

## ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE MICROFURAÇÃO ELECTROQUÍMICA

Ribeiro, G.R.<sup>1</sup>, Bragança, I.M.F.<sup>1</sup>, Rosa, P.A.R.<sup>2</sup>, Martins, P.A.F.<sup>3</sup>

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



### RESUMO

*A microfuração electroquímica permite combinar um bom acabamento superficial com uma elevada taxa de remoção de material, no entanto, os furos apresentam geralmente uma morfologia indesejada. O presente trabalho realiza uma análise compreensiva dos principais parâmetros que controlam a morfologia dos microfuros, tendo em consideração a influência na taxa de remoção de material de modo a assegurar tempos de maquinaria competitivos. Nesta investigação foram seleccionados materiais de difícil processamento pelas tecnologias tradicionais, o AISI 304 e o AISI 1075, na forma de chapa com 1mm de espessura. As ferramentas consistiram em eléctrodos de cobre com diâmetro de 0.5mm e como meio electrólito diferentes soluções de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> em água desionizada com concentrações de 0 a 60 ml/l. O estudo demonstra que enquanto a conicidade dos furos é controlada pela concentração do dieléctrico, a taxa de remoção de material é essencialmente influenciada pela frequência das descargas eléctricas.*

### 1- INTRODUÇÃO

Os fundamentos da maquinaria electroquímica (ECM) estão bem firmados, relativamente a outras tecnologias de fabrico, tendo por base o princípio da dissolução anódica de metais descrita por Michael Faraday (1791-1867). O ECM possibilita processar materiais de elevada dureza, permitindo gerar geometrias complexas de elevado acabamento superficial. A ausência de esforços nas ferramentas, pois não existe contacto mecânico (formação de avara) ou ondas de pressão (ebulição térmica), faz desta tecnologia uma das mais adequadas para a abertura de microfuros de elevada esbeltez (McGeough, 2005). No entanto, existem questões tecnológicas que dificultam a implementação em ambiente industrial (Bhatta-charyya et al. 2004), classificadas em três grupos: (i)

efeitos de escala (Park et al. 2003); (ii) controlo e previsão (Datta e Landolt, 1981) e (iii) a aplicação a novos materiais (Bao et al. 2008). De facto, apesar de existir aplicações amplamente estudadas, as lacunas no conhecimento dificultam a aplicação e o controlo do processo na prática industrial.

O presente trabalho desenvolve-se em torno da análise compreensiva dos principais parâmetros que controlam a morfologia dos microfuros, contabilizando a influência na taxa de remoção de material de forma a garantir tempos de maquinaria competitivos. Neste âmbito, apresentam-se três objectivos que passam por: (i) desenvolver um equipamento de microfuração; (ii) aplicar o ECM na execução de microfuros, e (iii) analisar a influência dos parâmetros na taxa de remoção (MRR) e na conicidade dos furos.

## 2 - EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Esta secção apresenta de uma forma resumida o desenvolvimento do aparato experimental, a selecção dos materiais e o plano de ensaios, necessários para permitir cumprir com os objectivos do trabalho.

### 2.1 - Aparato experimental

Para cumprir os objectivos da investigação foi necessário desenvolver uma máquina-ferramenta para microECM, constituída por: (i) uma estrutura rígida, (ii) um servomecanismo de actuação a três eixos, (iii) um reservatório para acomodar o electrólito, (iv) um sistema de controlo numérico adaptativo e (v) um circuito electrónico para descargas pulsadas.

A máquina (Fig. 1) é constituída por uma estrutura tradicional em C, dimensionada de forma a reduzir as vibrações intrínsecas ao seu funcionamento durante o processo. O servomecanismo permite uma resolução de  $0.8\mu\text{m}$  nos eixos X e Y e  $0.2\mu\text{m}$  no eixo Z, ambos com 25mm de curso. O tanque usado para acomodar o electrólito foi fabricado em alumínio e vidro. O controlo foi desenvolvido em LabVIEW, fazendo uso da aquisição do sinal de tensão como parâmetro de controlo do eléctrodo durante a furação. O circuito para descargas pulsadas foi idealizado de forma a permitir gerar pulsos quadrados com frequência de trabalho entre os 10Hz e o 1MHz, com um *duty-cycle* constante de 50%, e com uma tensão e intensidade de 100V e 3A, respectivamente.

