



IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ADITIVOS NO DIELECTRICO DE EDM NO ACABAMENTO DE SUPERFÍCIES MOLDANTES

PAULO PEÇAS, ELSA HENRIQUES

Instituto Superior Técnico
Secção de Tecnologia Mecânica
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

(Recibido 23 de marzo de 2004, para publicación 26 de mayo de 2004)

Resumo – O acabamento / polimento das superfícies moldantes é correntemente responsável por cerca de 35% a 50% do tempo total de produção de moldes e matrizes. A utilização de aditivos no dieléctrico de EDM tem permitido atingir melhorias ao nível do desempenho da tecnologia em operações de acabamento e de polimento. O objectivo é a redução e mesmo a eliminação da fase final de polimento manual. Este artigo apresenta um estudo sobre a influência do pó de silício, em suspensão no dieléctrico, no desempenho da tecnologia de EDM em operações de polimento. O desempenho é avaliado através da monitorização do tipo de descargas e da rugosidade superficial da superfície gerada. Finalmente é ainda avaliado o impacto da tecnologia na redução de posteriores operações de polimento manual.

1. INTRODUÇÃO

A maquinagem por electro-erosão (Electrical Discharge Machining – EDM) é actualmente utilizada em diversos sectores industriais desde a produção de moldes e de matrizes, à produção de componentes para a indústria electrónica e em aplicações de mecânica fina. O seu desempenho no processamento de metais de elevada dureza e de peças com geometria complexa tem sido incrementado nos últimos anos com a incorporação de sistemas de controlo adaptativo que, baseados em inteligência artificial, asseguram um elevado nível de precisão e de autonomia da tecnologia.

Apesar de apresentar desempenhos únicos dentro das tecnologias de maquinagem, a EDM tem sofrido pressões significativas das tecnologias concorrentes, nomeadamente da fresagem a alta velocidade (High Speed Milling - HSM) e da rectificação assistida por controlo numérico. Estas pressões são mais evidentes no sector dos moldes e matrizes onde a principal desvantagem da EDM reside no longo tempo necessário para a obtenção de superfícies de média e grande dimensão com baixa rugosidade [1]. Deste facto resulta que, industrialmente e em particular na indústria dos moldes e matrizes, a EDM é utilizada apenas até acabamentos superficiais entre 1,8 e 2 μm de rugosidade média (R_a) [2]. Na maioria das situações esta limitação origina a necessidade de recorrer ao acabamento manual das cavidades moldantes, de modo a gerar a qualidade superficial exigida quer pelos clientes (de acabamento super-fino a acabamento fino: $\approx 0,03$ a $\approx 0,10$ μm de R_a), quer pelo próprio processo de injeção de plásticos (acabamento grosseiro: $\approx 0,30$ μm de R_a) [3]. Devido aos desempenhos crescentes da HSM ao nível do acabamento superficial e do tempo de maquinagem, e ainda devido ao facto das superfícies maquinadas por EDM exibirem uma camada superficial de elevada dureza que origina tempos de acabamento manual superiores [3][4], resulta natural que se assista actualmente na indústria de moldes e matrizes à redução do campo de aplicação da EDM que se consolida apenas para situações onde a HSM não é aplicável: geometrias de elevada relação profundidade/ largura, cantos a 90° [4] e materiais de elevada dureza.

Com o objectivo de melhorar o desempenho do processo de electro-erosão diversos trabalhos têm sido publicados sobre a utilização de aditivos no dieléctrico. A introdução de partículas finas (2 a $30\mu\text{m}$) no dieléctrico diminui a rigidez do dieléctrico (resistência) permitindo o aumento da distância entre o eléctrodo e a peça [5]. Actuando na causa que limita o polimento por EDM (pequena distância eléctrodo-peça), alguns tipos de aditivos (alumínio, silício e grafite) possibilitam a lavagem mais eficiente da zona

de descarga e diminuem o efeito capacitivo (originado pela pequena distância entre dois pólos em carga – eléctrodo e peça) [1][6]. Desta forma, a utilização de aditivos permite a obtenção de crateras menos profundas em toda a extensão da superfície maquinada, conduzindo a acabamentos superficiais de elevada qualidade [1][5][7].

