

CÓDIGO 21088

ANÁLISE 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@uniminas.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, 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 reações eletroquímicas (eletrólise) que ocorrem entre o eletrólito, entre a peça e entre a ferramenta, Denaro (1971). Além disso, tem-se observado que nos últimos anos tem aumentado o interesse em estudar o referido processo, devida 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 princípio de funcionamento da usinagem eletroquímica pode ser explicado a partir da Fig. (1), que é um exemplo de furação eletroquímica ou formação de cavidade. Cada componente tem sua função específica que será mostrada a seguir.

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.

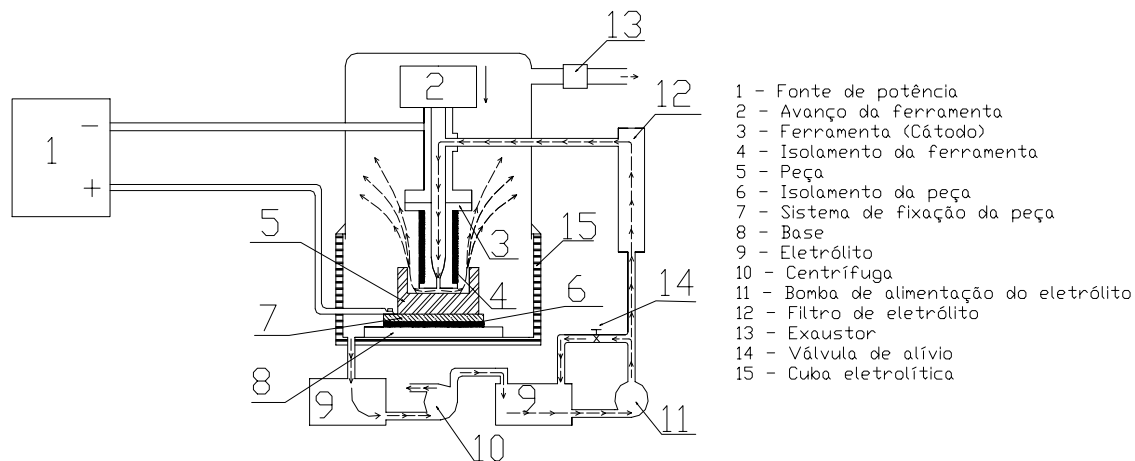


Figura 1. Princípio de funcionamento da usinagem eletroquímica, Tlustý (2000).

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 (NaNO_3). 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 essa remoção de material pode ser mantida nestas condições e pode ser controlada 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 verificados seu estado geral, sua temperatura e seu pH.

O objetivo deste trabalho é estudar a taxa de remoção de material (TRM) e a rugosidade média (R_a) 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, na maioria dos casos e a rugosidade média foi menor quando foi utilizado eletrólito de nitrato de sódio NaNO_3 quando comparado com NaCl .

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

No ferramental da Fig. (2), 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 de 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.

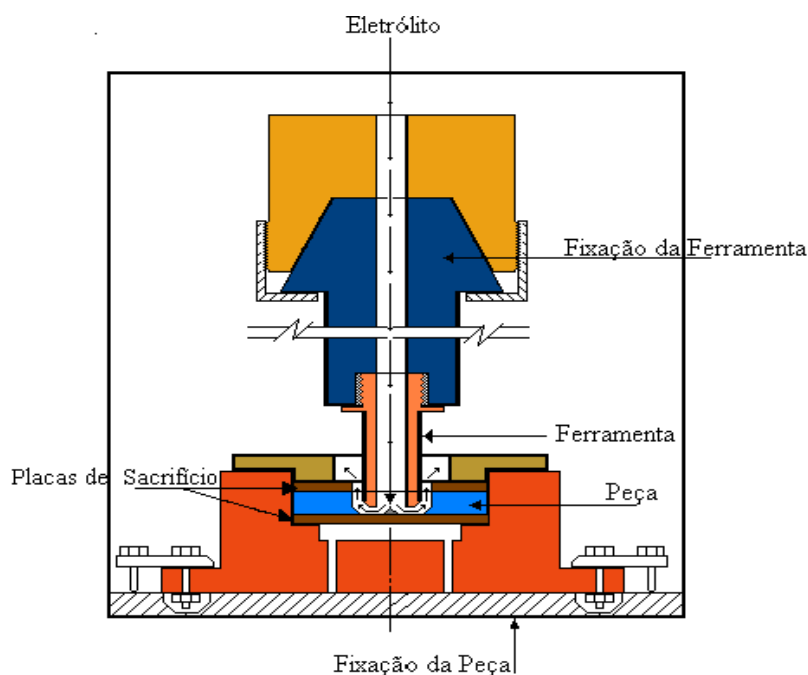


Figura 2. Vista em corte do ferramental de usinagem eletroquímica

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

Para a realização das 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.

