

ESTUDO DA TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL E DA RUGOSIDADE MÉDIA NA USINAGEM ELETROQUÍMICA DE AÇO INOXIDÁVEL

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

Artur da Silva Carrijo artur@eel.ufu.br

Evaldo Malaquias da Silva emalaqui@mecanica.ufu.br

Marcio Bacci da Silva mbacci@mecanica.ufu.br

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

Resumo: *Este trabalho apresenta a usinagem eletroquímica do aço inoxidável, utilizando um protótipo desenvolvido na Universidade Federal de Uberlândia. A taxa de remoção material (TRM) e a rugosidade média foram estudadas. Os parâmetros utilizados foram a velocidade de avanço da ferramenta, o tipo de eletrólito, a vazão do eletrólito e a tensão da fonte. Foram realizados quarenta e oito experimentos, sendo vinte e quatro com cada eletrólito de NaCl e NaNO₃. A TRM foi influenciada pela velocidade de avanço da ferramenta na maioria dos casos. As peças usinadas com NaCl apresentaram maior rugosidade média.*

Palavras-chave: *Usinagem Eletroquímica Aço Inoxidável, TRM, Rugosidade Média*

1. INTRODUÇÃO

A usinagem eletroquímica (ElectroChemical Machining-ECM) é um processo não tradicional muito utilizado na usinagem de materiais de altíssima dureza e de difícil usinagem, onde a aplicação dos processos tradicionais não é adequada.

Tais materiais necessitam de grandes taxas de energia para sua remoção, que podem causar danos térmicos à peça devido às altas temperaturas geradas na interface peça-ferramenta. Na usinagem tradicional a maior parte da energia é convertida em calor, que é dissipado para a ferramenta, cavaco, meio ambiente e peça, afetando a sua integridade superficial, principalmente na usinagem de materiais muito resistentes.

Ao contrário dos processos tradicionais, na usinagem eletroquímica não existe contato físico direto entre a peça e a ferramenta, pois o mecanismo de remoção de material são as reações eletroquímicas (eletrólise) que ocorrem entre o eletrólito, a peça e a ferramenta, Denaro (1971). Além disso, tem-se observado que nos últimos anos tem aumentado o interesse em estudar o referido processo, devido sua favorável aplicabilidade em materiais de baixa usinabilidade.

Para o funcionamento do processo, além da peça e da ferramenta, são necessários: uma fonte de potência de baixa tensão e de alta corrente elétrica, um eletrólito, que geralmente são o cloreto de sódio (NaCl) e o nitrato de sódio (NaNO₃) e um circuito eletrolítico composto de tubulações, bombas, filtros e sistema de armazenamento, além de uma cuba eletrolítica, que é o local onde ocorre a usinagem, Benedict (1987), Malaquias (2000) e McGeough (1988).

O objetivo deste trabalho é estudar a taxa de remoção de material (TRM) e a rugosidade média dos furos produzidos pela usinagem eletroquímica. Para a realização dos ensaios foi utilizado um protótipo disponível no Laboratório de Usinagem não Tradicional da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU. A pesquisa mostrou que a TRM foi influenciada pela velocidade de avanço da

ferramenta e a rugosidade média foi menor quando foi utilizado eletrólito de nitrato de sódio (NaNO_3) quando comparado com cloreto de sódio (NaCl).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No ferramental da Fig. (1), pode-se notar a montagem de duas placas de sacrifício que são colocadas entre a peça. A razão para esta montagem é justificada pelo fato de que durante o início e fim da usinagem o desvio do jato de eletrólito ataca as placas e não a peça, permitindo menor sobrecorte lateral no perfil usinado. A operação é executada com a peça estacionada e a ferramenta movimentando-se na direção da peça. O eletrólito é alimentado na interface peça-ferramenta.