Em geral, os estudos reportados na literatura que abordam a utilização de aditivos pretendem maximizar o desempenho do processo, tendo por isso utilizado combinações paramétricas optimizadas (regime único de polimento) e até formas de impulso modificadas (gerador de descargas específico) para aumentarem a eficácia da influência das partículas de aditivo.

O objectivo do presente estudo é investigar o efeito da presença de silício no desempenho de uma sequência de regimes de EDM, idêntica à correntemente utilizada em condições industriais de acabamento (2º eléctrodo). Desta forma será possível avaliar o impacto da introdução do pó de silício em equipamentos convencionais, potenciando o aumento do campo de aplicação dos equipamentos existentes. De forma a avaliar o impacto dos valores de rugosidade superficial atingidos com a utilização de pó de silício na fase final de acabamento dos moldes, é utilizada a modelação desenvolvida por Peças et al. [3] que relaciona as taxas de polimento dos diversos tipos de acabamento manual com a rugosidade inicial da superfície do componente a ser processado.

2. OBJECTIVO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental desenvolvido focou o estudo da influência da presença do pó de silício em suspensão no líquido dieléctrico no que se refere ao tipo de descargas geradas e à qualidade da superfície maquinada, medida através da rugosidade final obtida. Para isso, foi seleccionado um aço de utilização corrente em moldes para injeção de plástico (AISI H13 – com uma dureza após têmpera de 54 HRC), sobre o qual foram realizados ensaios de erosão, em diferentes condições, com eléctrodos de cobre electrolítico. Foi seleccionado um pó de silício (pureza de 99,5%) com uma baixa granulometria (10 μm de diâmetro médio das partículas) e utilizou-se um nível de diluição de 2 gramas de pó por litro de dieléctrico (hidrocarboneto mineral). Para garantir a homogeneidade da diluição foi desenvolvido um sistema de circulação e agitação do dieléctrico e das partículas em suspensão (Fig. 1).

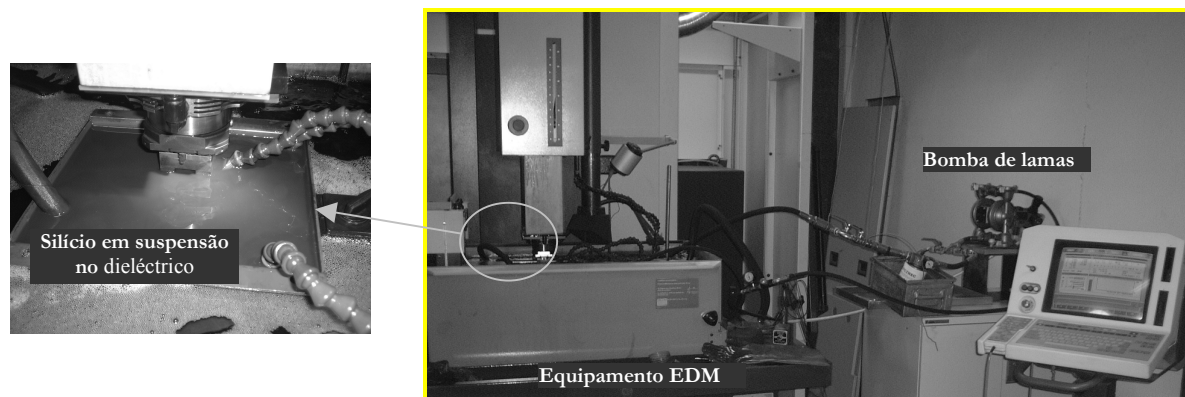


Fig. 1 - Sistema de circulação do dieléctrico com partículas de silício e do equipamento de electro-erosão.

