



MODELO MATEMÁTICO DO PERFIL DA PEÇA POR USINAGEM ELETROQUÍMICA

João Cirilo da Silva Neto jcirilos@mecanica.ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco M, 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil. (34) 32394376, Ramal 27.

Antônio Marcos Gonçalves de Lima amglima@mecanica.ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco M, 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil. (34) 32394376, Ramal 27.

Evaldo Malaquias da Silva emalaqui@mecanica.ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco M, 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil. (34) 32394376, Ramal 27.

Marcio Bacci da Silva mbacci@mecanica.ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco M, 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil. (34) 32394376, Ramal 27.

Resumo. *Este trabalho apresenta um estudo que deduz a equação do perfil da peça produzida por usinagem eletroquímica, ElectroChemical Machining (ECM), partindo de uma fundamentação teórica do processo e desenvolvimento matemático. Para a sua elaboração foi considerado que o perfil da peça é igual ao formato da ferramenta. Além disso, considerou-se que a usinagem ocorre com a peça estacionada e a ferramenta movimentando-se na sua direção com velocidade de avanço constante.*

Palavras-chave: *Usinagem Eletroquímica, Modelo Matemático, Equação, Perfil*

1. INTRODUÇÃO

Existem várias formas de usinagem eletroquímica: a furação, a rebarbação, o polimento, a retificação, entre outras. Baseado no Princípio da Eletrólise de Faraday, esse processo não tradicional de usinagem ocorre por dissolução anódica da peça, ou seja, a remoção do material acontece através de reações eletroquímicas.

A usinagem eletroquímica tem-se desenvolvido muito nos últimos anos e encontra-se entre um dos processos não tradicionais que apresenta maior aplicabilidade na usinagem de materiais de alta dureza, alta resistência e baixa usinabilidade.

Para que o processo de usinagem ocorra são necessárias três partes principais: ânodo, cátodo e eletrólito. O ânodo, pólo positivo, é a peça a ser usinada, da qual o metal é dissolvido. O cátodo ou ferramenta, pólo negativo, é o perfil da peça que se quer produzir. A peça e a ferramenta devem ser condutoras de eletricidade.

O eletrólito é o fluido responsável pela condução de eletricidade que completa o circuito entre o ânodo e o cátodo. O eletrólito é, usualmente, uma solução de água e sal que flui com alta pressão, entre o ânodo e cátodo.

O restante da máquina consiste no sistema de alimentação e controle do eletrólito, sistema de suprimento de corrente elétrica, uma cuba eletrolítica e mecanismo de avanço e controle da ferramenta.

Objetivo deste trabalho é apresentar um estudo que deduz a equação do perfil da peça por usinagem eletroquímica. O estudo é baseado em fundamentação teórica do princípio de funcionamento do processo e desenvolvimento matemático. O trabalho foi elaborado considerando que a ferramenta se movimenta com uma velocidade de avanço constante na direção da peça, e esta, por outro lado, permanece estacionada.

2. FUNDAMENTOS DE USINAGEM ELETROQUÍMICA

Durante o processo de usinagem eletroquímica, os dois eletrodos: ferramenta e peça são submergidos em um eletrólito (solução aquosa de água e sal) e conectados aos pólos positivo (ânodo-peça) e negativo (cátodo-ferramenta) de uma fonte de potência de alta corrente elétrica e baixa tensão. Os átomos do metal da peça são removidos no ânodo pela ação do eletrólito em função de reações eletroquímicas e os óxidos formados durante a remoção são encaminhados para o cátodo através do fluxo de eletrólito.

Na Figura (1a), antes de formar um *gap* (abertura) suficiente, não ocorrerá remoção de material porque não haverá passagem de corrente entre os eletrodos e o eletrólito. Já a Figura (1b) mostra a peça usinada em função da ação do eletrólito entre a peça e a ferramenta. Observa-se nessa Figura que os contornos da peça foram formados pelos limites da ferramenta na área responsável pela condução eletrolítica. Portanto, o perfil da ferramenta determina a forma da peça após a usinagem eletroquímica.

