

## TRABALHO 3º COBEF CÓDIGO 011120603

# VARIÁVEIS INTERVENIENTES NA USINAGEM ELETROQUÍMICA

**João Cirilo da Silva Neto** [jcirilo@araxa.cefetmg.br](mailto:jcirilo@araxa.cefetmg.br)

CEFET-MG- Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais-Uned-Araxá  
Av. Amazonas, 807, Bairro São Geraldo, (34)36625457, 38.180.084- Araxá- MG.

**Evaldo Malaquias da Silva** [emalaqui@uniminas.br](mailto:emalaqui@uniminas.br)

UNIMINAS- União Educacional de Minas Gerais S/C Ltda  
Praça Dr. Duarte, 99 Bairro Centro, 38.400.156 (34) 32317700, Uberlândia, MG, Brasil.

**Marcio Bacci da Silva** [mbacci@mecanica.ufu.br](mailto: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 o estudo das variáveis intervenientes na usinagem eletroquímica do aço-válvula SAE XEV-F. Foi utilizado um protótipo desenvolvido na Universidade Federal de Uberlândia. São analisados: a taxa de remoção material (TRM), a rugosidade média e sobrecorte lateral dos furos. Apesar da grande quantidade de variáveis que interfere no processo, somente são estudados 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 NaNO<sub>3</sub>. Cada ensaio foi repetido uma vez. A TRM foi influenciada pela velocidade de avanço da ferramenta na maioria dos casos. As peças usinadas com NaCl apresentaram maior rugosidade média e maior sobrecorte lateral.*

**Palavras-chave:** *Usinagem Eletroquímica, Variáveis Intervenientes, TRM, Rugosidade Média, Sobrecorte Lateral.*

## 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, entre a peça e entre a ferramenta, Denaro<sup>(1)</sup>(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 soluções de cloreto de sódio (NaCl) ou nitrato de sódio (NaNO<sub>3</sub>) 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<sup>(2)</sup> (1987), Malaquias<sup>(3)</sup> (2000) e McGeough<sup>(4)</sup> (1988) e Tlustý<sup>(5)</sup> (2000).

De acordo com König and Klocke<sup>(6)</sup> (1997), há basicamente cinco fontes principais de fatores que interferem na exatidão da peça que são mostradas na Figura 1.

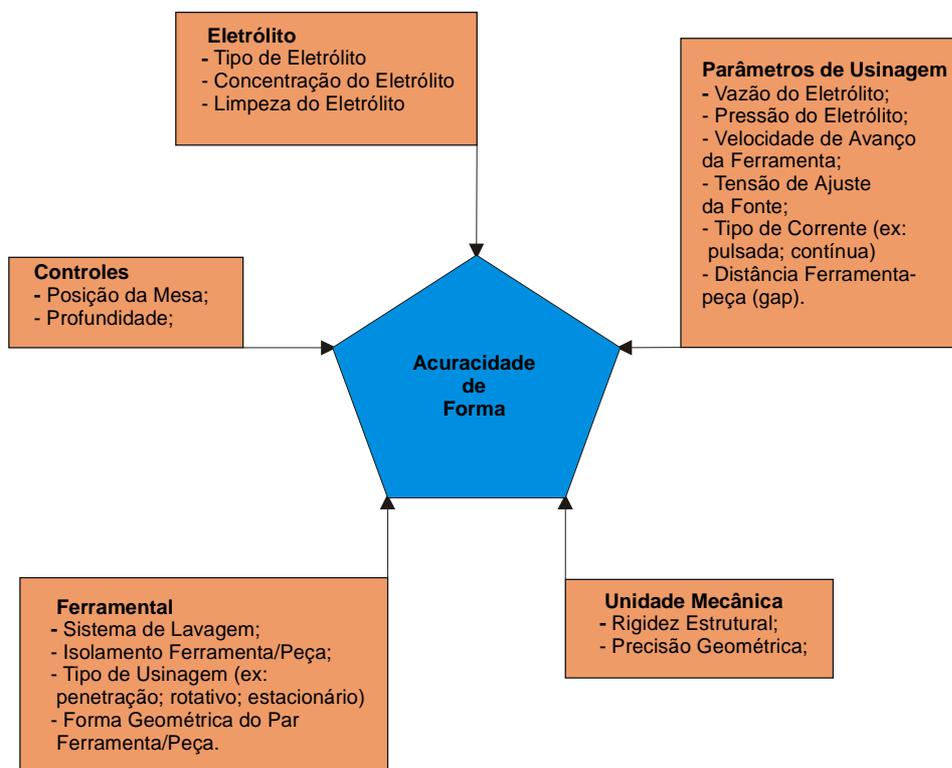


Figura 1 – Fatores intervenientes na exatidão de peças produzidas por usinagem eletroquímica.