A ferramenta foi fabricada em cobre eletrolítico com diâmetro externo igual a 8,6mm e diâmetro interno de 3mm. A parte externa desta ferramenta tem um revestimento isolante fabricado em tecnil (*Nylon* comercial) com 0,20mm de espessura. O revestimento foi fixado à ferramenta utilizando cola de cura rápida.

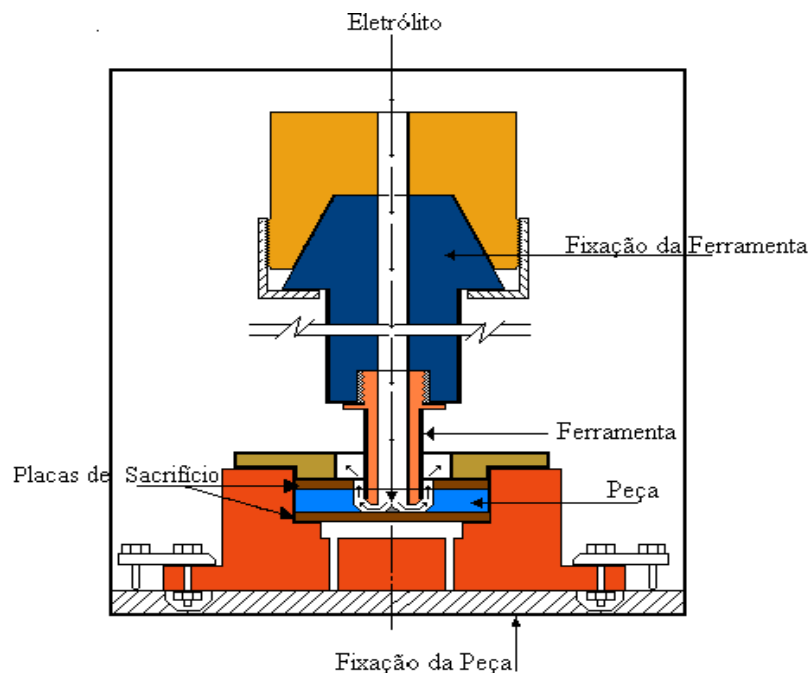


Figura 1. Vista em corte do ferramental de usinagem eletroquímica

O material usinado foi o aço inoxidável austenítico com dureza de 34 HRc, cuja composição química é: Carbono (C) - 0,50%, Manganês (Mn) - 9%, Cromo (Cr) - 21%, Níquel (Ni) - 2,15%, Nitrogênio (N) - 0,50%, Tungstênio (W) - 1,15%, Nióbio (Nb) - 2,15%. As amostras foram preparadas com uma espessura de 6mm. Os eletrólitos utilizados foram o NaCl com 10% de concentração em peso e o NaNO_3 com 25% de concentração em peso (g/l). O aço inoxidável foi escolhido para ser usinado porque possui baixa usinabilidade por processo convencional com forte desgaste na ferramenta durante o corte, Diniz et al (2000) e Gennari Jr (1999). A operação utilizada foi a furação eletroquímica. A Tabela (1) mostra os parâmetros de usinagem eletroquímica do aço inoxidável.

Tabela 1. Os parâmetros de usinagem do aço inoxidável

VARIÁVEIS	NÍVEL (+1)	NÍVEL (-1)
X ₁ : V _f (Velocidade de Avanço) [mm/min]	0,7	0,5
X ₂ : Q (Vazão do Eletrólito) [l/h]	300	200
X ₃ : U (Tensão da Fonte de Potência) [V]	10	8

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise da TRM

A Tabela (2) mostra os resultados gerais da TRM e da rugosidade média, quando o aço inoxidável foi usinado com um eletrólito de NaCl em uma concentração de 100g/l e NaNO₃ a 250g/l. Para fazer as medições dos diâmetros dos furos foi utilizado um micrômetro Mitutoyo interno com resolução de 1µm. As medidas foram tomadas no centro do furo, observando a perpendicularidade dos contatos do micrômetro.