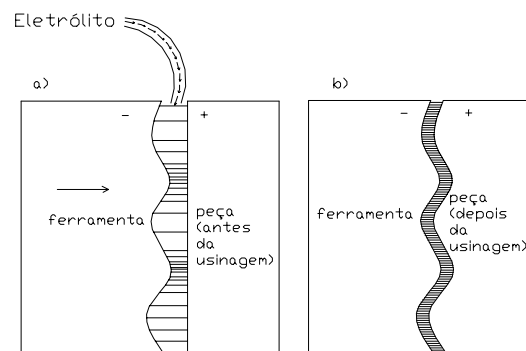


Figura 1(a). Peça antes da usinagem eletroquímica; 1(b) Peça após a usinagem eletroquímica.

O princípio de funcionamento da usinagem eletroquímica pode ser explicado a partir da Fig. (2), que é um exemplo de furação eletroquímica ou formação de cavidade. Cada componente tem sua função específica que será mostrada a seguir.

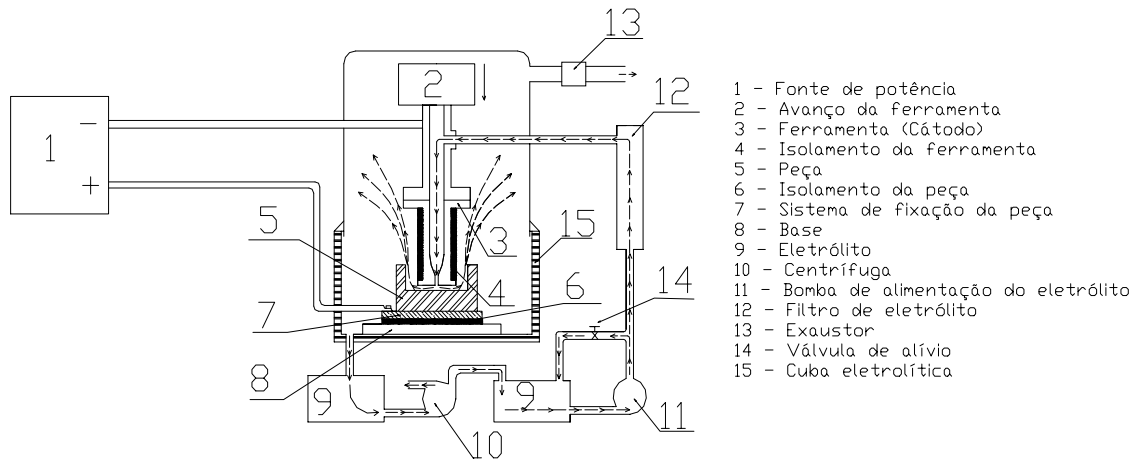


Figura 2. Princípio de funcionamento da usinagem eletroquímica, Tlustty (2000)..

Todo o processo de remoção de material ocorre dentro da cuba eletrolítica (15), que é o local onde ocorre a usinagem e deve ser fabricada de material plástico. O ambiente dentro da cuba é extremamente corrosivo, pois o eletrólito é uma solução de sal em água, que se fosse de outro material, metálico por exemplo, teria problema também com o isolamento dos componentes. O material mais indicado na fabricação da cuba é o acrílico transparente. Além de ser isolante elétrico, o acrílico transparente facilita a visualização do processo de usinagem.