O objetivo deste trabalho é estudar a influência das variáveis intervenientes na taxa de remoção de material (TRM), na rugosidade média (Ra) e no sobrecorte lateral 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.

## 2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

No ferramental da Figura 2, pode-se notar a montagem da peça entre duas placas de sacrifício. 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.

O material usinado foi o aço-válvula SAE XEV-F (VV50) 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%.

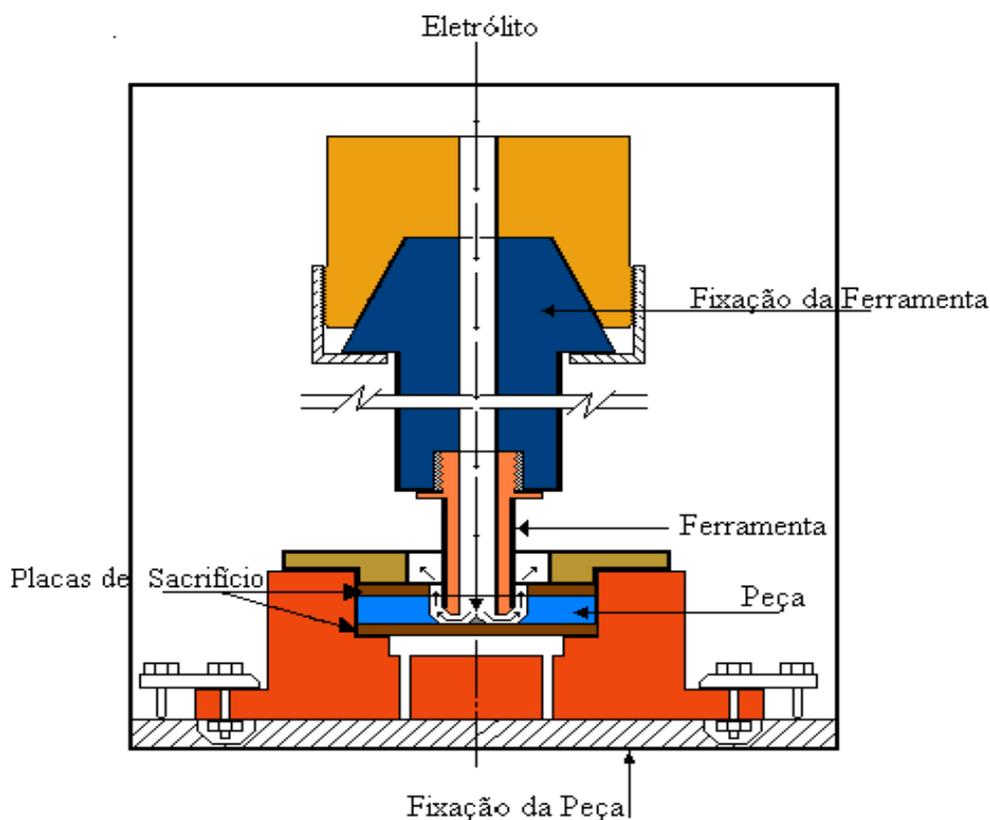


Figura 2. Vista em corte do ferramental de usinagem eletroquímica

As amostras foram preparadas com uma espessura de 6mm. Os eletrólitos utilizados foram o NaCl com 10% de concentração em peso e o NaNO<sub>3</sub> com 25% de concentração em peso (g/l). O aço-válvula foi escolhido para ser usinado porque possui baixa usinabilidade por processo convencional com forte desgaste na ferramenta durante o corte, Barbosa<sup>(7)</sup> (2004). A operação utilizada foi a furação eletroquímica. A Tabela 1 mostra os parâmetros de usinagem eletroquímica do aço-válvula, em que  $v_f$  é velocidade de avanço da ferramenta (mm/min), Q é vazão do eletrólito (L/h) e V é tensão (V).