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. Onde T (tempo), TRM (taxa de remoção de material) e Ra (rugosidade média)

Tabela 2. Resultados gerais da TRM e da rugosidade média

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, a tensão da fonte foi mantida 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 (3) 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.

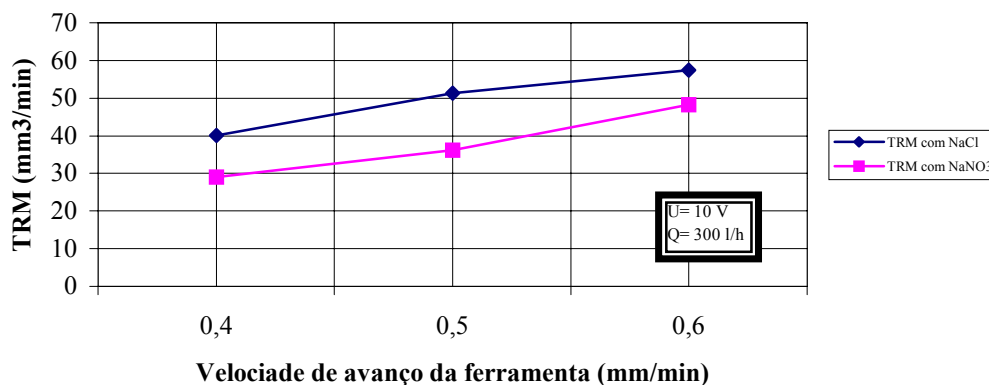


Figura 3. TRM em função da velocidade de avanço da ferramenta para U=10V e Q= 300l/h.

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. (4). 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 NaNO₃ 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 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 NaNO₃. Este resultado está mostrado na Fig. (5). Em todos os ensaios, comparativamente, o NaCl foi melhor que o NaNO₃ em termos de TRM.

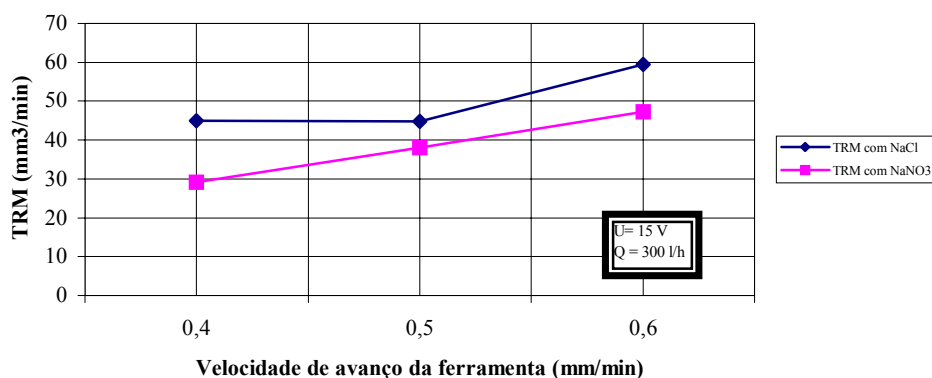


Figura 4. TRM em função da velocidade de avanço da ferramenta para $U=15V$ e $Q=300l/h$.

