

TRABALHO COBEF 2007 CÓDIGO 011065195

## ANÁLISE DA RUGOSIDADE MÉDIA ARITMÉTICA PRODUZIDA PELA USINAGEM ELETROQUÍMICA DO AÇO-VÁLVULA

**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.** *O objetivo deste trabalho é mostrar o comportamento da rugosidade aritmética média durante a usinagem eletroquímica do aço-válvula SAE XEV-F. Nos ensaios experimentais, foi utilizado um protótipo desenvolvido na Universidade Federal de Uberlândia. Apesar da grande quantidade de variáveis que pode interferir no processo, neste trabalho 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 cloreto de sódio (NaCl) e nitrato de sódio (NaNO<sub>3</sub>). De forma geral, as peças usinadas com NaCl apresentaram maior rugosidade média aritmética quando comparadas com as usinadas com NaNO<sub>3</sub>.*

**Palavras-chave:** *Usinagem Eletroquímica, Rugosidade Média Aritmética, Aço-Válvula.*

### 1. INTRODUÇÃO

Usinagem eletroquímica (ElectroChemical Machining-ECM em inglês ) é um processo não tradicional de usinagem que tem grande aplicação em materiais de baixa usinabilidade, como materiais que possuem alta dureza ou alta resistência ao cisalhamento.

Neste processo a remoção de material é feita através da eletrólise. Para que ocorra a remoção do material é necessário que se tenha cátodo e ânodo alimentados por uma fonte de corrente e um eletrólito.

O eletrólito usado, normalmente, é uma salmoura. A diferença de potencial (ddp) existente entre a peça e a ferramenta faz com que uma corrente elétrica circule, sendo que o eletrólito fecha o circuito entre a peça (ânodo) e a ferramenta (cátodo). A passagem de corrente através do eletrólito é acompanhada de uma transferência de massa, os cátions se movimentam em direção ao cátodo, e os ânions em direção ao ânodo, Benedict (1987) e McGeough (1989). Na interface metal-eletrólito, ocorre a oxidação do ânodo com conseqüente transferência dos átomos do metal, na forma de íons, para o eletrólito. Para este sistema funcionar, a corrente elétrica deve ser da ordem de ampères, e a distância entre a peça e a ferramenta varia de centésimo a décimos de milímetros.

Durante a usinagem, a distância (*gap*) entre a peça e a ferramenta tende a aumentar devido a remoção de material da peça. Para que essa distância não aumente, a ferramenta é acionada por um motor e ela se avança na direção da peça enquanto a usinagem ocorre.

Teoricamente não haveria desgaste da ferramenta nesse processo, já que esta não precisa encostar-se à peça para que se ocorra a usinagem, no entanto, se a distância entre elas for muito pequena, pode acontecer um contato indesejado entre as mesmas. Quando isso ocorre tem-se um curto-circuito, que provoca desgaste tanto da peça quanto da ferramenta e pode afetar a rugosidade da peça.

O objetivo deste trabalho é apresentar o estudo da rugosidade média aritmética durante o processo de usinagem eletroquímica do aço-válvula SAE XEV-F. Como eletrólitos, foram utilizados o NaCl e o NaNO<sub>3</sub>. As peças usinadas com NaCl apresentaram maior rugosidade média aritmética quando comparadas com as peças usinadas com NaNO<sub>3</sub>.

## 2. FUNDAMENTOS DE USINAGEM ELETROQUÍMICA

No 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.