Tabela 1. Parâmetros de usinagem do aço-válvula, em que foram utilizados eletrólitos de NaCl e NaNO<sub>3</sub>.

Ensaio	$v_f$ (mm/min)	Q (L/h)	V (V)
1	0,4	300	10
2	0,5	300	10
3	0,6	300	10
4	0,4	200	10
5	0,5	200	10
6	0,6	200	10
7	0,4	300	15
8	0,5	300	15
9	0,6	300	15
10	0,4	200	15
11	0,5	200	15
12	0,6	200	15

Para a medição dos diâmetros dos furos foi utilizado um micrômetro Mitutoyo interno com resolução de 1 $\mu$ m. As medidas foram tomadas no centro do furo, observando a perpendicularidade dos contatos do micrômetro.

Para o cálculo da TRM foi utilizada a Equação (1), considerando a densidade do aço-válvula como sendo  $7,8\text{g/cm}^3$ . Nas medições da rugosidade das superfícies laterais do furo foi utilizado um Rugosímetro Mitutoyo modelo Surf test 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;
- $\rho_{ba}$  = massa específica aproximada do aço inoxidável;
- $t_u$  = tempo de usinagem.

O sobre corte lateral (SL) foi calculado utilizando a Equação (2), em que  $D_1$  é o diâmetro na entrada do furo e  $D_f$  é o diâmetro da ferramenta.

$$SL_{entrada} = \frac{D_1 - D_f}{2} \quad (2)$$

Para plotar a Figura 3, utilizou-se os dados provenientes dos ensaios 4, 5 e 6. Da Figura 4, foram utilizados os ensaios 7, 8 e 9. Na Figura 6, temos os ensaios 1, 2 e 3. Na Figura 7, os dados para a confecção do gráfico foram oriundos dos ensaios 4, 5 e 6. Na Figura 8, os ensaios 7, 8 e 9. Na figura 10, foram os ensaios 4, 5 e 6. E, finalmente, na Figura 11, foram utilizados os ensaios 1, 2 e 3.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Análise da TRM

A Tabela 2 mostra os resultados gerais da TRM e da rugosidade média e do sobre corte lateral, quando o aço-válvula foi usinado com um eletrólito de NaCl em uma concentração de 100g/L e  $\text{NaNO}_3$  a 250g/L. Em que T (tempo), TRM (taxa de remoção de material), Ra (rugosidade média) e SL (sobre corte lateral)

Tabela 2. Resultados gerais da TRM e da rugosidade média e do sobre corte lateral.

Ensaio	T (min)	TRM (média) $\text{mm}^3/\text{min}$ com NaCl	Ra ( $\mu\text{m}$ ) com NaCl	TRM (média) $\text{mm}^3/\text{min}$ com $\text{NaNO}_3$	Ra ( $\mu\text{m}$ ) com $\text{NaNO}_3$	SL (mm)	SL (mm)
						com NaCl	Com $\text{NaNO}_3$
1	14,12	40,1	2,60	29,05	0,71	1,076	0,796
2	12,57	51,25	1,07	36,25	0,62	1,235	0,925
3	9,52	57,35	0,57	48,25	0,58	1,040	0,891
4	14,07	43,55	0,83	29,30	1,29	1,195	0,923
5	12,39	53,35	0,60	36,30	0,63	1,174	0,855
6	9,44	58,10	0,84	47,60	0,77	0,892	0,765
7	14,15	44,89	0,88	29,20	0,69	1,307	1,008
8	12,49	44,85	1,25	38,00	0,51	1,494	0,973
9	9,50	59,50	0,34	47,35	0,85	1,216	0,962
10	14,19	43,75	1,14	30,30	1,09	1,300	0,686
11	12,32	48,60	0,93	38,35	0,77	1,355	0,973
12	9,53	61,49	0,88	48,35	0,94	1,235	0,944

O primeiro resultado analisado foi a TRM (em valores médios) utilizando eletrólito de NaCl e NaNO<sub>3</sub>. Neste teste, a tensão da fonte foi mantida em 10V e a vazão do eletrólito em 200L/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.