Para investigar o efeito da dimensão da área de maquinagem no desempenho do processo foram realizados ensaios com e sem aditivos para diversas dimensões de eléctrodo (entre 100 e $6,4 \times 10^3 \text{ mm}^2$). Utilizou-se um programa de controlo numérico constituído por uma sequência de 13 regimes de maquinagem com movimento orbital, nos quais a intensidade de pico varia entre 8 e 0,5 A, a tensão de descarga é de 25 V e o “duty-factor” é de 50%. A sequência dos regimes e o tipo de impulsos utilizados são os fornecidos pelo sistema automático de geração de parâmetros do equipamento utilizado (Pilot Expert – Charmilles), para a condição de dieléctrico convencional.

Com o intuito de analisar a influência da presença do pó de silício no dielétrico não se alteraram proposadamente os parâmetros tecnológicos do processo, tendo-se utilizado o mesmo programa para os ensaios sem e com pó de silício. Esta configuração experimental permitirá avaliar a influência da utilização do silício em suspensão no dielétrico em equipamentos com um gerador convencional de descargas. Nestas condições paramétricas não é garantido que seja otimizado o desempenho da erosão com aditivos. No entanto, é possível analisar os benefícios introduzidos pelo silício em suspensão, medidos quer através da qualidade final da superfície quer através do tempo necessário à sua obtenção, sem promover alterações significativas nos sistemas convencionais de EDM.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados obtidos são apresentados em três vertentes com o intuito de analisar a influência da presença de pó de silício no dielétrico especificamente na geração de descargas, na topografia e no impacto sobre o acabamento manual.

3.1. Influência do pó de silício na geração das descargas

Através de um sistema de monitorização foi possível analisar o efeito da presença de silício no tipo de descargas geradas, quer ao nível da forma dos impulsos, quer ao nível do tipo de descargas ocorridas: normais e anómalas (curto-circuito, arco eléctrico e longos períodos de circuito aberto). A Fig. 2 ilustra a evolução típica das descargas de um dos regimes de polimento, onde é utilizado um circuito de relaxação com $4,7 \times 10^{-9}$ F de capacidade, intensidade de corrente de 1 A e 3,2 μ s de tempo de descarga. É notória a contribuição do aditivo para a maior estabilidade e eficiência ao processo. As condições propícias à formação de descargas anómalas são substancialmente alteradas pela maior distância eléctrodo-peça, contribuindo ainda as partículas de silício para o aumento da facilidade de ignição da descarga eléctrica.

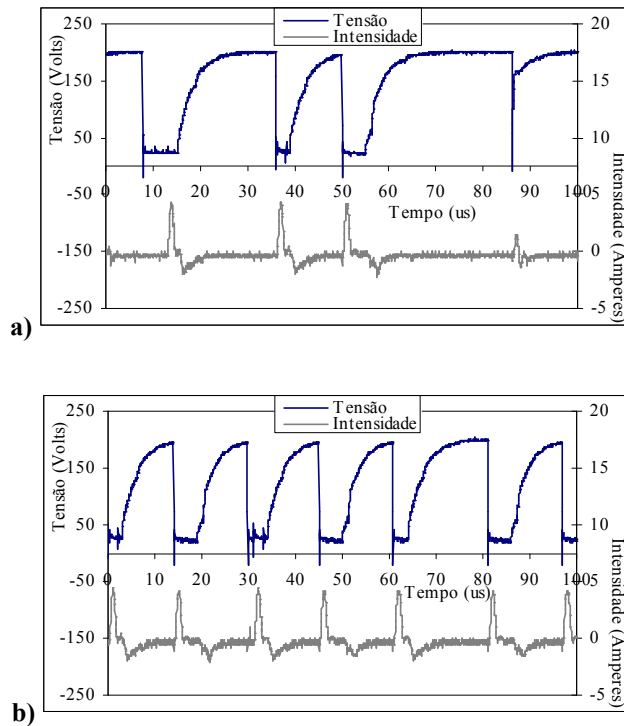


Fig. 2. Monitorização de um regime de acabamento: (a) Dielétrico convencional; (b) Dielétrico com silício.