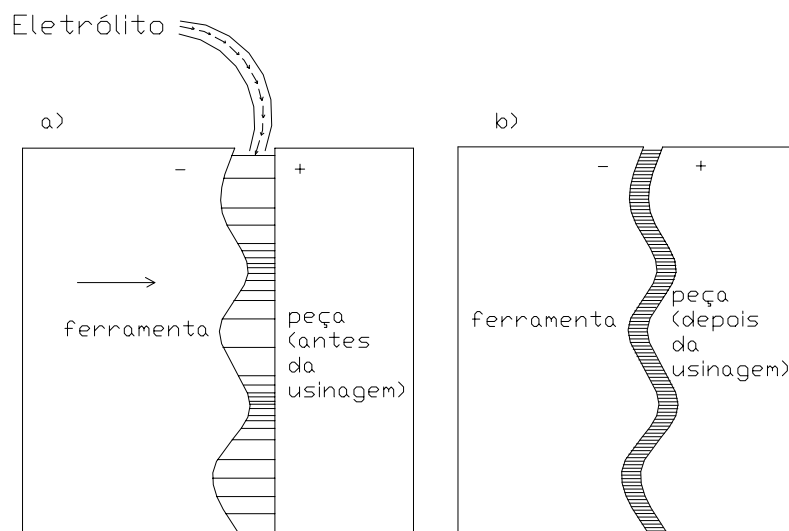


Figura 1(a). Peça antes da usinagem eletroquímica; 1(b) Peça após a usinagem eletroquímica, Tlustty (2000).

A Figura 2 mostra o esquema simplificado do mecanismo de avanço da ferramenta de um equipamento de usinagem eletroquímica, que propicia a remoção do material da peça. O avanço ou recuo (descida ou subida) do sistema é feito pela rotação do motor acoplado (acionado pelo drive) ao redutor (sem-fim-coroa) que movimenta a ferramenta. Na presença do eletrólito e tensão entre pólos (peça e ferramenta) e com a aproximação destas, ocorre a dissolução da peça. Durante a usinagem eletroquímica, o eletrólito deve ser filtrado para não prejudicar o acabamento da peça.

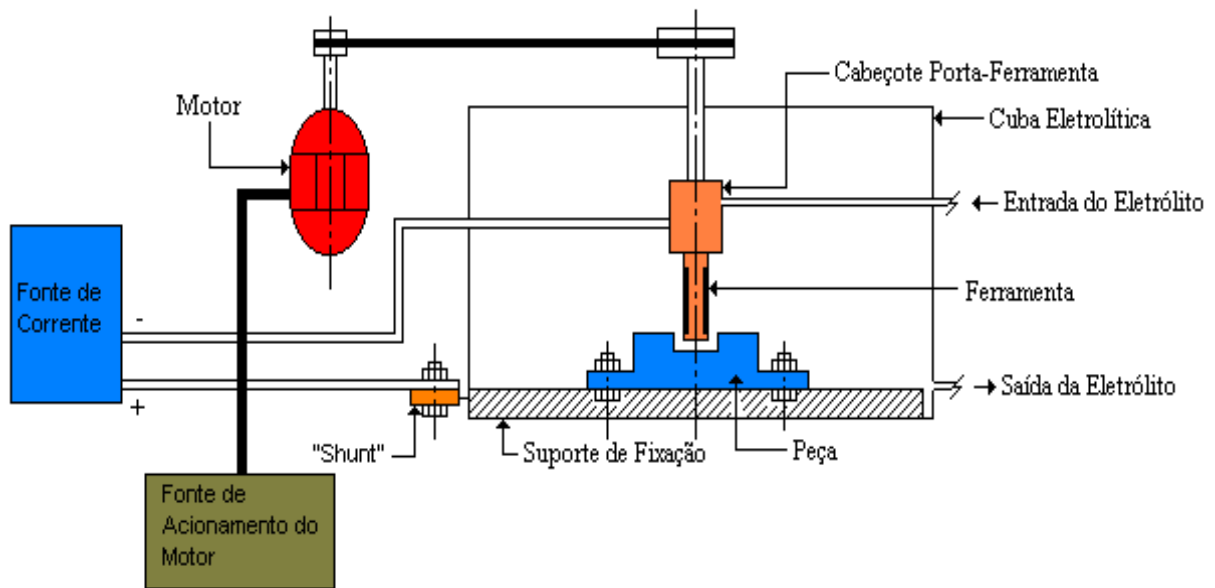


Figura 2. Esquema simplificado do mecanismo de avanço da ferramenta de um equipamento de usinagem eletroquímica.

### 3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A Figura 3 mostra o equipamento de usinagem eletroquímica desenvolvido na UFU e utilizado na execução dos ensaios, **Malaquias (2000)**. Na usinagem, a peça que é o aço-válvula com composição química mostrada na Tabela 1 é fixada na cuba eletrolítica e a ferramenta (na qual circula o eletrólito) é presa no cabeçote porta-ferramenta e desce com velocidade constante na direção da peça. A ferramenta não toca na peça e a remoção do material ocorre através das reações eletroquímicas entre o eletrólito, a peça e a ferramenta (pólos: positivo e negativo respectivamente).