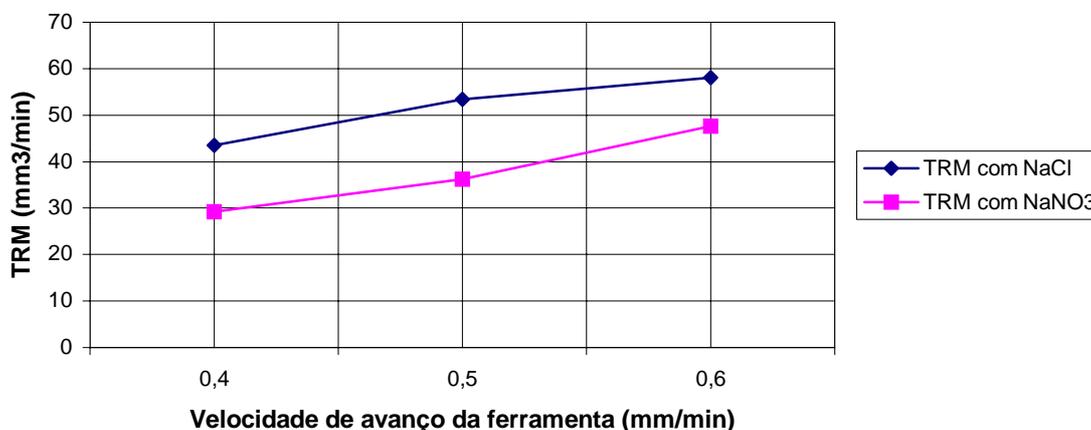


Figura 3. TRM em função da velocidade de avanço da ferramenta para U=10V e Q= 200L/h.

Quando foi utilizada uma vazão de 300L/h, notou-se que a TRM apresentou um comportamento semelhante quando se utilizou uma vazão de 200L/h. Pode-se notar 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 Figura (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-válvula pelo processo de usinagem eletroquímica, pode-se concluir que tanto a usinagem com o NaCl quanto a usinagem com o NaNO<sub>3</sub> 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 NaNO<sub>3</sub>. Este resultado está mostrado na Figura 5. Em todos os ensaios, comparativamente, o NaCl foi melhor que o NaNO<sub>3</sub> em termos de TRM.

Sendo o NaCl um eletrólito não passivador e apresentar eficiência de corrente praticamente constante durante a usinagem, Datta<sup>(8)</sup> (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<sub>3</sub>.

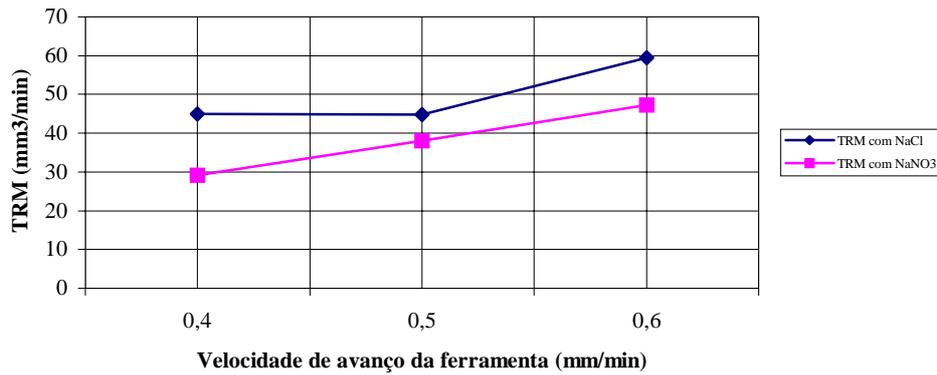


Figura 4. TRM em função da velocidade de avanço da ferramenta para  $U=15V$  e  $Q= 300L/h$ .