### 2.2 - Material

Os materiais seleccionados para a investigação foram o AISI 304 e o AISI 1075, em formatos de chapa com  $40\times 50\times 1\text{mm}$ . Os eléctrodos utilizados foram de cobre electrolítico com diâmetro de 0.5mm e comprimento de 400mm. O electrólito utilizado foi uma solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (a 96%) em concentrações de 0, 5, 10, 30 e 60 ml/l em água desionizada.

### 2.3 - Plano de ensaios

O plano de ensaios consistiu em combinar as principais gamas de valores dos parâmetros operativos para permitir determinar a sua influência na conicidade e na taxa de remoção de material (Tabela 1).

**Tabela 1** – Principais parâmetros operativos.

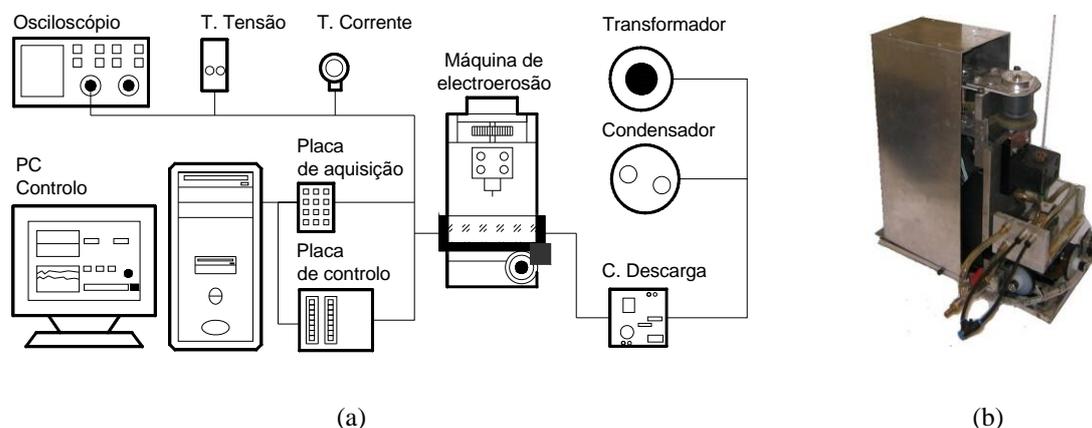
Intensidade	(A)	1, 1.5 e 2
Frequência	(kHz)	10, 100 e 1000
Concentração	(ml/l)	0, 5, 10, 30 e 60

## 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta secção apresenta sinteticamente a análise da influência dos principais parâmetros operativos na morfologia típica dos furos, com destaque para a conicidade, e na taxa de remoção de material.

### 3.1 - Morfologia dos furos

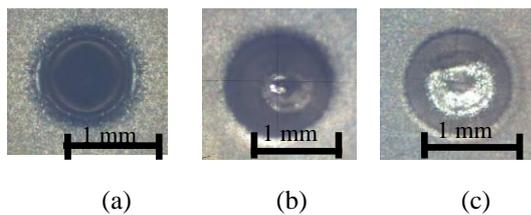
Uma das características típicas da furação electroquímica é a morfologia dos furos, destacando-se a existência de arestas bole-adas e de uma ligeira conicidade das paredes (Fig. 2 e 3). Na Fig. 3 observa-se a



**Fig. 1** - a) Representação simplificada do aparato experimental; b) Máquina de microfuração por ECM

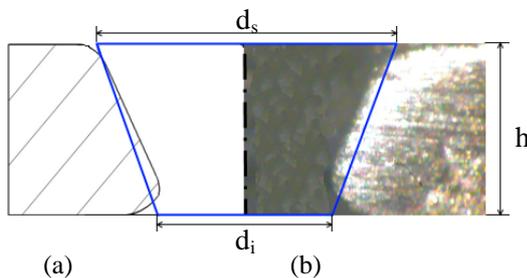
secção transversal de um furo realizado em condições operativas que permitem realçar essa morfologia, onde a característica mais predominante é a conicidade do furo. Esta característica pode inviabilizar a utilização do ECM, devendo ser considerada na fase de selecção das tecnologias de furação. De facto, o controlo desta característica é uma necessidade para a implementação do processo de furação.

