

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA MICROFURAÇÃO POR ELECTROEROSÃO

I. M. F. Bragança¹, L. M. M. Alves², P. A. R. Rosa², P. A. F. Martins³

¹MSc. Investigador, ²Prof. Auxiliar, ³Prof. Catedrático
Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal



RESUMO

Os novos mercados criados pela crescente procura de micro componentes de elevado valor acrescentado tem motivado os principais construtores de máquinas-ferramenta a desenvolverem equipamentos adaptados aos diferentes sectores industriais. No entanto, o grau de especialização destes equipamentos associado ao seu elevado custo vem impedindo que as novas tecnologias de microfabrico estejam facilmente disponíveis nos laboratórios das instituições de ensino superior nacionais. De facto, existem carências de meios laboratoriais didácticos nesta área do conhecimento. Neste trabalho apresenta-se um equipamento para microfuração demonstrando que os grupos de investigação nacionais da área disciplinar da tecnologia mecânica podem, com recurso aos meios humanos e laboratoriais que estão ao seu dispor, construir equipamentos que satisfaçam as necessidades didácticas atrás referidas. Importa salientar que estes trabalhos podem ser simultaneamente incorporados no âmbito de temas de doutoramento onde os equipamentos podem contribuir para o avanço do estado actual do conhecimento ao nível dos fundamentos dos processos.

1 - INTRODUÇÃO

A miniaturização de produtos e processos é uma realidade actual em vários sectores industriais. Neste sentido é essencial a actualização tecnológica do ensino superior de forma a permitir uma formação orientada de recursos humanos qualificados, assim como, contribuir para o avanço do estado actual do conhecimento ao nível dos fundamentos dos processos.

A electroerosão (EDM) é de entre as tecnologias de maquinaria uma das que melhor se adequa ao microfabrico devido ao facto de não existir contacto entre a peça e a ferramenta. No entanto, o nível de miniaturização dos produtos impede a

utilização das máquinas-ferramenta (MF) tradicionais devido a aspectos tecnológicos relacionados com a definição e o controlo dos parâmetros operativos, e com aspectos práticos relacionados com a preparação, o posicionamento, a fixação ou medição das peças e ferramentas. A combinação desses factores promove um desenvolvimento orientado ao produto em detrimento do conceito de MF Universal.

Existem actualmente construtores de MF que disponibilizam comercialmente soluções de elevado desempenho para microEDM (Tabela 1), mas onde o custo de aquisição não acompanha a redução de escala do equipamento. Além disso, e





apesar das MF comerciais permitirem o fabrico eficiente de microfuros, não têm funcionalidades adequadas para o ensino e a realização da investigação científica. De facto, a maior parte destas soluções restringe as combinações de parâmetros operativos (por vezes fixos), como p.ex. o rácio *time on / time off* ou a frequência dos impulsos. Outro aspecto importante, é a dificuldade em realizar monodescargas necessária a análise fenomenológica do mecanismo de remoção de material por electroerosão.

Na literatura da especialidade, o conceito de microEDM não está ainda inteiramente consolidado (Rajurkar, 2006), no entanto, é possível indicar como principais características as seguintes: (i) descargas eléctricas de elevada frequência com potências na ordem dos micro Joules; (ii) controlo da distância eléctrodo/peça (*gap*) na ordem de poucos micrómetros; (iii) movimentos rápidos com elevada precisão e repetibilidade, associados a uma folga reduzida (inferior a 0,5 μm); (iv) elevada rigidez estrutural e existência de isolamento de vibrações exteriores; (v) porta-ferramenta para micro eléctrodos; (vi) sistemas auxiliares de limpeza; (vii) fluidos de baixa viscosidade e de baixa produção de resíduos. Todos estes factores são importantes para promover a estabilidade do processo, mas é sobretudo o controlo da energia envolvida, e o mecanismo de limpeza, que tem a maior importância para a miniaturização do processo segundo (Moylan, 2005) e (Katz, 2004). Todas estas questões devem ser consideradas no desenvolvimento de uma microMF para electroerosão.

O presente trabalho procura mostrar a possibilidade de construir equipamentos de baixo custo, mas sem penalizar um desempenho competitivo relativamente as soluções comerciais existentes. Esta estratégia mostrou de facto ser vantajosa no domínio didáctico e da investigação experimental. São abordados temas associados ao desenvolvimento (estrutura, cadeia cinemática, controlo numérico, fonte de potência, etc) e ao arranque em

funcionamento da microMF. É ainda realizada a aplicação do equipamento na micro furação de chapas em AISI 1075 onde se procura avaliar a influência do diâmetro dos eléctrodos e da frequência de descargas na taxa de remoção de material.