A fonte de potência (1) fornece corrente elétrica (pulsada) de alta intensidade e baixa tensão que é conectada nos eletrodos. O eletrólito (9) tem a função de formar condutividade entre a peça e a ferramenta que provocará a dissolução do metal da peça. Os eletrólitos mais comuns são o cloreto de sódio (NaCl) e nitrato de sódio (NaNO₃). Outra função do eletrólito é a de refrigerar a peça e a ferramenta durante a usinagem, pois ele é bombeado através de um furo contido na ferramenta (3) e lançado na região de usinagem. A ferramenta tem uma velocidade de avanço constante (2), cuja função é aproximar-se da peça (4) e manter um *gap* (abertura) também constante na interface da ferramenta com a peça.

A ferramenta deve possuir propriedades que facilitam a passagem da corrente na sua interface com a peça e o eletrólito. O material mais utilizado para a confecção da ferramenta é o cobre eletrólito. A peça geralmente fica parada. Além de possuir isolamento elétrico, a peça precisa estar bem afixada na base da máquina (8) para se evitar vibrações ou trepidações. A ocorrência de tais fenômenos pode acarretar danos à ferramenta e prejudicar o acabamento da peça usinada.

A remoção do material acontece quando a fonte fornece corrente para os eletrodos na presença do eletrólito, alimentado pela bomba (11), fazendo com que a dissociação dos íons ocorra com grande intensidade, arrancando o material da peça. A taxa de remoção de material depende da capacidade da fonte de potência, do material da peça, das características do eletrólito, entre outros fatores. Como esse arrancamento de material pode ser mantido nestas condições e pode ser controlado em função dos parâmetros de corte, consegue-se aplicar este processo na usinagem de materiais condutores de eletricidade.

As partículas removidas da peça são conduzidas para o sistema de sucção de eletrólito em função do fluxo do mesmo. Estas partículas precisam ser separadas do eletrólito, caso contrário elas podem provocar curto circuito entre os eletrodos, danificando a ferramenta e prejudicando o acabamento da peça. Os métodos mais utilizados para a limpeza do eletrólito são a centrifugação (10) e a filtragem (12). Após a filtragem o eletrólito entra no processo de usinagem novamente porque o sistema de alimentação do eletrólito é cíclico.

O exaustor (13) tem a função de eliminar os gases de hidrogênio formados no cátodo. Estes gases, sendo explosivos, precisam ser retirados do processo. Além disso, bolhas de hidrogênio podem prejudicar as propriedades do eletrólito.

Observa-se, pelo esquema acima representado, que pode haver perda de eletrólito por evaporação ou vazamento durante a usinagem eletroquímica, portanto o mesmo deve ser repostado periodicamente. Além disso, devem ser verificado seu estado geral, temperatura e pH.

3. MODELO MATEMÁTICO PARA DEDUZIR A EQUAÇÃO DO PERFIL DA PEÇA

Na usinagem eletroquímica (ECM) a taxa de remoção de material resulta em uma dissolução da peça átomo por átomo que gera o seu perfil. Neste processo, essa taxa é igual à velocidade de dissolução anódica V_n , que é normal à superfície anódica, como mostra a Fig. (3).