Para quantificar o valor da conicidade, evitando tarefas morosas de seccionamento do furo, foram obtidas estimativas baseadas na medição do maior ( $d_s$ ) e do menor ( $d_i$ ) diâmetro do furo através de um projector de perfis. A manipulação matemática destes valores, combinados com a espessura ( $h$ ) da chapa metálica tornou possível obter uma boa estimativa do volume de material removido, cujo contorno de revolução é representado pela linha azul da Fig. 3. A conicidade, é calculada a partir da Eq. (1).



**Fig. 2** – Furos realizados por ECM numa chapa de AISI 304 (100kHz, 2A), em meio electrolítico com concentrações distintas de  $H_2SO_4$ : a) 10; b) 30; e c) 60ml/l.

$$Conicidade = \frac{d_s - d_i}{h} \quad (1)$$



**Fig. 3** – Morfologia dos furos obtidos por ECM: a) Secção transversal simplificada; b) Secção transversal de um furo (AISI 1075, 10kHz, 2A, 60ml/l).

### 3.2 - Conicidade dos furos

A conicidade é o resultado combinado do tempo de exposição ao ácido e da distribuição de potencial eléctrico entre a ferramenta e o material a processar, o qual

promove uma evolução quase linear do diâmetro ao longo do furo (para esbeltez unitária ou próxima). Alguns autores também indicam como causa a variação da resistência eléctrica na folga (*gap*) entre o material e a ferramenta (cátodo), influenciando o avanço do cátodo e promovendo uma remoção de material heterogénea (Sen e Shan, 2005).

A evolução da conicidade foi analisada em função dos seguintes parâmetros: corrente (A), tempo de maquinagem (min) e concentração de electrólito (ml/l). Uma característica observada durante os ensaios foi a perda de espessura dos provetes em AISI 1075 (remoção difusa), enquanto com o AISI 304 a remoção de material foi localizada. A imersão de um provete de AISI 1075 em dieléctrico durante três horas (sem protecção) promove uma redução de 15% na espessura da chapa, enquanto com AISI 304 (resistente à corrosão) não foi observada perda de espessura. No AISI 304 ocorre a estabilização dum filme de óxidos e hidróxidos com alguns nanómetros de espessura na superfície do material (passivação), devido à presença de elevados níveis de cromo e níquel, que inibe a continuação do processo de oxidação e a consequente dissolução do metal. No entanto, em zonas de elevado potencial eléctrico (corrente pulsada) é possível quebrar a película de óxido promovendo o transporte de iões e a consequentemente dissolução anódica do metal (Cagnon et al. 2002).

Na Fig. 4 é possível observar a evolução da conicidade em função da corrente eléctrica, oposta entre o AISI 304 e o AISI 1075. Esta observação vem em desacordo com Sen e Shan (2005) que observaram a diminuição da conicidade com o aumento da intensidade para o caso do AISI 304, indicando a formação de precipitados que protegem a peça da maquinagem lateral excessiva. No entanto, Sen e Shan (2005) utilizaram intensidades de corrente entre 100 e 350A, o que parece indiciar uma alteração do comportamento do processo com a redução de escala.

Na microfuração o facto de a intensidade ser baixa pode dificultar a formação de precipitados, traduzindo-se num aumento da conicidade devido ao aumento da taxa de

remoção. Outra razão prende-se pelo facto de um electrólito, como ácido permite a dissolução do material removido no meio ao invés de o precipitar. A utilização de uma corrente baixa aliada à baixa resistividade do electrólito também permite maior dispersão da energia. No caso do aço AISI 1075, observou-se o comportamento esperado. O facto de haver uma maior *MRR* permitiu uma furação mais rápida combinada com uma menor exposição da peça ao ácido.

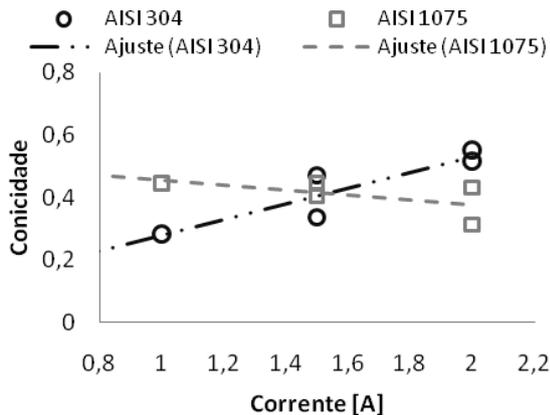


Fig. 4 – Evolução da conicidade em função da corrente eléctrica (100kHz, 60ml/l).