Tabela 1 – Características de máquinas-ferramenta para microEDM (baseado em Moylan (2005)).

Máquina Modelo	Gerador Potência	Resolução / Precisão [μm]	Fotografia
Panasonic MG-ED82W*	RC (0.1MHz fixo)	0,1 / ± 1	
Sarix SX 200	Micro Fine Pulse Shape	0,1 / ± 2	
Ocean Tech OCT200 MA	-	0.1 / -	
Agie-Charmilles FO350 Micro	ISO-Pulse	0.05 / ± 1	

2 - CONCEPÇÃO, PROJECTO E FABRICO

A secção foi organizada em função dos principais módulos constituintes da microMF. De referir que o equipamento foi concebido tendo por base um conceito de módulos amovíveis que permite operar diferentes tecnologias de microfabrico, por substituição de partes activas, bastante adequado para aplicações didácticas bem como para alguns estudos fundamentais.

2.1 - Estrutura e cadeia cinemática

A primeira fase do desenvolvimento da microMF consistiu na concepção de uma estrutura em colo de cisne para facilitar o acesso à área de trabalho e a montagem de sistemas para observação ampliada das operações de posicionamento e de fabrico de micro componentes. A cadeia cinemática foi concebida de modo a individualizar os movimentos, reduzindo erros de posicionamento cumulativos, sendo

constituída por uma mesa de movimentos cruzados (X/Y) e um carro móvel vertical (Z). A coluna vertical foi projectada de modo a possuir uma massa elevada para reduzir a difusão de vibrações e reforços laterais para melhorar a rigidez global do equipamento.

Para a transmissão de movimento aos carros móveis (X/Y) foram concebidos e fabricados fusos com porcas elásticas (Figura 1.a). Este conceito pode ser utilizado com sucesso em aplicações onde os esforços são reduzidos (EDM é um processo de não contacto) e com baixa inércia no movimento dos carros. Foi utilizado um polímero elástico auto-lubrificante, para exercer uma pressão de contacto em flancos de rosca conjugados, e assim anular a folga entre a porca e o fuso que ocorre na inversão de movimento. Este tipo de porca permite ainda utilizar fusos com passo extra-fino, desmultiplicando o movimento do motor eléctrico, e possibilitando uma melhoria significativa na resolução do movimento. Os motores eléctricos seleccionados foram do tipo passo devido ao posicionamento angular preciso, minorando a importância da retroalimentação com transdutores de posição, caros e difíceis de encontrar nesta gama de precisão. Combinando motores de passo e porcas elásticas é possível obter um servomecanismos de baixo custo sem penalizar a precisão global do movimento.

Para aumentar a resolução do movimento de penetração (Z) do processo de microEDM, a transmissão foi realizada por intermédio de duas polias com relação de transmissão de 1:9,2. A existência de uma correia dentada entre as polias permite suavizar os movimentos sem perda de precisão final. A tensão da correia foi ajustada com auxílio a pré-tensores para diminuir folgas de transmissão (Figura 1.b).

Para permitir a utilização do dieléctrico líquido foi concebido um circuito hidráulico constituído por uma bomba (0,75l/min), um filtro (4 μm) e um tanque. O tanque foi concebido de modo a permitir a decantação das partículas sólidas que contaminam o fluxo dieléctrico, assim como, o controlo do nível de imersão.

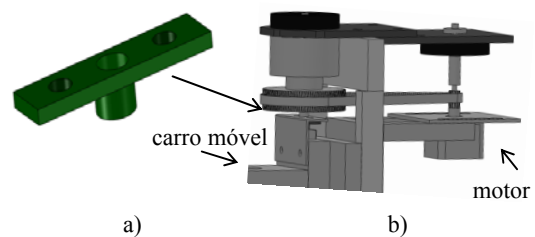


Fig 1 – Transmissão de movimento: a) porca elástica rosca com passo extra-fino; b) montagem do sistema de transmissão vertical com transmissão por correia dentada.

Este tanque foi estruturado em alumínio com envolvente em vidro, uma vez que este material apresenta boa estabilidade química, compatível com a generalidade dos dieléctricos líquidos, facilitando a observação do processo tecnológico. Uma das paredes foi concebida para permitir a montagem de acessórios de hidráulica. Na Figura 2 pode ser observada a relação entre a concepção e o projecto da microMF, com a sua execução material.

