza da área usinada quando a cavidade erodida é profunda e há a necessidade de injeção do fluido dielétrico na região através do eletrodo-ferramenta.

5. REFERÊNCIAS

- ACTSpark, 2006, “SA Series CNC Precision Die-Sinking EDM - Technology”, User’s Manual, China, pp. 30-37.
- Amorim, F. L., 2002, “Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga de Cobre CuBe para Ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Amorim, F. L. and Weingaertner, W. L., 2007, “The Behavior of Graphite and Copper Electrodes on the Finish Die-Sinking Electrical Discharge Machining (EDM) of AISI P20 Tool Steel”, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. XXIX, No. 4, Brazil, pp. 366-371.
- Dibitonto, D. D., Eubank, P. T., Patel, M. R. and Barrufet, M. A., 1989, “Theoretical models of the electrical discharge machining process I: a simple cathode erosion mode”, Journal of Applied Physics, Vol. 66, No. 9, pp. 4095-4103.
- Ho, K. H. and Newman, S. T., 2003, “State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM)”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, pp. 1287-1300.
- Santos, R. F., 2007, “Influência do Material da Peça e do Tratamento Térmico na Eletroerosão dos Aços AISI H13 e AISI D6”, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

6. DIREITOS AUTORAIS

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



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO
DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO
7th BRAZILIAN CONGRESS ON MANUFACTURING ENGINEERING
15 a 19 de abril de 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ - Brasil
April 15th to 19th, 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ – Brazil

INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS VARIATION ON THE ELECTRODE WEAR AND THE PRODUCTIVITY DURING ROUGHING EDM OF ALLOY STAINLESS STEEL 304 AND INCONEL 718

Helaine Pereira Neves, helaine.neves@fieb.org.br¹

Guilherme Oliveira de Souza, guilherme.souza@fieb.org.br¹

¹ SENAI CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador - Ba

Abstract. *The knowledge of parameters which allow a greater productivity is important to reduce the manufacturing time of a part. At the same time, it is necessary to reduce the cost of the process by reducing the consumption of raw materials. In the process of die sinking EDM, the main input used is the electrode-tool and thus reducing its wear leads to a decrease in costs associated with the manufacture of a certain part. Combining these two factors is not an easy activity. For that, you need an understanding of how the process parameters affect productivity and wear on the electrode to establish values that enhance the process in relation to these two aspects. In this context, this study aims to find the most influential parameters on productivity and electrode wear during roughing step in the process of EDM by penetration of stainless steel alloy 304 and INCONEL 718. For this, tests were performed with these materials, in which 9 process parameters were varied on two levels and their productivity was measured and calculated the relative electrode wear. The duration of the EDM process was 30 minutes for all samples. To obtain the productivity of the process was considered the removal rate of material from the part by measuring the mass difference before and after machining. Likewise, the wear was measured on the electrode. With the assistance of statistical software, the test results were processed and analyzed. As a result of these experiments it was found that both materials studied showed similar results, with the most influential parameters on the productivity of the process were: polarity, peak current and washing. However, to wear on the electrode, no variable showed statistically significant influence.*

Keywords: EDM, INCONEL 718, stainless steel 304