Para o cálculo da TRM, foi utilizada a Eq. (1), considerando a densidade do aço inoxidável como sendo 7,8g/cm³. Nas medições da rugosidade das superfícies laterais do furo foi utilizado um Rugosímetro Mitutoyo modelo Surftest 201. As medições foram realizadas em 3 posições diferentes na parede lateral do furo, com um *cut-off* igual a 0,8 mm.

$$TRM = \frac{(m_{au} - m_{du})}{\rho_{ba} \cdot t_u} \quad (1)$$

em que:

m_{au} = massa dos discos antes da usinagem;

m_{du} = massa dos discos após a usinagem;

ρ_{ba} = massa específica aproximada do aço inoxidável;

t_u = tempo de usinagem.

Ensaio	T (min)	TRM (média) mm ³ /min com NaCl	Ra (µm) Com NaCl	TRM (média) mm ³ /min com NaNO ₃	Ra (µm) com NaNO ₃
1	14,12	40,1	2,60	29,05	0,71
2	12,57	51,25	1,07	36,25	0,62
3	9,52	57,35	0,57	48,25	0,58
4	14,07	43,55	0,83	29,30	1,29
5	12,39	53,35	0,60	36,30	0,63
6	9,44	58,10	0,84	47,60	0,77
7	14,15	44,89	0,88	29,20	0,69
8	12,49	44,85	1,25	38,00	0,51
9	9,50	59,50	0,34	47,35	0,85
10	14,19	43,75	1,14	30,30	1,09
11	12,32	48,60	0,93	38,35	0,77
12	9,53	61,49	0,88	48,35	0,94

O primeiro resultado analisado foi a TRM (em valores médios) utilizando eletrólito de NaCl e NaNO₃. Neste teste, foram mantidas a tensão da fonte em 10V e a vazão do eletrólito em 300l/h. A velocidade de avanço da ferramenta foi de 0,4mm/min, 0,5mm/min e 0,6mm/min.

A Figura (2) mostra que a TRM sofreu influência significativa da velocidade de avanço da ferramenta. Este resultado já era esperado, porque aumentando a velocidade de avanço da ferramenta, implica na diminuição do tempo de usinagem, conseqüentemente, deve aumentar a taxa de remoção do material.

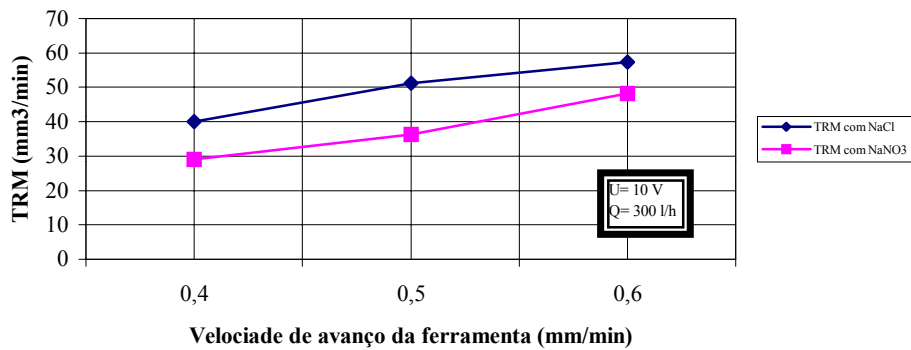


Figura 2. TRM em função da velocidade de avanço da ferramenta para $U=10V$ e $Q=300\text{ l/h}$.

Quando foi utilizada uma vazão de 200l/h, notou-se que a TRM apresentou um comportamento semelhante quando se utilizou uma vazão de 300l/h. Pode-se notar, neste ponto, que a vazão do eletrólito não alterou significativamente a TRM. Isto pode ser devido à restrição da passagem do eletrólito em determinados pontos de usinagem, ou seja, mesmo aumentando a vazão do eletrólito não se conseguiu aumentar, significativamente a TRM, pois de acordo com Benedict 1987, aumentando a vazão do eletrólito a TRM deveria aumentar porque haveria maior fluxo e mobilidade dos íons do metal para o eletrólito.