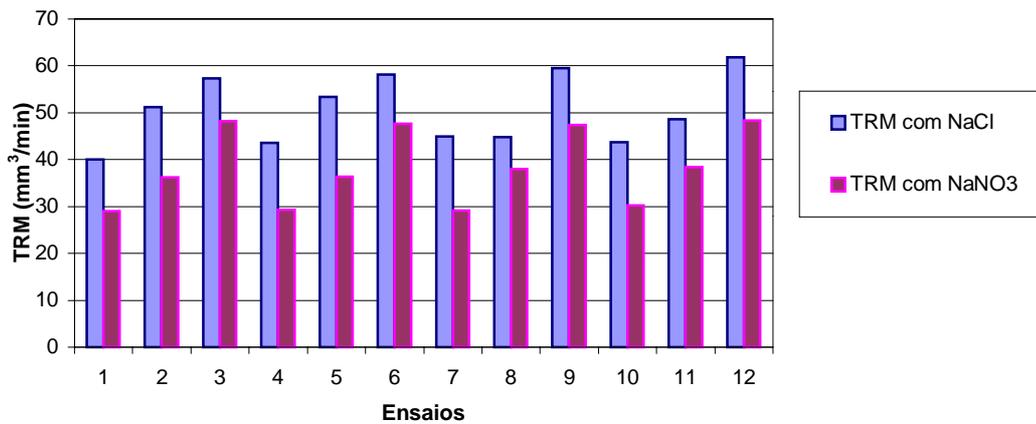


Figura 5. Comparação da TRM com eletrólitos de NaCl e NaNO<sub>3</sub>.

### 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<sub>3</sub>, a rugosidade apresentou tendência de queda em função do aumento da velocidade de avanço. Velocidades muito baixas podem provocar remoção irregular do material.. Isto leva a um aumento do gap e prejudica a remoção do material, Datta<sup>(8)</sup> (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.

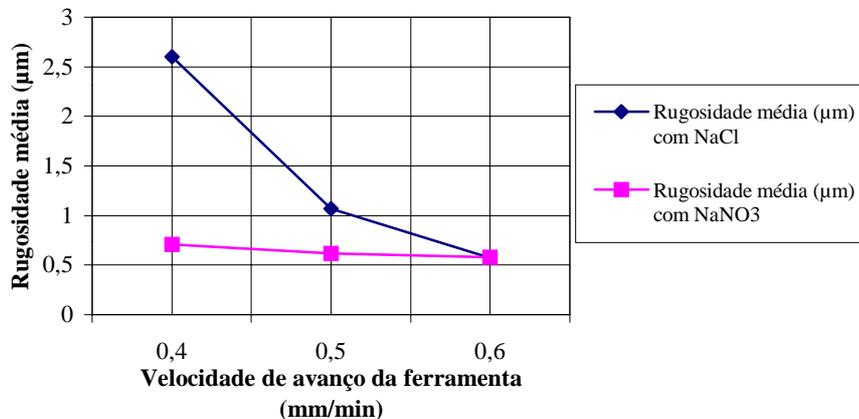


Figura 6. Rugosidade média com NaCl e NaNO<sub>3</sub> em função da velocidade de avanço da ferramenta com  $U=10V$  e  $Q= 300L/h$ .

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  $Q=300\text{L/h}$ ) para o caso do NaCl, mas voltou ao seu valor inicial quando a velocidade foi de 0,6mm/min. Mas para o  $\text{NaNO}_3$  o comportamento foi diferente, ou seja, não voltou à condição inicial.

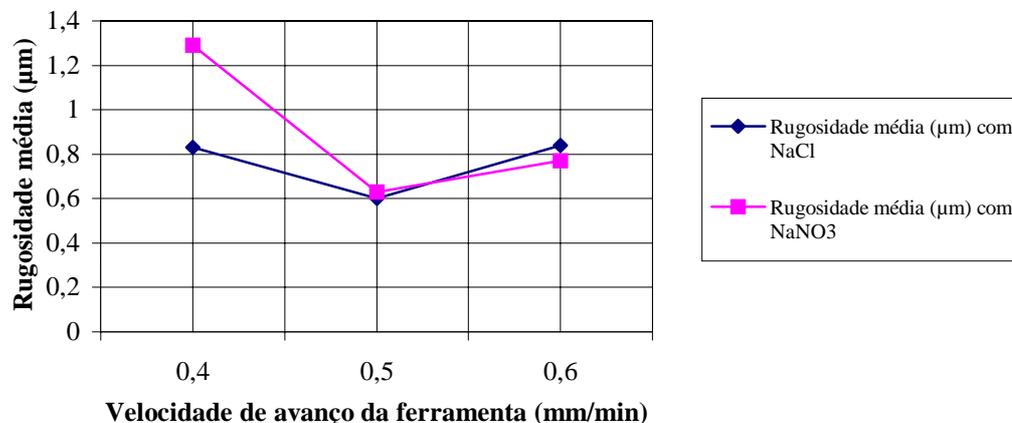


Figura 7. Rugosidade média com NaCl e  $\text{NaNO}_3$  em função da velocidade de avanço da ferramenta com  $U=10\text{V}$  e  $Q=200\text{L/h}$ .