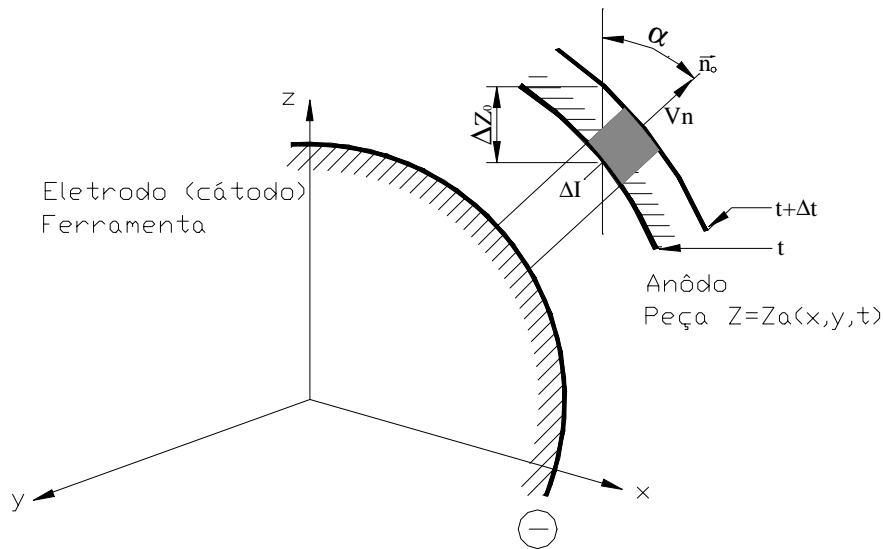


Figura 3. Esquema do perfil da peça na usinagem eletroquímica.

Para dedução da expressão da velocidade de dissolução V_n utilizou-se um sistema de coordenadas no elemento da superfície anódica com área ΔA , através do qual a corrente anódica Δi flui, como mostra a Fig. (3), Kozak (2001). Nesse processo parte das cargas elétricas são transferidas do ânodo pelos íons (cátions) indo para o eletrólito, que é importante na dissolução, e parte dos ânions envolve no ânodo (óxido, íons de cloreto, etc).

A taxa de corrente ΔI_+ , que é responsável pela dissolução do metal (com corrente total ΔI) é chamada eficiência da corrente de dissolução anódica, que é mostrada na Eq. (3.1):

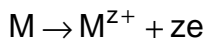
$$\eta = \frac{\Delta I_+}{\Delta I} \quad (3.1)$$

A eficiência da corrente é frequentemente expressa em termos de porcentagem (η) e depende do material da peça, do tipo de eletrólito, bem como das condições de usinagem e, principalmente da densidade de corrente. Depende ainda da temperatura e do fluxo de eletrólito. Em muitas referências, Rumyantsev e Davydov (1989), por exemplo, a eficiência da corrente é definida como a taxa de massa teórica baseada nas leis de Faraday, que considera a eficiência da corrente em 100% no processo de dissolução anódica.

No caso quando a remoção do material é puramente eletroquímica, ou seja, não existe remoção mecânica do material, tais como erosão hidrodinâmica, erosão elétrica ou micro-cortes por abrasivo, a taxa de remoção de material pode ser obtida pela primeira lei de Faraday, Denaro (1971). De acordo com essa lei, a massa de material removido Δm , ou seja, massa de íons de metal correspondente à corrente ΔI_+ durante o tempo Δt (para a carga elétrica $\Delta I_+ \Delta t$) é dada por:

$$\Delta m = k \Delta I_+ \Delta t \quad (3.2)$$

Onde: k é o equivalente eletroquímico do material da peça, que é igual à massa de íons por unidade de carga elétrica de 1 Coulomb (1 A.sec). Na segunda lei básica de Faraday, o equivalente eletroquímico para a reação:



É dado por:

$$k = \frac{A}{zF} \quad (3.3)$$

Onde: A é o peso atômico do metal M , F é a constante de Faraday (96500C) e z é a valência do metal, sendo a relação A/z o equivalente eletroquímico.

Se uma liga consiste de i -elementos tal que cada quantidade de elementos for uma fração n_i do total, e considerando que cada elemento dissolve independente e simultaneamente com os outros, o equivalente eletroquímico da liga pode ser encontrado pela Eq. (3.4):

$$k = \frac{1}{F \sum \frac{n_i z_i}{A_i}} \quad (3.4)$$

Tomando ΔI_+ da eq. (3.1) e expressando a massa dissolvida Δm em termos da espessura da camada do material removido a partir do elemento de superfície ΔA , a Eq. (3.2) é re-escrita como:

$$\rho \Delta h \Delta A = \eta k \Delta I \Delta t \quad (3.5)$$

$$\text{ou } \Delta h = \eta \frac{k}{\rho_m} \frac{\Delta I}{\Delta A} \Delta t$$

Onde: ρ_m é a densidade do material da peça.