Quando foi utilizada uma tensão de 15V, houve uma estabilidade da TRM nas velocidades de 0,4mm/min e 0,5 mm/min, quando foi utilizado o NaCl. Mas a TRM aumentou quando a velocidade passou de 0,5 mm/min para 0,6 mm/min, conforme mostra a Fig. 3. O que pode ter ocorrido nas velocidades de 0,4mm/min e 0,5mm/min foi a diminuição da eficiência de corrente durante a operação. As reações eletroquímicas não produziram os efeitos necessários e compatíveis com a velocidade de avanço da ferramenta (0,5mm/min).

Pelos resultados obtidos na usinagem do aço inoxidável austenítico pelo processo de usinagem eletroquímica, pode-se concluir que tanto a usinagem com o NaCl quanto a usinagem com o NaNO_3 a TRM foi governada pela velocidade de avanço da ferramenta. De maneira geral não se perceberam maiores variações da TRM quando a tensão da fonte de potência e a vazão do eletrólito foram alteradas.

No entanto, quando se fez uma análise da TRM para cada tipo de eletrólito, observou-se que o NaCl propiciou maior TRM do que o NaNO_3 . Este resultado está mostrado na Fig. 4. Em todos os ensaios, comparativamente, o NaCl foi melhor que o NaNO_3 em termos de TRM.

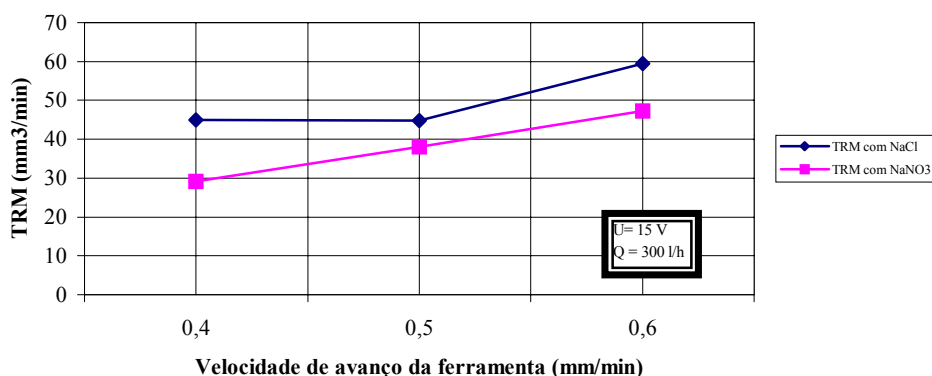


Figura 3. TRM em função da velocidade de avanço da ferramenta para $U=15V$ e $Q=300\text{ l/h}$.

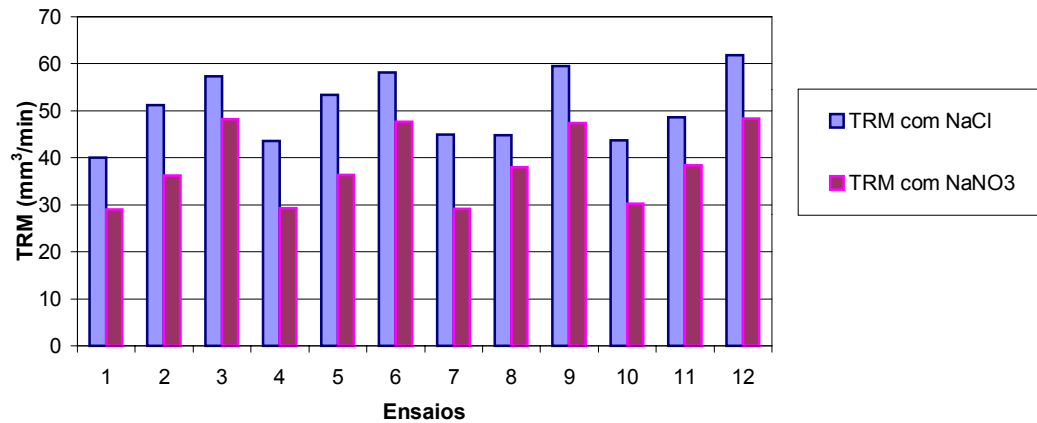


Figura 4. Comparação da TRM com eletrólitos de NaCl e NaNO₃.