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

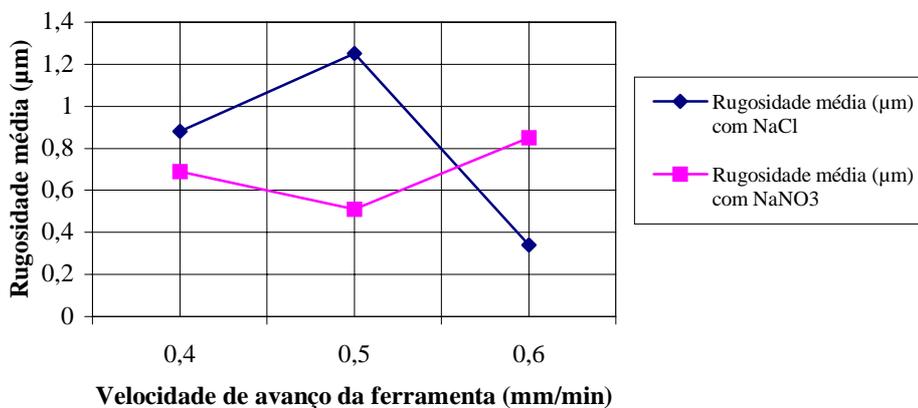


Figura 8. Rugosidade média com NaCl e  $\text{NaNO}_3$  em função da velocidade de avanço da ferramenta com  $U=15\text{V}$  e  $Q=300\text{L/h}$ .

Em todos os ensaios com  $\text{NaNO}_3$ , 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  $\text{NaNO}_3$ . Foram perdidos vários ensaios e várias ferramentas, em função de curtos-circuitos entre a peça e a ferramenta.

Como o  $\text{NaNO}_3$  possui baixa eficiência de corrente em função da densidade de corrente, a usinagem eletroquímica com esse eletrólito está mais sujeita 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<sub>3</sub>. Estes resultados podem ser verificados na Figura 9.

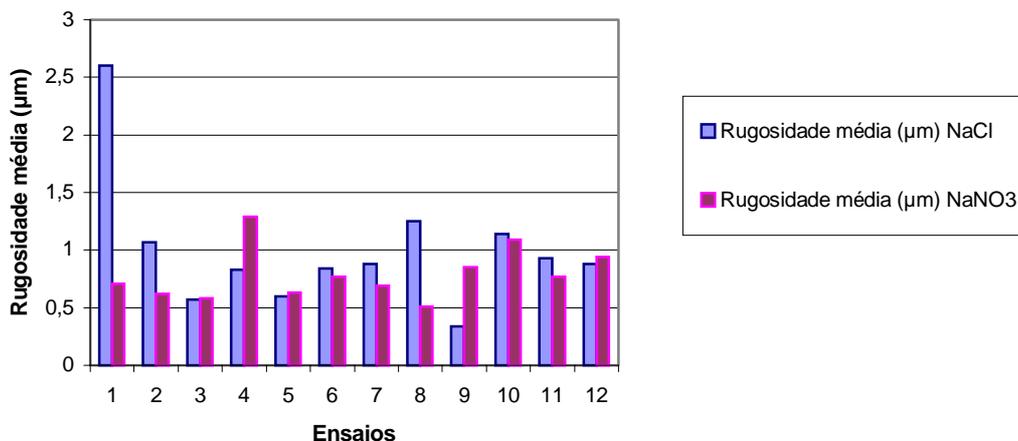


Figura 9. Rugosidade média comparativa com NaCl e NaNO<sub>3</sub>.