Analisando a ocorrência de descargas anómalas ao longo do processo de maquinagem, verificou-se ainda que a presença de silício diminuiu este tipo de fenómenos (Fig. 3). Nos regimes de polimento a distância entre o eléctrodo e a peça atinge valores inferiores a $5\ \mu\text{m}$ para a situação de dieléctrico convencional, o que torna difícil o escoamento e a remoção dos resíduos resultantes do processo de erosão. Surgem dificuldades extremas de regeneração do dieléctrico entre descargas, o que aumenta a probabilidade de ocorrência de arco-eléctrico. Simultaneamente, as partículas erodidas podem gerar pontes potenciando o contacto eléctrico entre o eléctrodo e a peça. Os equipamentos de EDM actuais estão equipados com sistemas de controlo adaptativo que, uma vez detectadas condições potenciais de formação de arco-eléctrico e/ou curto-circuito, actuam de forma rápida através da alteração pontual dos parâmetros do processo. Contudo, a actuação em tempo real no sentido de minimizar a ocorrência deste tipo de descargas anómalas origina a perda de eficiência do próprio processo.

Ao aumentar a distância eléctrodo-peça, a presença do pó de silício minimiza a ocorrência de descargas anómalas e aumenta a eficiência do processo. Verifica-se ainda que, para áreas de maquinagem crescentes (maior dimensão do eléctrodo), aumenta a tendência para a degradação das condições na zona de descarga, aumentando a probabilidade de ocorrência de descargas anómalas. Este fenómeno é evidente na Fig. 3, contribuindo a presença do pó de silício para tornar o desempenho do processo mais independente da dimensão da área maquinada.

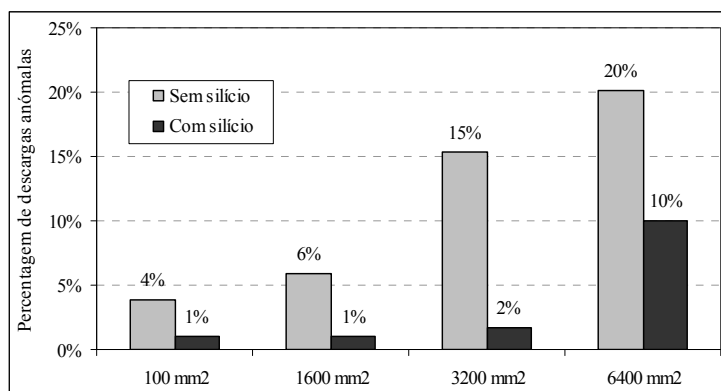


Fig. 3. Influência da presença de silício na percentagem de descargas anómalas para diversas áreas de eléctrodos.

3.2. Influência do pó de Silício na topografia superficial

Através das imagens presentes na Fig. 4 é possível verificar que a presença de aditivos no dieléctrico conduz a descargas mais suaves e sem bordos pronunciados. É de referir, contudo, que o diâmetro das crateras parece não ser influenciado pela presença de pó de silício.

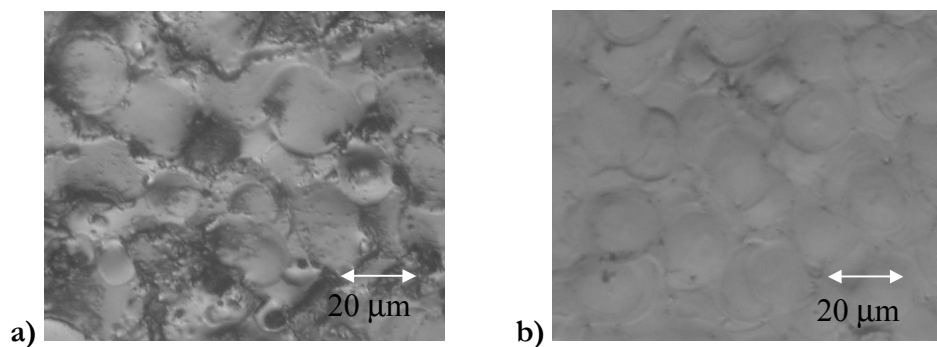


Fig. 4. Aspecto da topografia superficial observada com microscópio óptico. (a) sem aditivos (rugosidade média (Ra): $0,83\ \mu\text{m}$); (b) com aditivos (rugosidade média (Ra): $0,32\ \mu\text{m}$; Área do eléctrodo: $3200\ \text{mm}^2$).