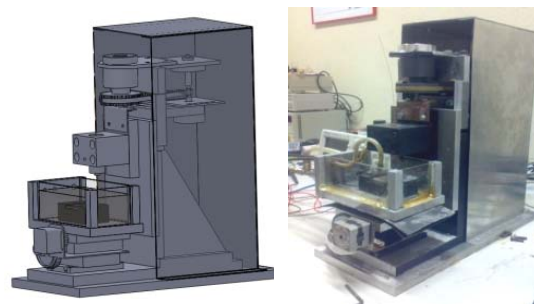


Fig 2 – Desenvolvimento da microMF para EDM: a) projecto e b) montagem final.

2.2 - Controlo numérico

Foi desenvolvido um programa para o controlo numérico da microMF baseado na linguagem de fluxo de dados *Labview*. Este programa permite controlar os principais parâmetros operativos através de uma interface de fácil utilização (Figura 3).

O programa está estruturado em 2 módulos: um controla o movimento cruzado (X/Y) da mesa e apresenta a posição graficamente; um outro controla o eixo de penetração do processo de EDM (Z). Ambos os módulos podem ser utilizados em modo manual ou automático.

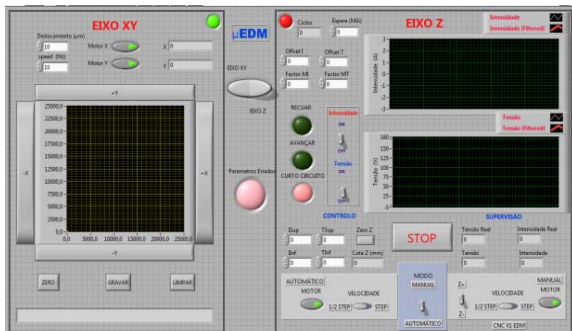


Fig 3 – Interface do programa de controlo numérico desenvolvido para a microMF.

O programa de controlo numérico permite ajustar os valores nominais de tensão e de corrente associada às descargas eléctricas, assim como, monitorizar em tempo real a sua evolução. Esta última funcionalidade permitiu implementar um controlo tipo adaptativo no eixo de penetração, através dum algoritmo empírico, ajustando em tempo real o movimento do eléctrodo em função das condições operativas. Este algoritmo mostrou influenciar de forma significativa o desempenho global do processo de EDM.

2.3 - Circuito de descarga

A principal diferença entre as MF utilizadas industrialmente em operações de EDM e as utilizadas no microEDM reside na capacidade de controlar os parâmetros eléctricos do plasma erosivo. De facto, a miniaturização promove a necessidade de utilizar plasmas de baixa energia (μJoules) e de elevada frequência para atingir uma elevada precisão geométrica e qualidade superficial, mas mantendo a taxa de remoção de material em níveis aceitáveis. O valor da tensão é controlado de forma a reter o comprimento do plasma, gap, em valores reduzidos (abaixo de 10 micrometros). Deste modo, foi dimensionado e fabricado um circuito eléctrico de descargas pulsadas que permitisse ajustar a frequência de até 300 kHz, a tensão de 20 até 330 V, a corrente eléctrica até 4 A e com controlo do *duty-cycle* (Figura 4).

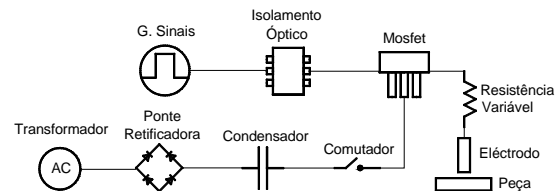


Fig 4 – Esquema do circuito de descarga.

2.4 - Monitorização de parâmetros

O sistema de monitorização foi preparado de forma a permitir satisfazer em simultâneo duas necessidades: 1) o do controlo adaptativo do processo; e 2) a da monitorização dos principais parâmetros operativos para suporte à investigação. Em virtude da utilização directa de pontas de prova convencionais dos osciloscópios promoverem a ocorrência de *groundloops*, a diferença de potencial foi lida através de um transdutor HZ100 da Hameg Instruments (Figura 5 a). Para medir as correntes eléctricas foi adquirido um transdutor CTB1 da Bergoz (Figura 5 b), sendo os sinais adquiridos através de uma placa PCI-6115 com BNC 2120 da National Instruments (Figura 5 d) e visualizados num osciloscópio Tektronix TDS 2004B (Figura 5 c) de 4 entradas.