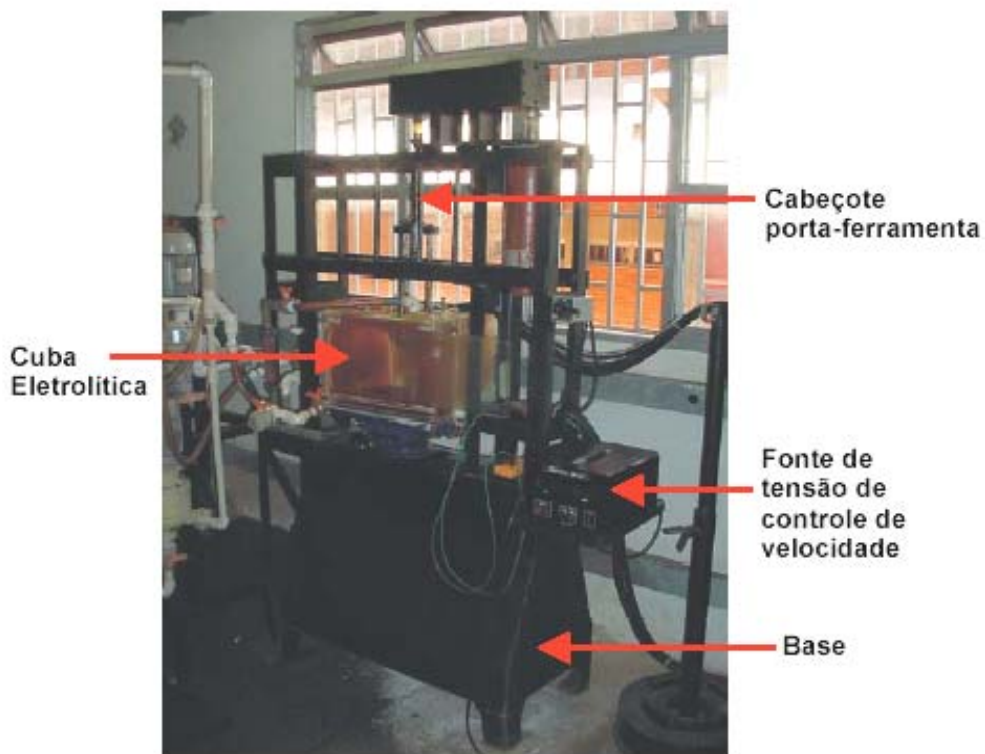


Figura 3. Vista principal do equipamento de usinagem eletroquímica desenvolvido na UFU.

A ferramenta foi fabricada em cobre eletrolítico com diâmetro externo de 8,6mm, diâmetro interno de 3mm e comprimento de 70mm. Sua lateral foi revestida com um isolante fabricado em tecnil (Nylon comercial) com 0,20mm de espessura. A Figura 4(a) à esquerda mostra a ferramenta utilizada nos ensaios definitivos de usinagem eletroquímica, mas sem isolamento. O suporte para fixação da peça, Figura 4(b) à direita foi fabricado, principalmente, em aço inoxidável ABNT 304 com tampa de latão para resistir à corrosão do eletrólito.



Figura 4. (a) Ferramenta de usinagem eletroquímica (sem isolamento) utilizada nos ensaios (à esquerda). (b) Suporte para fixação da peça (à direita), Silva Neto (2005).

Tabela 1 – Composição química do aço-válvula

Elemento	Composição Química
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%

A Tabela 2 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).

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 interna do furo, com um cut-off igual a 0,8 mm. O aço-válvula foi escolhido para ser usinado porque possui baixa usinabilidade por processo convencional com forte desgaste na ferramenta durante o corte, Barbosa (2004). As amostras foram preparadas com uma espessura de 6mm e diâmetro de 19mm, conforme esquema da Figura 5.



Figura 5. Esquema simplificado da amostra utilizada na usinagem eletroquímica.

Tabela 2. Parâmetros de usinagem do aço-válvula, em que foram utilizados eletrólitos de NaCl e NaNO<sub>3</sub>.