Sendo o NaCl um eletrólito não passivador e apresentando eficiência de corrente praticamente constante durante a usinagem, Datta (1993), os resultados comprovaram que, quando se deseja maior TRM, sem se preocupar com outros resultados como rugosidade e sobrecorte lateral, por exemplo, o NaCl é melhor que o NaNO₃.

3.2. Análise da rugosidade média

A Figura (5) mostra uma rugosidade muito alta no caso do NaCl (em relação às demais) na menor velocidade de avanço da ferramenta, porém, para o NaNO₃, a rugosidade apresentou tendência de queda em função do aumento da velocidade de avanço. Velocidades muito baixas podem provocar remoção irregular do material. Se a velocidade de avanço for nula ou muito reduzida, a distância entre a peça e a ferramenta aumenta até um valor máximo para o qual não mais haveria remoção do material porque não haveria passagem de corrente entre a peça e a ferramenta, isto leva a um aumento do *gap* e prejudica a remoção do material, Lanna (1993). O que pode ter acontecido neste ensaio foi o aumento *gap* que afetou a eficiência do processo de usinagem eletroquímica, causando a maior rugosidade dos ensaios realizados.

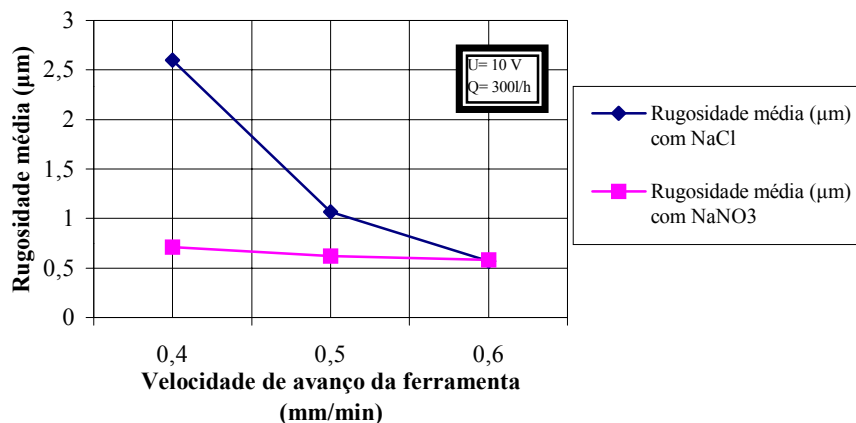


Figura 5. Rugosidade média com NaCl e NaNO₃ em função da velocidade de avanço da ferramenta com $U=10V$ e $Q=300l/h$.

Na Figura (6), reduzindo a vazão, a rugosidade média apresentou o mesmo comportamento quando a velocidade foi aumentada de 0,4mm/min para 0,5mm/min (porém com valores menores que $Q=300l/h$) para o caso do NaCl, mas voltou ao seu valor inicial quando a velocidade foi de 0,6mm/min. Mas para o NaNO₃ o comportamento foi diferente, ou seja, não voltou à condição inicial.