Tomando o limite como todas as quantidades diferenciais aproximando-se de zero, pela definição da derivada, chega-se à relação requerida para a velocidade de dissolução:

$$V_n = \eta \frac{k}{\rho_m} i_a \quad (3.6)$$

$$\text{Ou } V_n = K_v i_a \quad (3.7)$$

Onde: $i_a = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta A}$ é a densidade de corrente do ânodo.

O termo $K_v = \eta k / \rho$ é conhecido como coeficiente de usinabilidade eletroquímica, que é igual ao volume de material dissolvido do ânodo por unidade de carga elétrica. O coeficiente K_v pode ser determinado experimentalmente por vários métodos, mas, geralmente, os valores de K_v para diferentes materiais podem ser tabelados, Metal's Handbook (1989).

Pelas Leis de Faraday pode-se determinar a taxa de remoção de material (TRM, Q_v), que depende das propriedades eletroquímicas do material da peça (K_v) que é proporcional à corrente total, e é definida como sendo a quantidade de material removido na unidade de tempo: $Q_v = dm/dt$, tem-se então:

$$Q_v = K_v I \quad (3.8)$$

A eficiência da corrente e K_v dependem das características do eletrólito e da densidade de corrente. Segundo, Rumyantsev, e Davydov (1989), do ponto de vista da acuracidade de forma ela é melhor com o aumento da densidade da corrente. Em relação aos eletrólitos, a aplicação do eletrólito de NaCl permite alta TRM, porém pelo ponto de vista da acuracidade, a aplicação do NaNO₃ é melhor.

Conhecida a velocidade de dissolução, V_n , no ânodo em função de tempo, a evolução do perfil da superfície pode ser descrita em diferentes direções dependendo da descrição da forma da superfície assumida.

Considerando o caso quando a superfície (ânodo) é descrita pela função explícita. $z = z_a(x, y, z)$ em coordenadas cartesianas (x, y, z) , fixadas na peça (freqüentemente estacionária), como mostra a Fig. (4), Kozak (2001), pode-se determinar V_n como se segue.

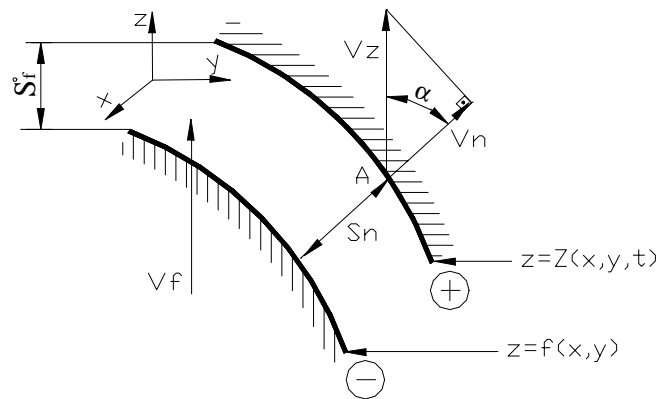


Figura 4. Esquema para a formação do perfil da peça na usinagem eletroquímica em coordenadas cartesianas (x, y, z) ,

O deslocamento do ânodo na direção do eixo z acontece com a velocidade:

$$V_z = \frac{\partial Z_a}{\partial t} \quad (3.9)$$

Portanto, tem-se que:

$$V_z = \frac{V_n(x_a, y_a, t)}{\cos \alpha(x_a, y_a, t)} \quad (3.10)$$

Onde: $x_a, y_a, z = z_a(x_a, y_a, t)$ são coordenadas dos pontos existentes no ânodo, e α é o ângulo entre a normal e a superfície do ânodo $n\alpha$ e o eixo z.