Ensaio	v <sub>f</sub> (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

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 mostra os resultados gerais da rugosidade média aritmética e da densidade de corrente durante a usinagem eletroquímica do aço-válvula. Foram realizados quarenta e oito experimentos, sendo vinte e quatro com cada eletrólito de cloreto de sódio (NaCl) e nitrato de sódio (NaNO<sub>3</sub>). O tempo de usinagem (T) foi determinado em função do percurso da ferramenta relativo à espessura da amostra. A densidade de corrente (A/cm<sup>2</sup>) foi calculada da relação entre a intensidade de corrente gerada durante a operação pela área da seção da ferramenta, Rumyantsev and Davydov (1989).

Tabela 3. Resultados gerais da rugosidade média aritmética e densidade de corrente.

Ensaio	T (min)	Ra (μm)		Densidade de Corrente (A/cm <sup>2</sup> )	
		com NaCl	com NaNO <sub>3</sub>	NaCl	NaNO <sub>3</sub>
1	14,12	2,60	0,71	38,581	57,183
2	12,57	1,07	0,62	55,116	91,631
3	9,52	0,57	0,58	62,006	95,765
4	14,07	0,83	1,29	39,959	67,517
5	12,39	0,60	0,63	51,671	89,564
6	9,44	0,84	0,77	59,250	92,320
7	14,15	0,88	0,69	44,782	79,919
8	12,49	1,25	0,51	56,494	96,454
9	9,50	0,34	0,85	62,006	87,497
10	14,19	1,14	1,09	49,605	108,855
11	12,32	0,93	0,77	55,116	89,564
12	9,53	0,88	0,94	100,725	100,588

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. 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.

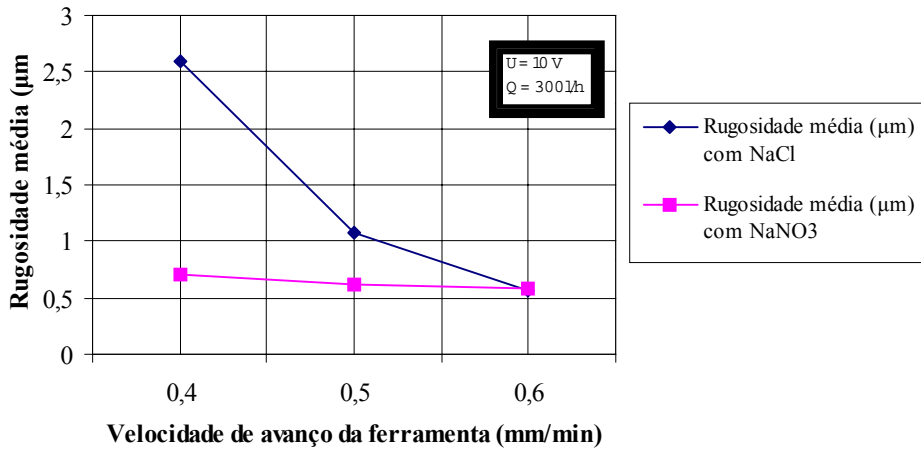


Figura 6. Rugosidade média aritmética com NaCl e NaNO<sub>3</sub> em função da velocidade de avanço da ferramenta com  $U=10\text{V}$  e  $Q= 300\text{l/h}$ .

Por outro lado, a dissolução anódica, ou seja, a passagem de átomos do metal do ânodo para o eletrólito, é favorecida em condições específicas, tais como: pequena distância entre a ferramenta e a peça, altos valores da densidade de corrente e da velocidade do eletrólito na região de usinagem. De acordo com Kozak et al. (1995b), estes fatores podem proporcionar excelente acabamento das superfícies usinadas. No caso das Figuras 7 e 8, o aumento da densidade de corrente acarretou a diminuição a rugosidade média aritmética para os dois eletrólitos. Portanto, isto pode explicar redução da rugosidade média aritmética, pois houve aumento da eficiência de corrente com os dois eletrólitos.