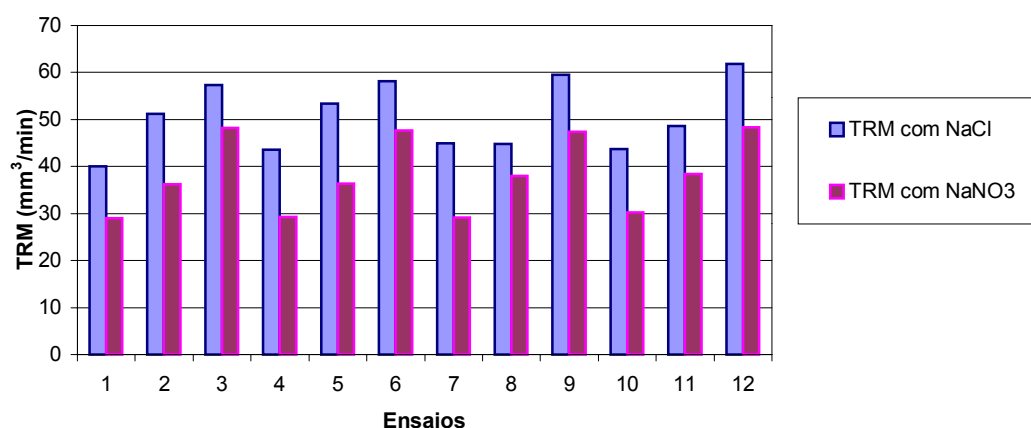


Figura 5. Comparação da TRM com eletrólitos de NaCl e $NaNO_3$.

Sendo o NaCl um eletrólito não passivador e apresentar 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, por exemplo, o NaCl é melhor que o $NaNO_3$.

3.2. Análise da rugosidade média

A Figura (6) mostra uma rugosidade muito alta no caso do NaCl (em relação às demais) na menor velocidade de avanço da ferramenta, porém, para o $NaNO_3$, 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, Datta (1993). O que pode ter acontecido neste ensaio foi o aumento do gap que afetou a eficiência do processo de usinagem eletroquímica, causando a maior rugosidade dos ensaios realizados.

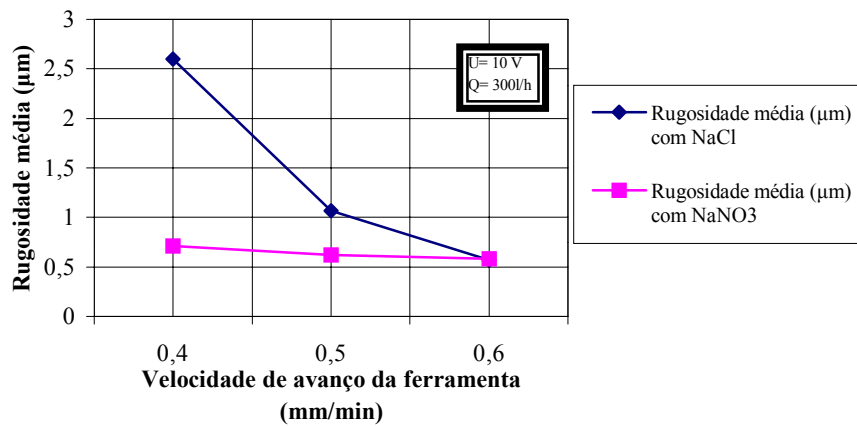


Figura 6. Rugosidade média com NaCl e NaNO₃ em função da velocidade de avanço da ferramenta com U=10V e Q= 300l/h.

Na Figura (7), 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.

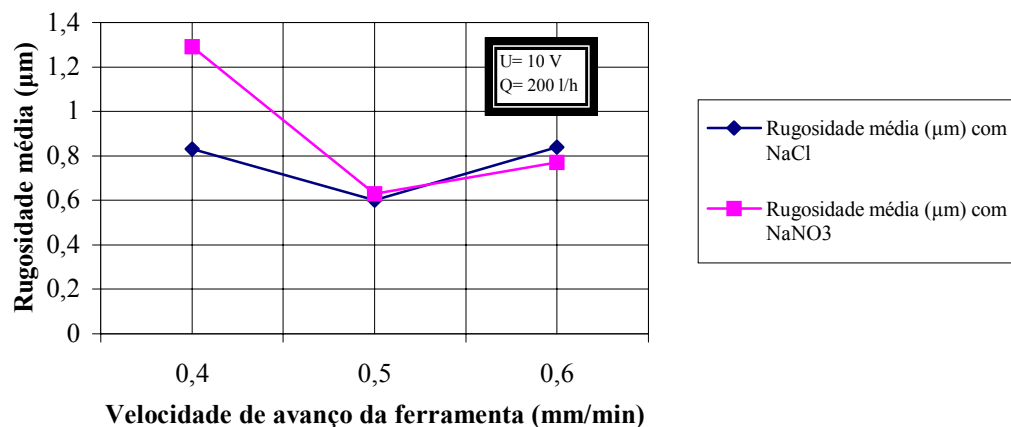


Figura 7. Rugosidade média com NaCl e NaNO₃ em função da velocidade de avanço da ferramenta com U=10V e Q= 200l/h.

No caso da tensão de 15V e vazão de 300l/h os dois eletrólitos apresentaram comportamentos diferentes para rugosidade, conforme mostra a Fig. (8). Isto pode ter ocorrido em função da eficiência de corrente de cada eletrólito.