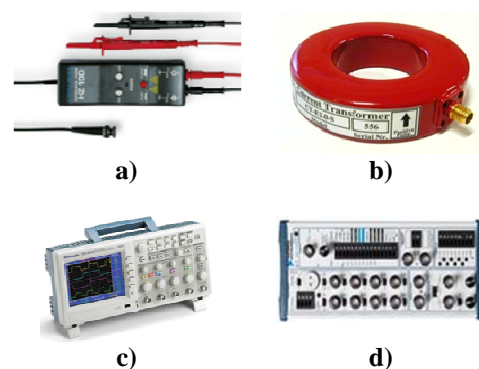


Fig 5 – Equipamentos utilizados para monitorização: a) Transdutor de tensão Hameg Hz100; b) Transdutor de corrente Bergoz CTB1; c) Osciloscópio Tektronix TDS2004B e d) Conector multifunções NI BNC 2120

2.5 - Aparato experimental

A integração de módulos permitiu obter o aparato experimental da presente investigação, apresentado na Figura 6.

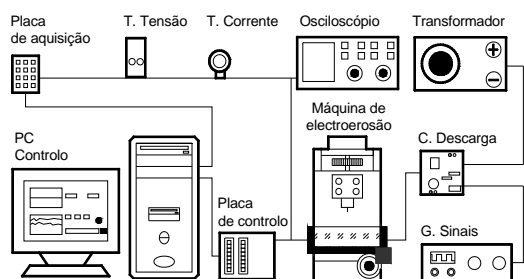


Fig 6 - Representação simplificada do aparato experimental.

3 - DESEMPENHO DA MICRO MF

Nesta secção realiza-se inicialmente a avaliação de desempenho da microMF para permitir quantificar as suas principais características técnicas através de ensaios em vazio com instrumentos de metrologia independentes. De seguida é testada a eficiência global da microMF na execução de micro furos por EDM.

3.1 - Arranque em funcionamento

As características finais da microMF são o resultado combinado das inúmeras opções de projecto tomadas durante o seu desenvolvimento. Assim, a resolução do equipamento é ajustada no programa de controlo (meio/passo completo do motor), enquanto a folga e a repetibilidade (Tabela 2/Tabela) são o resultado dos servomecanismos escolhidos/desenvolvidos na investigação. Questões básicas como a afinação das folgas nas réguas-guia demonstraram ter muita influência na repetibilidade global da microMF.

Tabela 2 – Principais características cinemáticas da micro MF (Eixo Z).

Curso [mm]	Resolução [$\mu\text{m}/\text{passo}$]	Folgas [μm]	Repetibilidade [μm]
25	0,273*	0,27 ~ 0,55	< 1

* Passo completo do motor eléctrico (metade para meio passo).

A dimensão global reduzida do equipamento desenvolvido neste trabalho, com área de trabalho de 25×25 mm, auxiliou no propósito de obter uma máquina de elevada rigidez estrutural

devido à sua configuração compacta. De salientar ainda, pela sua importância, o cuidado a ter com os sistemas de fixação dos eléctrodos de modo a garantir um posicionamento preciso, no presente caso demonstrou ter um erro de posicionamento inferior a dois micrómetros.

A avaliação do circuito de descarga mostrou resultados bastante positivos atendendo à sua simplicidade e baixo custo. Este permite descargas pulsadas até 300 KHz, com controlo sobre o *time on* e *time off*, sendo relevante também as reduzidas dimensões que possibilitam a fácil integração na microMF. A Tabela 3 apresenta as principais características relevantes do equipamento.

Tabela 3 – Dados técnicos da microMF.

CARACTERÍSTICAS	
Dimensões da máquina (C×P×A)	230×450×450 [mm]
Curso (X,Y,Z)	25 [mm]
Resolução (X,Y)	0,780 [μm]
Resolução (Z)	0,273 [μm]
Ajuste eléctrodo (Z)	50 [mm]
Área de trabalho (X,Y)	25×25 [mm]
Velocidade máx. (X,Y)	0.345 [mm/s]
Velocidade máx. (Z)	0.030[mm/s]
Tensão (EDM)	20-330 [V]
Corrente (EDM)	até 4 [A]
Frequência (EDM)	até 300 [kHz]
Caudal dieléctrico	0,75 [l/min]
Diâmetro máx. eléctrodo	até 2 [mm]
Software	Labview
Alimentação	Monofásica, 230 [V]

3.2 - Aplicação em microfuração

A investigação teve o propósito duplo de comprovar a possibilidade de utilizar a microMF desenvolvida na realização de micro furos e conduzir uma investigação sobre a influência de alguns parâmetros

operativos no desempenho global do processo de micro furação por EDM. Os ensaios foram conduzidos em chapas de 1mm de espessura em AISI 1075 com eléctrodos de cobre electrolítico. Durante a investigação foi utilizado o dieléctrico líquido SE180 da Castrol e fez-se variar a frequência de até 200 kHz para diâmetros de eléctrodo de 0,3 e 1mm, todos os outros parâmetros forma mantidos constantes.