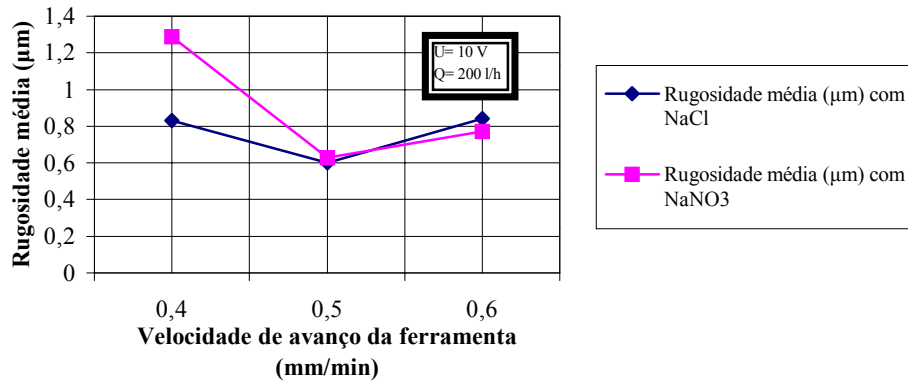


Figura 6. Rugosidade média com NaCl e NaNO₃ em função da velocidade de avanço da ferramenta com U=10V e Q= 200 l/h.

No caso da tensão de 15V e vazão de 300l/h os dois eletrólitos apresentaram comportamentos diferentes para rugosidade, conforme mostra a Fig. (7). Isto pode ter ocorrido em função da eficiência de corrente de cada eletrólito.

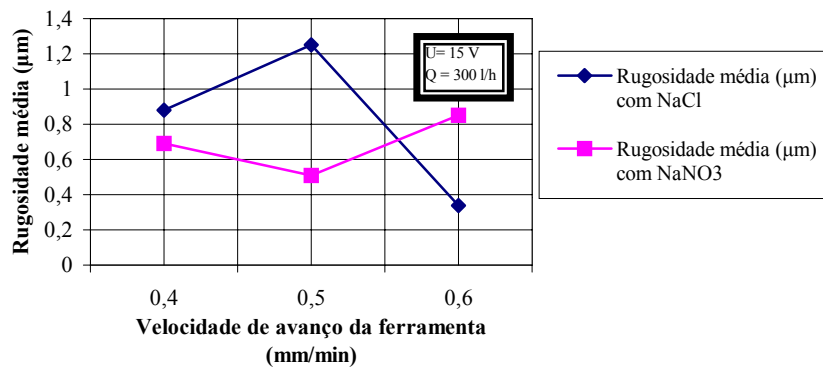


Figura 7. Rugosidade média com NaCl e NaNO₃ em função da velocidade de avanço da ferramenta com U=15V e Q= 300 l/h.

Em todos os ensaios com NaNO₃, coincidentemente, a rugosidade média diminuiu da velocidade de avanço da ferramenta de 0,4mm/min para 0,5mm/min, mas voltou a subir na velocidade de 0,6mm/min. Durante as operações foi muito difícil usinar o material com NaNO₃. Foram perdidos vários ensaios e várias ferramentas em função de curtos-circuitos entre a peça e a ferramenta.

Como o NaNO₃ possui baixa eficiência de corrente em função da densidade de corrente, por isso está mais sujeito a curto-circuito. Neste caso, a ferramenta, movimentando-se com velocidade constante, entra em contato com a peça porque a remoção de material não ocorre na mesma proporção do avanço da ferramenta. Com isso, podem ocorrer, além do curto-circuito, remoções irregulares na lateral do furo, provocando o aumento da rugosidade média em determinadas condições de usinagem.

Contudo, quando foi feito um estudo comparativo da rugosidade média entre os dois eletrólitos, verificou-se que em 58% dos ensaios realizados, o NaCl apresentou rugosidade média maior que o NaNO₃. Estes resultados podem ser verificados na Fig. (8).