Estes resultados confirmam o efeito positivo da utilização de aditivos no polimento por EDM, constatando-se que a não ocorrência de descargas anómalas evita defeitos na superfície da zona maquinada e torna possível a obtenção de uma topografia constituída por crateras extremamente alisadas por toda a extensão da área maquinada.

Esta configuração superficial reflecte-se na rugosidade da superfície. Na Fig. 5 estão representados os resultados obtidos para áreas crescentes de 100 mm² a 6400 mm², verificando-se que a presença de silício origina uma menor dependência do valor da rugosidade superficial com a área.

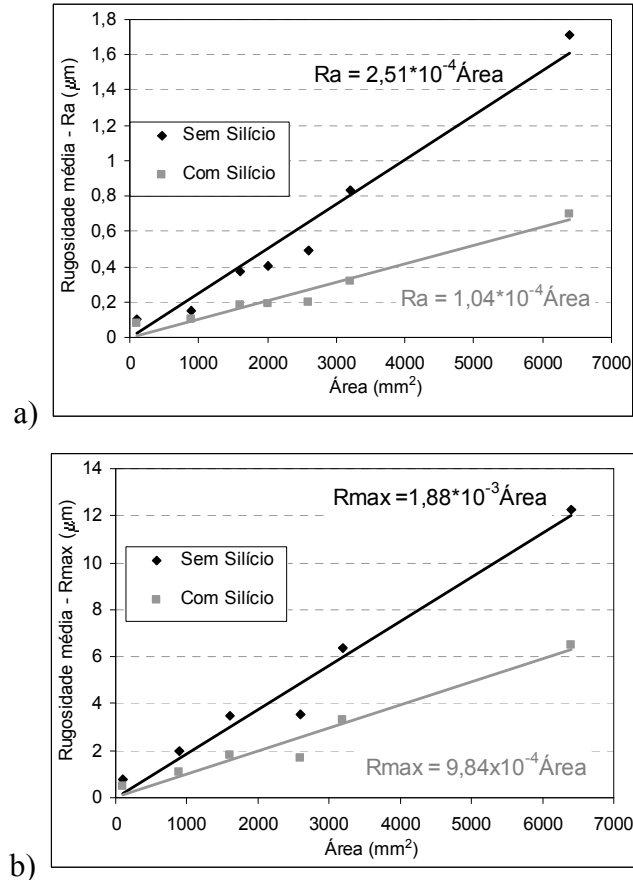


Fig. 5 - Variação da rugosidade com a área do eléctrodo: a) Rugosidade média; b) Rugosidade máxima.

Em termos de rugosidade média constata-se que esta aumenta 0,025 µm por cada cm² de aumento da área processada em EDM convencional, sendo este valor, em média, 2,5 vezes inferior quando se utiliza o silício. Em termos de rugosidade máxima o impacto da presença de aditivos é menor, permitindo em média reduzir para metade o efeito da área nesta medida da qualidade superficial. Embora os resultados obtidos indiquem que não se atinge uma rugosidade que confira à superfície um “polimento a espelho” (menor que 2 µm de R_{max}) para as áreas de maior dimensão, a redução da rugosidade superficial é substancial (cerca de 50%).