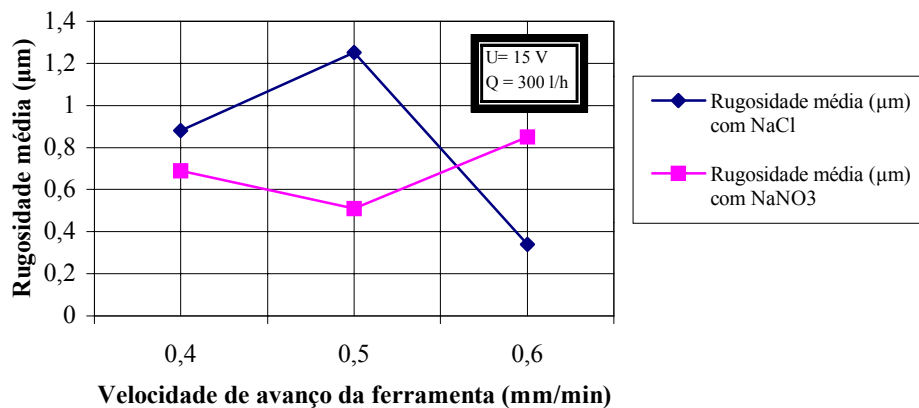


Figura 8. Rugosidade média com NaCl e NaNO_3 em função da velocidade de avanço da ferramenta com $U=15\text{ V}$ e $Q=300\text{ l/h}$.

Em todos os ensaios com NaNO_3 , coincidentemente, a rugosidade média diminuiu da velocidade de avanço da ferramenta de $0,4\text{ mm/min}$ para $0,5\text{ mm/min}$, mas voltou a subir na velocidade de $0,6\text{ mm/min}$. Durante as operações foi muito difícil usinar o material com NaNO_3 . Foram perdidos vários ensaios e várias ferramentas, em função de curtos-circuitos entre a peça e a ferramenta.

Como o NaNO_3 possui baixa eficiência de corrente em função da densidade de corrente, por isso está mais sujeito a curto-circuito. Neste caso, quando a ferramenta movimenta-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 NaNO_3 . Estes resultados podem ser verificados na Fig. (9).

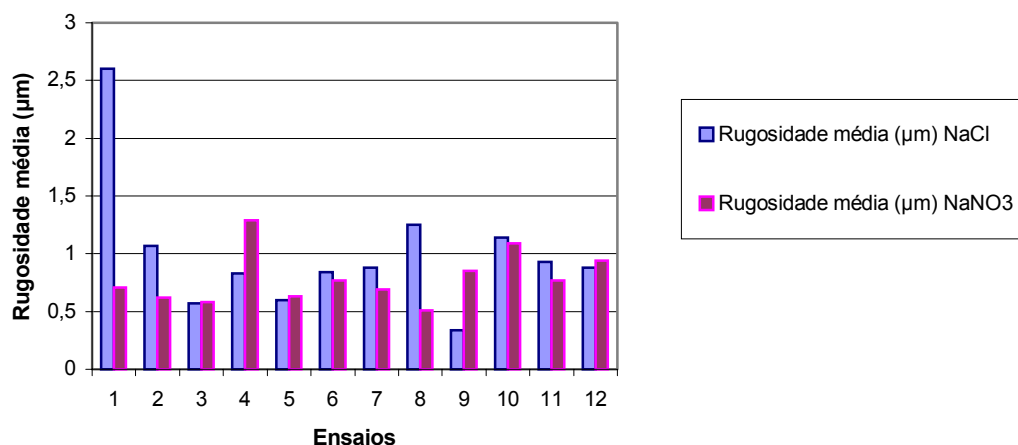


Figura 9. Rugosidade média comparativa com NaCl e NaNO_3 .

4. CONCLUSÕES

- A TRM foi influenciada pela velocidade de avanço da ferramenta na maioria dos casos;
- O NaCl apresentou rugosidade média maior que o NaNO_3 ,
- 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 NaNO_3 ;
- O NaNO_3 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 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, pp.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 Austenítico 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.
- Thusty, J. 2000, “Manufacturing Process and Equipment”, 1st ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, N. Y, (USA).

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

ANALYSIS 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 equipment developed. The electrolytic solutions chloride sodium (NaCl) and nitride sodium (NaNO₃) were used. The results show 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, MRR, Roughness.*