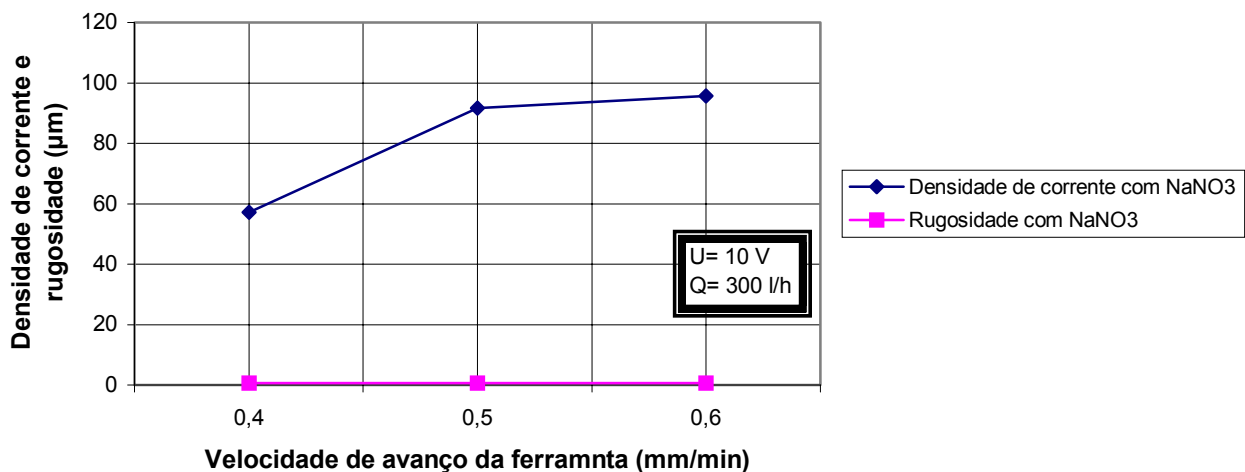


Figura 7. Rugosidade média aritmética em função da densidade de corrente com NaNO<sub>3</sub>.

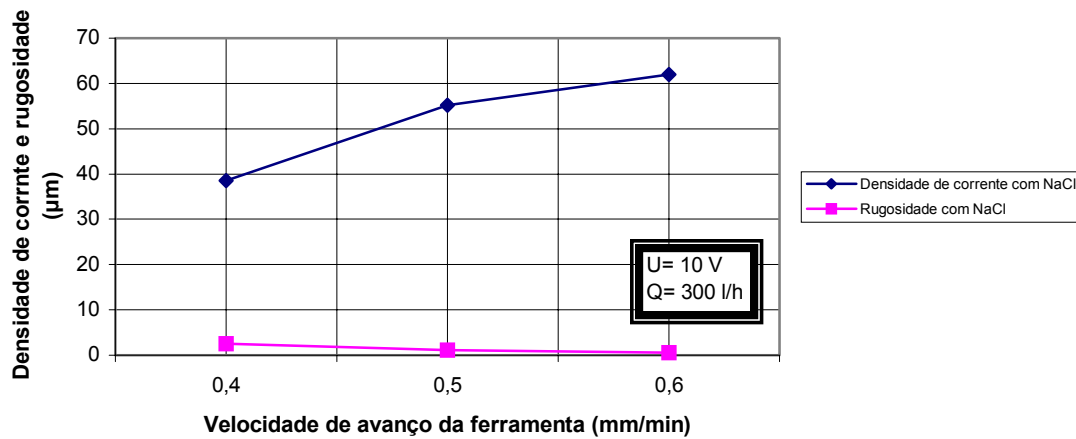


Figura 8. Rugosidade média aritmética em função da densidade de corrente com NaCl.

Na Figura (9), reduzindo a vazão, a rugosidade média aritmética 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. Esperava-se, portanto, a redução proporcional da rugosidade média aritmética em relação ao aumento da velocidade da ferramenta, mas não ocorreu. Isso pode ser devido à combinação de vários fatores, como por exemplo, a restrição da passagem do eletrólito na interface peça-ferramenta. Com diminuição da vazão do eletrólito, em determinados instantes da usinagem eletroquímica, reduz-se a transferência de átomos da peça para o eletrólito e pode ocorrer remoção irregular de material da peça.