Por causa das coordenadas da posição normal do vetor, têm-se as componentes:

$$\vec{n}_a = \left(\frac{\partial Z_a}{\partial x}, \frac{\partial Z_a}{\partial y}, -1 \right)$$

$$\text{Daí: } \cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial y} \right)^2}} \quad (3.11)$$

A substituição da distribuição de velocidade V_z na Eq. (3.11) produz a equação do perfil da peça por usinagem eletroquímica nas coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial z_a}{\partial t} = K_v i_a(x_a, y_a, t) \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial y} \right)^2} \quad (3.12)$$

Considerando agora que a superfície do ânodo seja descrita pela forma da equação implícita:

$$F(x, y, t) = 0 \quad (3.13)$$

Tomando a derivada substancial da função, tem-se que:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial F}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial F}{\partial z} \frac{dz}{dt} = 0$$

$$\text{Introduzindo o gradiente da função } F: \Delta F = \text{grad } F = \frac{\partial F}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial F}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial F}{\partial z} \hat{k}$$

E notando que: $\frac{dx}{dt} = V_x$; $\frac{dy}{dt} = V_y$; $\frac{dz}{dt} = V_z$ são componentes do vetor velocidade de dissolução V_n , tem-se:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\vec{V}_n, \Delta F) = 0 \quad (3.14)$$

Onde: $(\vec{V}_n, \nabla F)$ é o ponto do produto dos vetores \vec{V}_n e ∇F . De acordo com a Eq. (3.8), tem-se:

$$\vec{V}_n = K_v i_a \vec{n}_a \quad (3.15)$$

Onde: $\vec{n}_a = \frac{\Delta F}{|\Delta F|}$ é um vetor unidade da superfície.

A substituição da Eq. (3.15) na Eq. (3.14) e fazendo a simplificação, a equação geral do perfil da peça por usinagem eletroquímica pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + K_v i_a |\Delta F| = 0 \quad (3.16)$$

A Equação Geral (3.16) ou sua forma (3.12) descreve a evolução do perfil da peça para todos os métodos de usinagem eletroquímica.

Substituindo a distribuição da densidade da corrente no cátodo i_c (onde $i_c \leq 0$) invés de i_a e colocando $(\eta k/\rho)$ para deposição do cátodo ao invés de k , nas Eq. (3.12) e (3.16), essas equações também descrevem o processo de eletroforma para deposição de metais no cátodo.

Para obtenção da solução das Eq. (3.12) ou (3.16), o conhecimento da condição inicial e da distribuição da densidade da corrente $i_a(x_a, y_a, t)$ no ânodo durante o período de usinagem é necessário.

A condição inicial é: $z = z_0(x, y, 0)$ e $F_0(x, y, 0) = 0$

Onde: Z_0 ou F_0 é a forma da superfície da peça antes da usinagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerou-se que o perfil da peça usinada é igual à forma da ferramenta porque seu movimento na direção da superfície anódica determina geometricamente a área decorrente da remoção dos átomos do material. Isso ocorre em função da polarização entre a peça, a ferramenta e o eletrólito. Portanto, se em um ponto não houver polarização entre os condutores, não ocorrerá a remoção do material. Além disso, para a dedução da Eq. (3.16) assumiu-se um movimento relativo entre a peça e a ferramenta considerando as ilustrações existentes nas Figs. 1, 3 e 4.

Este trabalho também considera que a remoção do material ocorre exclusivamente por usinagem eletroquímica. Por isso, não existem outras formas de remoção de material.

A equação (3.16) ou sua forma (3.12) é aplicada para quaisquer ligas, desde que elas sejam condutoras de eletricidade. Pode ser observado das leis de Faraday, se uma liga é composta por i -elementos, qualquer fração desses elementos será removida, independentemente de sua concentração na liga.

A utilização da equação explícita justifica-se pelo fato de que a superfície anódica depende das coordenadas cartesianas x , y e z fixadas na peça. À medida que ocorre a remoção, há uma variação da posição dessas coordenadas. Por isso, a velocidade de dissociação do material é normal à superfície do ânodo e do eixo z .