### 3.3. Análise do Sobrecorte Lateral

Sendo o sobrecorte lateral (SL) a remoção na lateral do furo, este resultado deve ser o menor possível porque ele representa a quantidade de material removido além das dimensões da ferramenta.

Quando a vazão do eletrólito foi de 200L/h, o sobrecorte lateral teve uma tendência de queda em função do aumento da velocidade de avanço da ferramenta, conforme mostra a Figura 10. Esta tendência pode ser devido à estabilidade da operação, principalmente na velocidade de 0,6mm/min. Houve menor remoção de material nas laterais do furo, o que era esperado em relação à literatura.

No caso da usinagem eletroquímica com NaNO<sub>3</sub>, os valores absolutos são menores que a maioria dos sobrecortes laterais produzidos pelo NaCl. Durante as operações com NaNO<sub>3</sub>, houve bastante dificuldade de usinagem com este tipo de eletrólito. Várias vezes, as operações tiveram que ser interrompidas porque a remoção do material não se processava e ocorreu curto-circuito. Isto pode ter afetado a remoção do material e provocou remoção irregular na lateral do furo.

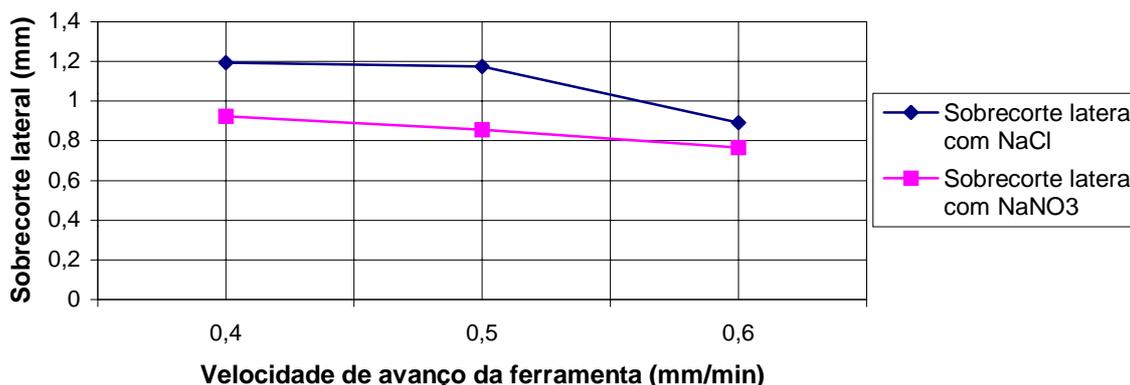


Figura 10 – Sobrecorte lateral em função da velocidade de avanço da ferramenta com NaCl e NaNO<sub>3</sub>, V=10V e Q=200L/h.

Na condição de usinagem com NaCl a 250g/L, tensão de 10V e vazão 300L/h, o sobrecorte lateral apresentou comportamento irregular, aumentou de 0,4mm/min a 0,5mm/min e diminuiu um pouco em 0,6mm/min, conforme mostra a Figura11. Esta tendência também foi verificada para o NaCl, porém com valores absolutos maiores que os valores apresentados com NaNO<sub>3</sub>.

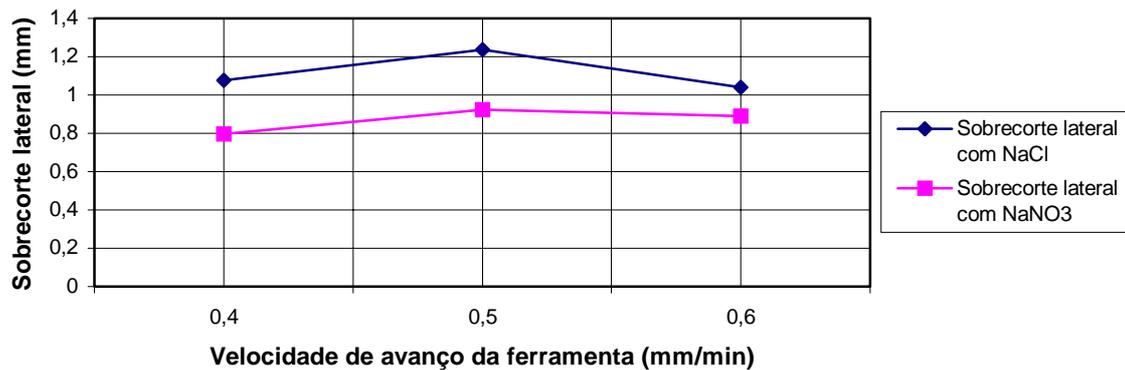


Figura 11. Sobrecorte lateral em função da velocidade de avanço da ferramenta com NaCl e NaNO<sub>3</sub>, V=10V e Q=300L/h.