3.3. Impacto no polimento manual

Actualmente no fabrico de moldes, após a operação de maquinagem por EDM é frequente efectuar-se o polimento manual da cavidade moldante. Num estudo recente elaborado pelo IST e pela École de Nantes [3], baseado num levantamento exaustivo de dados junto de empresas nacionais do sector de moldes que utilizam a tecnologia de polimento manual para garantir a geração de superfícies moldantes com a qualidade requerida, modelou-se a dependência da operação de polimento com o tipo de geometria, com a

área e com a rugosidade inicial. Consideraram-se três tipos de acabamento: polimento superfino, realizado sempre que são exigidas superfícies espelhadas; polimento fino, realizado para obter superfícies de excelente acabamento mas sem brilho; polimento grosseiro, realizado essencialmente sobre a bucha (zona do molde que gera uma zona não visível na peça final) e sobre cavidades que são posteriormente texturizadas (independentemente da textura a aplicar ou rugosidade da superfície é necessária a remoção da “camada branca” devido à dificuldade dos ácidos utilizados na texturização a removerem).

Tabela 1. Equações desenvolvidas por Peças et al. [3] para estimar o tempo específico de polimento manual, para três tipos de polimento, a partir o valor inicial de rugosidade média da superfície a polir.

Tipo de Polimento	Rugosidade média final após o tipo de acabamento (μm)	T - Tempo específico de polimento em função de R_a : (min/cm^2) R_a - Rugosidade média inicial da peça a polir manualmente (μm)
Grossoiro	0,324	$T(R_a) = 0,302 \ln(R_a) + 0,452$
Fino	0,076	$T(R_a) = 0,772 \ln(R_a) + 2,311$
Superfino	0,034	Para $R_a > 0,076$ $T(R_a) = 0,992 R_a + 4,105$ Para $0,034 < R_a < 0,076$ $T(R_a) = 106,823 R_a - 3,974$

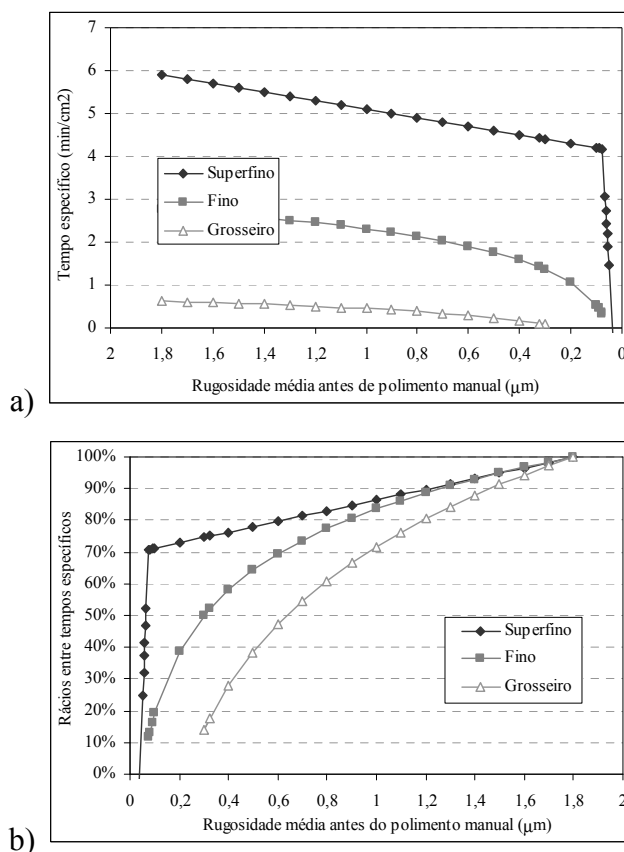


Fig. 6 - (a) Variação do tempo específico de acabamento manual com a rugosidade média inicial;
(b) Variação do rácio entre o tempo específico para cada R_a inicial e o tempo específico com R_a de 1,8 mm [3].

De referir que os diferentes acabamentos são independentes entre si, sendo cada um efectuado com uma sequência distinta de lixas, pedras e/ou feltros. A dependência dos tempos específicos de acabamento (tempo de polimento manual por unidade de área polida) para cavidades de geometria complexa e os níveis médios de rugosidade atingidos estão presentes na Tabela 1. A modelação apresentada tem como pressuposto que a rugosidade média aritmética da superfície antes de acabamento manual é sempre

inferior ou igual a $2,0 \mu\text{m}$.