A derivada substancial da função que representa a superfície do ânodo, é feita para representar a variação da mesma nas três direções do plano cartesiano, bem como sua variação com o tempo, o que permite definir o gradiente da função e determinar a velocidade de dissolução v_n .

Na determinação do perfil da peça usinada, sua evolução no tempo, bem como sua forma final, utilizou-se o modelo matemático na forma 2D da superfície. Utilizou-se também coordenadas retangulares tomadas na peça para permitir maior simplificação dos procedimentos matemáticos.

5. CONCLUSÕES

- Neste trabalho a ferramenta se movimenta com uma velocidade de avanço constante na direção da peça que permanece estacionada;
- O perfil da peça usinada é igual ao formato da ferramenta;
- O processo de remoção obedece às leis de Faraday da eletroquímica que é baseada no princípio da eletrólise;
- Na dedução da equação do perfil da peça foram utilizadas coordenadas retangulares
- Como pode ser visto pelo desenvolvimento matemático, chegou-se à uma equação que descreve a evolução do perfil da peça para todos os métodos de usinagem eletroquímica.
- Como trabalhos futuros, pretende-se realizar simulações computacionais para validar o modelo matemático do perfil da peça por usinagem eletroquímica, bem como realizar testes experimentais para comparação dos resultados.

6. AGRADECIMENTOS

A Netzsch do Brasil e ao companheiro Antônio Felisberto por ceder o filtro-prensa para o protótipo de usinagem eletroquímica.

7. REFERÊNCIAS

- Benedict, G.F. 1987, *Nontraditional Manufacturing Processes*, New York, Marcel Dekker, pp.
- Denaro, A.R., 1971; *Fundamentos de Eletroquímica*, Butterworth & Co-Publishers Ltda, Londres, 154 pp.
- Kozak, J., 2001, *Fundamentals of Electrochemical Machining: Principle of Electrochemical Shaping*, Chapter 2, University of Nebraska, Center For Nontraditional Manufacturing Research (NMRC), USA,
- Metal's Handbook, 1989; *Nontraditional Machining*, 9ª Edição, Vol. 16, pp. 533 – 550.
- Rumyantsev, E. e Davydov, A., 1989; *Electrochemical Machining of Metals*, Mir Publishers, Moscou, 168 pp.
- Thlusty, J. 2000, "Manufacturing Process and Equipment", 1st ed, Prentice-Hall, Upper Saddle River, N. Y, (USA).

MATHEMATICAL MODEL FOR ELECTROCHEMICAL MACHINING SHAPING

João Cirilo da Silva Neto

Federal University of Uberlândia, School of Mechanical Engineering, Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Building 1M, PO Box 38400-902, Uberlândia, MG, Brazil.
E-mail: jcirilos@mecanica.ufu.br.

Antônio Marcos Gonçalves de Lima

Federal University of Uberlândia, School of Mechanical Engineering, Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Building 1M, PO Box 38400-902, Uberlândia, MG, Brazil.

E-mail: amglima@mecanica.ufu.br

Evaldo Malaquias da Silva

Federal University of Uberlândia, School of Mechanical Engineering, Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Building 1M, PO Box 38400-902, Uberlândia, MG, Brazil.

E-mail: emalaqui@mecanica.ufu.br

Marcio Bacci da Silva

Federal University of Uberlândia, School of Mechanical Engineering, Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Building 1M, PO Box 38400-902, Uberlândia, MG, Brazil.

E-mail: mbacci@mecanica.ufu.br.

Abstract

This work presents a study that deduces the equation of the profile of the workpiece produced by electrochemical machining. The theoretical basis of the process and mathematical development was considered. For its elaboration it was considered that the profile of the workpiece is the same to the format of the tool. Further, was assumed that the machining occurs with the stopped workpiece and the tool being moved in its direction with constant feed.

Keywords: *Electrochemical Machining, Mathematical Model, Equation, Shaping.*