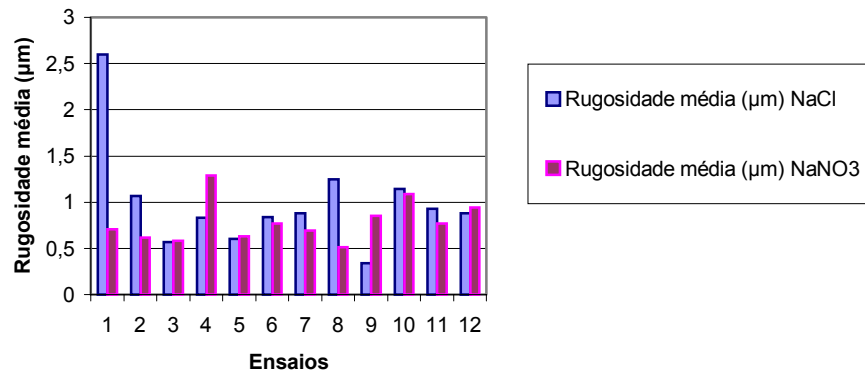


Figura 8. Rugosidade média comparativa com NaCl e NaNO₃.

4. CONCLUSÕES

- A TRM foi influenciada pela velocidade de avanço da ferramenta na maioria dos casos;
- O NaCl apresentou rugosidade média maior que o NaNO₃,
- Os resultados comprovaram que, quando se deseja maior TRM, sem se preocupar com outros resultados como rugosidade média, por exemplo, o NaCl é melhor que o NaNO₃;
- O NaNO₃ é um eletrólito passivador que pode dificultar a usinagem eletroquímica e provocar curto-circuito entre a peça e a ferramenta;
- De maneira geral, não se perceberam maiores variações da TRM quando a tensão da fonte de potência e a vazão do eletrólito foram alteradas.

5. AGRADECIMENTOS

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

À Villares Metals pelo fornecimento de 4 barras de 500mm de comprimento e diâmetro de 19,05mm do aço inoxidável Austenítico SAE-XEV-S (VV50)

6. REFERÊNCIAS

- Benedict, G.F., 1987, *Nontraditional Manufacturing Processes-Electrochemical Machining*, Marcel Dekker, New York and Basel, p.125 – 172.
- Datta, M., 1993; *Anodic Dissolution of Metals at High Rates*, IBM Journal of Research and Development, Vol. 37 n° 02, pp. 207 – 226.
- Denaro, A.R., 1971; *Fundamentos de Eletroquímica*, Butterworth & Co-Publishers Ltda, Londres, 154 pp.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., 2000; “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”, Artliber Editora, 2ª Edição, São Paulo, pp. 147-165.
- Gennari Jr., W., 1999; “Soluções Para Melhoria da Usinabilidade dos Aços inoxidáveis Austeníticos ABNT 304 e ABNT 316”, Anais do IV POSMEC, Uberlândia, pp. 31.
- Malaquias, E. 2000, “*Contribuição ao Estudo da Usinagem Eletroquímica do Aço Rápido ABNT M2*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 141 pp
- McGeough, J.A., 1988; “Advanced Methods of Machining”, Chapman and Hall, London, pp. 55 - 88.

TUDY OF THE MATERIAL REMOVAL RATE AND ROUGHNESS IN THE ELECTROCHEMICAL MACHINING OF STAINLESS STEEL

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

Artur da Silva Carrijo artur@eel.ufu.br

Evaldo Malaquias da Silva emalaqui@mecanica.ufu.br

Marcio Bacci da Silva mbacci@mecanica.ufu.br

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

Abstract. *This work shows the machining of the stainless steel by electrochemical machining process. A prototype developed at the Federal University of Uberlândia was used. The material removal rate (MRR) and roughness were studied. Four parameters were changed during the experiments: feed rate, electrolyte, flow rate of the electrolyte and voltage. Forty eight experiments were carried out in an equipment developed. The electrolytic solutions chloride sodium (NaCl) and nitride sodium (NaNO₃) were used. The results shows that feed rate was the main parameters affecting the material removal rate. The electrochemical machining with electrolytic solutions chloride sodium presented high roughness.*

Keywords: *Electrochemical Machining, Stainless Steel, MRR, Roughness.*