A Figura 7 apresenta a evolução da taxa de remoção de material (TRM) em função da frequência de descarga para diferentes diâmetros dos eléctrodos. Observa-se uma redução da TMR com a diminuição do diâmetro do eléctrodo; O eléctrodo de 0,3mm apresenta um valor da TRM de 25% do eléctrodo de maior dimensão, diferença que se agrava para 5% com o aumento da frequência (de 10 para 200 kHz). De facto, a frequência de descarga parece ter uma influência na TRM distinta conforme o diâmetro do eléctrodo, tendendo em ambos os casos para um valor da TRM estacionário.

Os resultados encontrados no presente trabalho estão em concordância com Amorim (2007) que realizou ensaios com um eléctrodo de 20mm de diâmetro, intensidade entre 3 a 8A, com uma variação de frequência entre 10 kHz e 50 kHz, mostrando que a TRM tende a ficar constante com o aumento da frequência. O comportamento distinto para o eléctrodo de menor dimensão poderá estar associada a alguma falta de rigidez, promovendo a deflexão da ferramenta e o aumento da taxa de curtos-circuito. De facto, a monitorização dos parâmetros eléctricos do processo de EDM mostrou o aumento de curtos-circuito.

A TRM observada neste trabalho apresenta valores comparáveis com outras investigações disponíveis na bibliografia da especialidade; Bigot (2006) fez um estudo análogo, utilizando um eléctrodo de tungsténio com 137 μm de diâmetro, 1,4 A, 80 V de tensão e uma frequência de 17 kHz, obtendo uma TRM de 1 $\text{mm}^3/\text{min} \cdot 1000$, em comparação com 2 $\text{mm}^3/\text{min} \cdot 1000$ do presente trabalho.

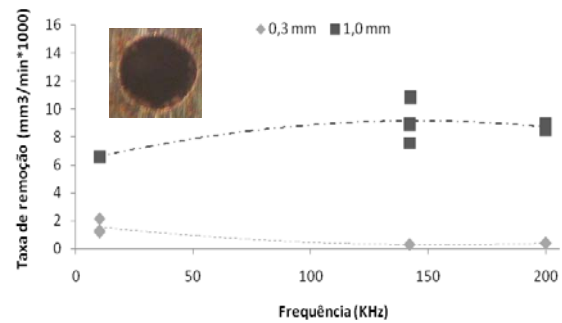


Fig 7- Evolução da taxa de remoção de material em função da frequência das descargas (80V; 1,5A; 0,3 e 1 mm). A imagem anexa mostra o aspecto de um furo de 300 μm .

4 - CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou a possibilidade de desenvolver microMF de baixo custo recorrendo a recursos humanos e materiais existentes em laboratórios de tecnologia mecânica sem comprometer o desempenho relativo a soluções comerciais. A aplicação foi orientada para o processo de micro EDM, com vantagens ao nível didáctico e da investigação experimental. A microMF foi concebida segundo um conceito modular de forma permitir converter o equipamento, e transitar de tecnologia de microfabrico (p.ex. de microEDM para microECM). O circuito de descargas permitiu gerar sinais quadrados de elevada frequência e de energia controlada, além de outras funcionalidades não disponíveis em máquinas comerciais, p.ex., a mono descarga para investigação do plasma. Os servomecanismos apresentaram valores de precisão e folga excelentes, ao nível das microMF comerciais. A aplicação mostrou um desempenho similar a trabalhos afins (Bigot, 2006). No entanto, observou-se dificuldades ao nível da TRM com a miniaturização dos furos, tema que dera ser abordado por futuras investigações.

5 - REFERÊNCIAS

- (Amorim, 2007) Amorim, F.L, Weingaertner, W.L., "The behavior of graphite and copper electrodes on the finish die-sinking electrical discharge machining of AISI P20 tool steel", J.Braz.Soc.Mech.Sci.&Eng., ABCM, 2007.

- (Bigot, 2006), Bigot, S., Valentinčič, J., Blatnik, O., Junkar, M., “Micro EDM parameters optimisation”, 2006.
- (Katz, 2004), Katz, Z., Tibbles, C.J., “Analysis of micro-scale EDM process”, Springer-Verlag London Limited, 2004.
- (Moylan, 2005) Moylan, S.P., Chandrasekar, S.; Benavides, G.L., “High-speed micro-electro-discharge machining”, Sandia report, Canada, 2005.
- (Rajurkar, 2006) Rajurkar, K.P., Levy, G., Malshe, A., Sundaram, M.M., McGeough, J., DeSilda, A., Resnick, R., Hu, X., “Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes”, CIRP Vol. 55,3, 2006.