De acordo com Pandey e Shan<sup>(9)</sup> (1980), a variação da tensão afeta severamente o sobrecorte lateral. A utilização de alta tensão acarreta grande sobrecorte lateral. Normalmente, baixa tensão deve produzir pequeno sobrecorte lateral. Na prática, a dimensão final da peça deve ser controlada em função da tensão. Portanto, para melhor exatidão deve-se ter o mínimo de variação da tensão possível.

#### 4. CONCLUSÕES

- A TRM foi influenciada pela velocidade de avanço da ferramenta na maioria dos casos;
- De maneira geral, não se perceberam maiores variações da TRM quando a tensão da fonte e a vazão do eletrólito foram alteradas;
- O NaCl apresentou rugosidade média maior que o NaNO<sub>3</sub>,
- 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<sub>3</sub>;
- Como o NaNO<sub>3</sub> é um eletrólito passivador, pode haver dificuldade de usinagem eletroquímica, provocando curto-circuito entre a peça e a ferramenta.

#### 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-válvula SAE-XEV-F (VV50)

#### 6. REFERÊNCIAS

1. DENARO, A.R., “Fundamentos de Eletroquímica”, Butterworth & Co-Publishers Ltda, Londres, 1971, 154 pp.
2. BENEDICT, G. F, “Nontraditional Manufacturing Processes-Electrochemical Machining”, Marcel Dekker, New York and Basel, 1987, pp.125 – 172.
3. MALAQUIAS, E., “Contribuição ao Estudo da Usinagem Eletroquímica do Aço Rápido ABNT M2”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2000,141 pp
4. McGEOUGH, J.A. “Advanced Methods of Machining”, Chapman and Hall, London, 1988, pp. 55 - 88.
5. TLUSTY, J. “Manufacturing Process and Equipment”, 1<sup>st</sup> ed., Prentice-Hall, Upter Sadie River, N. Y, (USA), 2000.

6. KÖNIG, W., KLOCKE, F, “Fertigungsverfahren - 3: Abtragen und generieren”. Berlin, Springer, v.3, 1997.
7. BARBOSA, C., Processo de Fabricação de Válvula de Exaustão, Villares Metals S.A., São Paulo, 2004.
8. DATTA, M, “Anodic Dissolution of Metals at High Rates, IBM Journal of Research and Development”, Vol. 37 n° 02, 1993, pp. 207 – 226.
9. PANDEY, P.C. e Shan, H.S., Modern Machining Processes, Tata McGraw Hill, New Delhi, 1980.

## INTERVENING VARIABLES IN ELECTROCHEMICAL MACHINING

**João Cirilo da Silva Neto** [jcirilo@araxa.cefetmg.br](mailto:jcirilo@araxa.cefetmg.br)

Federal Center of Technological Education of Minas Gerais

Av. Amazonas, 807, (34) 36625457, 38.180.084 - Araxá – Minas Gerais, Brazil.

**Evaldo Malaquias da Silva** [emalaqui@uniminas.br](mailto:emalaqui@uniminas.br)

Educational Union of Minas Gerais S/C Ltda

Praça Dr. Duarte, 99, 38.400.156 (34) 32317700, Uberlândia, Minas Gerais, Brazil.

**Marcio Bacci da Silva** [mbacci@mecanica.ufu.br](mailto: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, Minas Gerais, Brazil.

**Abstract.** *This work shows a study of the intervening variables in electrochemical machining of SAE-XEV-F Valve-Steel. A prototype developed at the Federal University of Uberlândia was used. The material removal rate (MRR), roughness and overcut 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 (NaNO<sub>3</sub>) 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 and overcut.*

**Keywords:** *Electrochemical Machining, Intervening Variables, MRR, Roughness, Overcut.*