A Fig. 5 mostra que, no caso do aço AISI 1075 a conicidade aumenta com o tempo, ou seja, o tempo provoca um desgaste uniforme ao longo de todo o furo, aumentando os diâmetros, devido à maior exposição por parte da peça ao ácido. No caso do aço AISI 304, este é afectado preponderantemente com a intensidade de corrente e não com o tempo, devido à protecção que lhe é inerente. Ou seja, quando se fura rápido é necessário uma elevada intensidade de corrente, mas esta provoca uma conicidade elevada, enquanto com uma intensidade de corrente baixa, demora muito tempo, mas abre-se o furo de forma mais uniforme e cilíndrica.

A Fig. 6 apresenta a evolução da conicidade em função da concentração. No AISI 304 existe uma conicidade elevada a 10 e a 60 ml/l, enquanto para o AISI 1075 esta vai aumentando com a concentração. De Silva et al. (2000), verificaram existir uma maior concentração de energia, e conseqüente precisão na remoção de material, quando se utiliza menores concen-

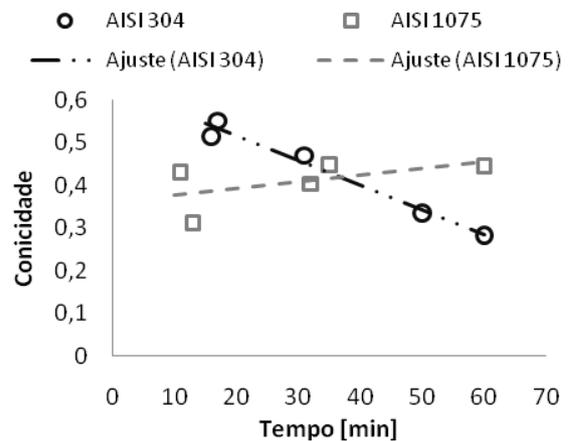


Fig. 5 – Evolução da conicidade em função do tempo (100kHz, 60ml/l).

trações de electrólito, obtendo-se desta forma uma remoção mais precisa e localizada, com a vantagem de produzir paredes mais verticais. No entanto, com concentração de 30ml/l, o aço AISI 304 tem a sua conicidade mais baixa. Esta zona de concentração intermédia permite obter um equilíbrio entre uma *MRR* moderada e uma acção de remoção localizada.

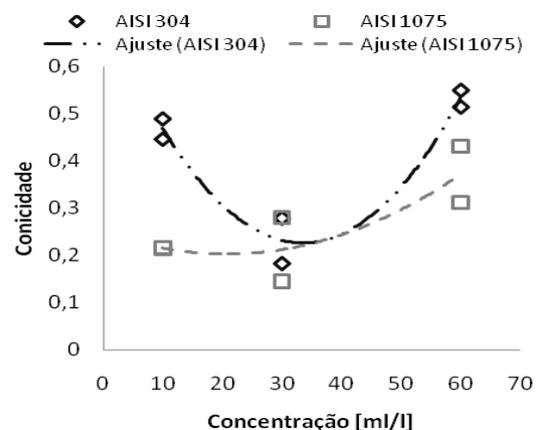


Fig. 6 – Evolução da conicidade em função da concentração (100kHz, 2A).

### 3.3 - Taxa de remoção de material

A Fig. 7 mostra existir um aumento da taxa de remoção em função da intensidade de corrente, com o aço AISI 304 a mostrar um crescimento mais do que proporcional. De salientar que ambos os materiais apresentaram uma *MRR* idêntica para uma intensidade de 2A.

No ECM tradicional, a *MRR* aumenta sempre que a concentração de electrólito aumenta, neste caso o  $H_2SO_4$ , devido à me-

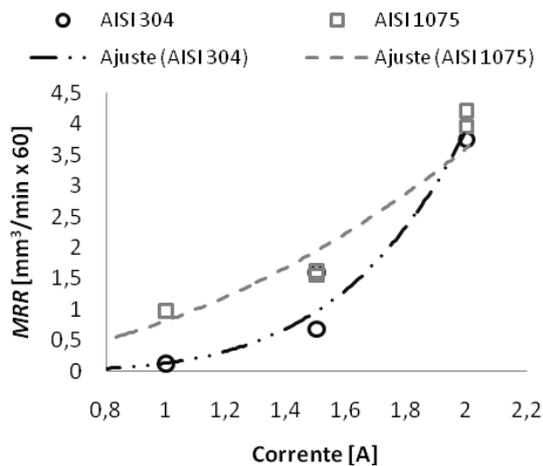


Fig. 7 – Evolução da *MRR* em função da corrente (100kHz, 60ml/l).