A Fig. 6 representa a variação dos tempos específicos (tempo por unidade de área) de polimento com o valor de R_a inicial e ainda a evolução do rácio entre o tempo específico para cada R_a inicial e o tempo específico com R_a de $1,8 \mu\text{m}$ (tempo específico característico da situação industrial actual).

Conclui-se que a utilização de aditivos pode ser responsável pela redução do tempo da operação de polimento manual fino para um tempo na ordem dos 40 a 50% do seu valor industrial corrente. Por outro lado, a redução no tempo de polimento grosseiro pode ainda ser mais significativa, chegando mesmo a ser eliminado no caso de não ser exigida uma texturização final. Relativamente ao polimento superfino a redução do tempo é claramente inferior, situando-se em valores entre 15 e 25%, devido à grande parcela do tempo de polimento ser consumida na obtenção de um nível de rugosidade média não atingível pela utilização de aditivos na erosão. Caso desenvolvimentos futuros na tecnologia dos aditivos venham a permitir reduzir a rugosidade média das superfícies erodidas para valores inferiores a $0,07 \mu\text{m}$ de R_a , o impacto na redução do tempo de polimento manual será contudo extremamente significativo.

4. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido teve como objectivo aplicar pó fino de silício distribuído uniformemente no dieléctrico em condições de descarga idênticas às utilizadas na EDM convencional. Através da monitorização das descargas, foi possível concluir que a presença do pó de silício elimina a ocorrência de descargas anómalas nos regimes de menor energia, garantido as condições favoráveis de ignição e desenvolvimento da descarga. A presença de aditivos contribui significativamente para diminuir a influência da área do eléctrodo no nível de rugosidade da superfície obtida, sendo possível atingir níveis de rugosidade média significativamente inferiores aos obtidos com dieléctrico convencional (cerca de 2,5 vezes inferior). A utilização de silício permite reduções na operação posterior de acabamento manual de 15% a 100%, dependente do tipo de polimento final pretendido.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Peças, E. Henriques, L. Raposo, "Electrical Discharge Machining With Additive: a way of mould steels non-manual polishing", *Proc. of 1st International Seminar in Innovative Manufacturing Engineering*, Genova, Italy, pp 267-271 (1991).
- [2] J.M. Ortiz, "High-Quality Surface Finishing: acabado superficial de alta calidad mediante electroerosión por penetración", *IMHE*, nº 239, pp 168-169 (1998).
- [3] P. Peças, R. Casimiro, "Plastic Injection Moulds Finishing and Polishing: Comparative Analysis of Alternative Technologies", *Secção de Tecnologia Mecânica - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa*, (2002).
- [4] P. Zelinski, "EDM vs. Milling in Die/Mold Machining", *Modern Machine Shop*, July (2000).
- [5] W.S. Zhao, Q.G. Meng, Z.L. Wang, "The Application of Research on Powder Mixed EDM in rough machining", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, pp 30-33, (2002).
- [6] Y.S. Wong, L.C. Lim, I. Rahuman, W.M. Tee, "Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric", *Journal of Materials Processing Technology* nº79, pp 30-40 (1998).
- [7] P. Peças, E. Henriques, "Influence of silicon powder-mixed dielectric on conventional electrical discharge machining", *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, vol.43, pp 1465-1471 (2003).

THE IMPACT OF EDM POWDER-SUSPENDED DIELECTRIC ON THE MOULDING SURFACE FINISHING

Abstract – It is currently estimated that from 35% to 50% of the total die/mould manufacturing time is used for finishing or polishing the final moulding surfaces. Today several improvements in manufacturing chains

involving surface finish and polish phases are been achieved through the use of additives in the dielectric fluid of EDM technology. The objective is the reduction and even the elimination of final manual polishing phase. This paper presents a research work aiming the study of the influence of silicon powder in the dielectric in the performance improvement of EDM technology. The improvement is evaluated through the discharge type monitoring and through the final roughness achieved in the moulding surface. Finally the impact of the EDM with additives is assessed considered the reduction in the time required for manual polishing.