nor resistividade deste e portanto maior passagem de corrente, proporcionando uma taxa de remoção de material maior. No entanto, a observação da Fig. 8 permite constatar o oposto. O facto de se usar baixas intensidades de corrente em conjunto com a ausência de isolamento da ferramenta e da peça na área que não é maquinada, numa solução com condutividade elevada (concentração elevada), promove uma maior dissipação de corrente ao longo do electrólito causando uma redução da *MRR*.

Foram realizados ensaios adicionais de forma a compreender a evolução do processo a baixas concentrações, inclusive na ausência de ácido no electrólito. Realizaram-se testes com concentração de 5ml/l de ácido por cada litro de água desionizada e sem adição de ácido.

Como se observa na Fig. 9, a *MRR* conti-

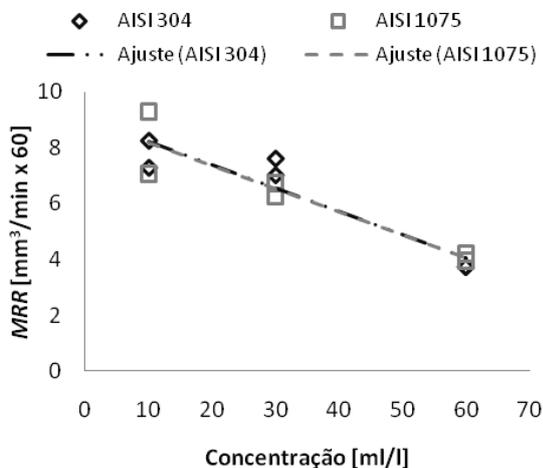


Fig. 8 – Evolução da *MRR* em função da concentração (AISI 304, 100kHz, 2A).

nua a aumentar com a diminuição da concentração, o que corrobora o facto de uma menor concentração contribuir para uma maior localização do mecanismo de remoção de material. No entanto, com água desionizada, o mesmo não acontece, e a taxa de remoção de material cai abruptamente. Após a observação dos principais parâmetros eléctricos do processo, foi possível observar uma alteração na assinatura do processo tendo transitado para uma evolução típica da maquinaria por electroerosão (EDM). De facto, a água desionizada é um meio não condutor (sem iões), de características dieléctricas. Esta observação, em termos gerais, está de acordo com a literatura da especialidade onde o EDM é caracterizado por uma menor *MRR* em relação ao ECM.

Na Fig. 10 é apresentada a *MRR* em função da frequência do processo. A visualização deste gráfico mostra que o aumento da frequência reduz significativamente a taxa de remoção para ambos os aços.

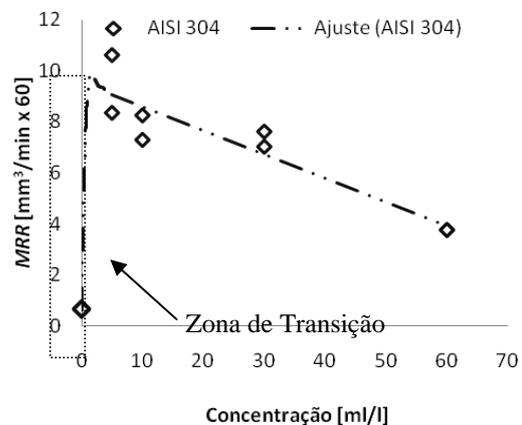


Fig. 9 – Evolução da *MRR* em função da concentração (AISI 304, 100kHz, 2A).

A avaliação deste parâmetro permite exhibir que o aço AISI 1075 teve a maior quebra na taxa de remoção aquando o aumento da frequência. De salientar que o tempo de repouso, sem passagem de corrente, torna-se bastante importante, pois este permite repor as condições iniciais, o que em altas frequências torna-se essencial, já que este tempo é diminuto. O aumento da frequência apesar de fazer diminuir a taxa de remoção permite abrandar a conicidade e proporcionar uma maior precisão do processo (De Silva et al. 2000).

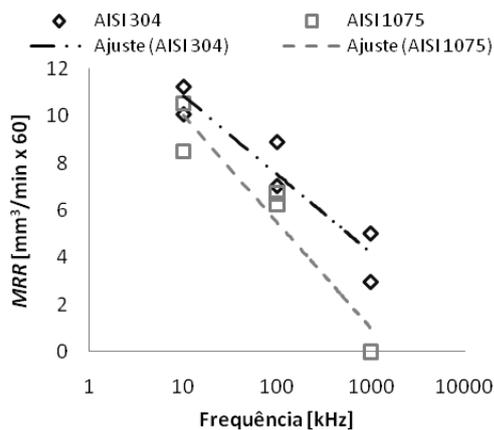


Fig. 10 – Evolução da *MRR* em função da frequência (2A, 30ml/l).

Uma dificuldade tida ao longo do ensaio experimental foi a geração de sinal obtida. De facto, com o aumento da frequência o *duty-cycle* sofreu uma redução progressiva tornando difícil reposição as condições iniciais, reduzindo a limpeza e consequentemente influenciando os resultados finais.

#### 4- CONCLUSÃO

A utilização de dois materiais distintos, o AISI 304 e o AISI 1075, permitiu observar comportamentos bastante diferentes, durante a análise de determinados parâmetros. Enquanto com o AISI 304, se obtinha furos localizados, com o aço AISI 1075 obtinham-se furos de maior dimensão e com uma redução da espessura do provete de testes, devido ao mecanismo de remoção de material difuso.

Realizaram-se ensaios com eléctrodos de 0.5mm de diâmetro e conseguiram-se obter furos com diâmetros ( $d_s$ ) entre 0.65 e 1.5mm, o que demonstra a importância e a influência dos parâmetros operativos e do material, na presente investigação, remetendo para um dado importante, a conicidade. Um aumento de concentração do ácido (electrólito), implica: uma queda na *MRR*, como também um aumento da conicidade, existindo uma interdependência entre estes, variando de acordo com os materiais utilizados.

O parâmetro que mais influencia a *MRR* é a intensidade, em que a duplicação desta permite uma redução no tempo de furação em três vezes. No entanto o parâmetro que

mais limitou a maquinação durante os ensaios, foi a frequência. A 10kHz a *MRR* foi a mais elevada dos ensaios, a 1MHz esta foi praticamente nula, devido a dificuldades em controlar o tempo de limpeza/renovação do dieléctrico.

#### 5- AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer o apoio financeiro do POCI-2010 e a colaboração do aluno de Mestrado Tiago Santos.

#### 6- REFERÊNCIAS

- Bao, H. Jiawen, X. Ying, L. (2008) Aviation-oriented Micromachining Technology—Micro-ECM in Pure Water, Chinese Journal of Aeronautics, Vol 21, Issue 5, October
- Bhattacharyya, B. Munda, J., Malapati, M. (2004), Advancement in electrochemical micro-machining, Int. Jnl of Machine Tools and Manufacture, Vol 44, Issue 15, Dec
- Cagnon, L. Viola, L. Kock, M. Schuster, R. Ertl, G. Gmelin, W. T. Kück, H. (2002) Electrochemical Micromachining of Stainless Steel by Ultrashort Voltage Pulses, Z. Phys. Chem. 217 299–313
- Datta, M. Landolt, D. (1981), Electrochemical machining under pulsed current conditions, Electrochimica Acta, Vol 26, Issue 7, July
- De Silva, A. K. M. Alena H.S.J. McGeough, J. A. (2000) Precision ECM by Process Characteristic Modelling, Annals of the CIRP Vol. 49
- De Silva, A. K. M. Alena H.S.J. McGeough, J. A (2003) Influence of Electrolyte Concentration on Copying Accuracy of Preclson-ECM, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol 52, Issue 1, Pages 165-168
- McGeough J. (2005) Electrochemical Machining (ECM), Institute for Integrated Micro and Nano Systems, University of Edinburgh
- Park, J. W. Lee, E. S. Won, C. H., Moon, Y.H. (2003) Development of Electrochemical micro Machining for Air-Lubricated Hydrodynamic Bearings Microsystem Technologies, Vol 9, 1-2
- Sen, M. Shan, H. S. (2005) A review of electrochemical macro- to micro-hole drilling processes, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, 137–152