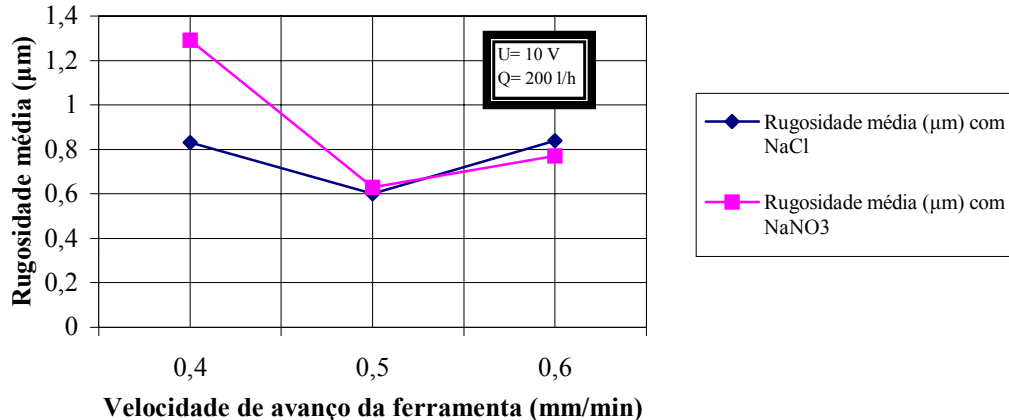


Figura 9. Rugosidade média aritmética com NaCl e  $\text{NaNO}_3$  em função da velocidade de avanço da ferramenta com  $U=10\text{V}$  e  $Q=200\text{l/h}$ .

Quando é feita uma análise comparativa da densidade de corrente dos dois eletrólitos, conforme apresenta a Figura 10, observa-se que na maioria dos casos o  $\text{NaNO}_3$  apresentou densidade de corrente maior que o NaCl. De maneira geral, este resultado confirma os estudos feitos por Datta et al (1996) no que diz respeito aos dois eletrólitos, ou seja, sendo o NaCl um eletrólito não passivador (não se formam filmes de proteção na superfície da peça durante a usinagem) podem ocorrer remoções irregulares na lateral do furo e isso afeta o acabamento superficial da peça. Além disso, podem ocorrer curto-circuito e remoções irregulares na lateral do furo, provocando o aumento da rugosidade média aritmética em determinadas condições de usinagem. Conseqüentemente, com maior densidade de corrente pode ocorrer menor rugosidade média aritmética.

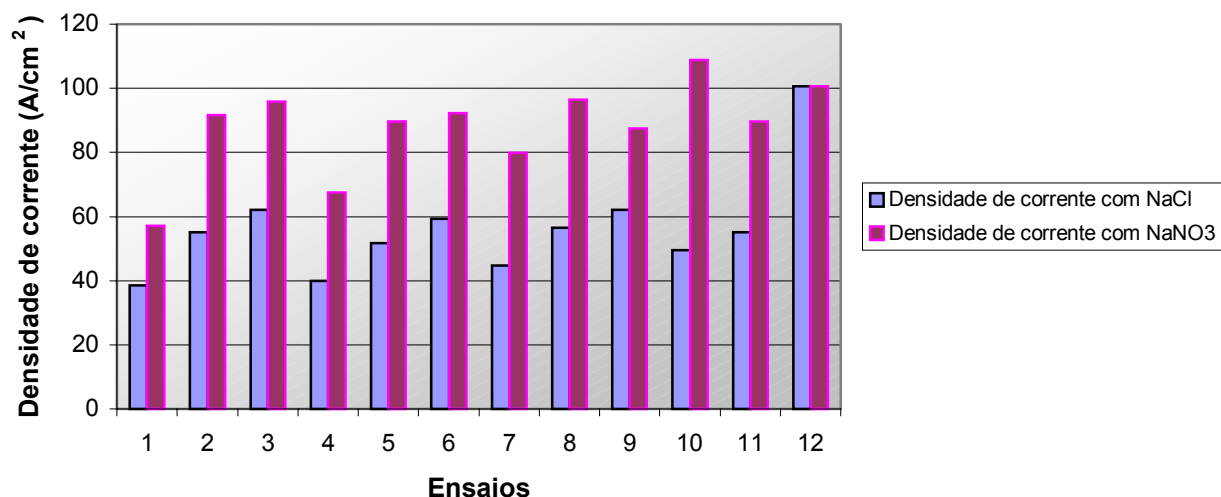


Figura 10. Densidade de corrente com eletrólitos de NaCl e NaNO<sub>3</sub>.

Finalmente, quando foi feito um estudo comparativo da rugosidade média aritmética entre os dois eletrólitos, verificou-se que em 58% dos ensaios realizados, o NaCl apresentou rugosidade média aritmética maior que o NaNO<sub>3</sub>. Estes resultados podem ser verificados na Figura 11.

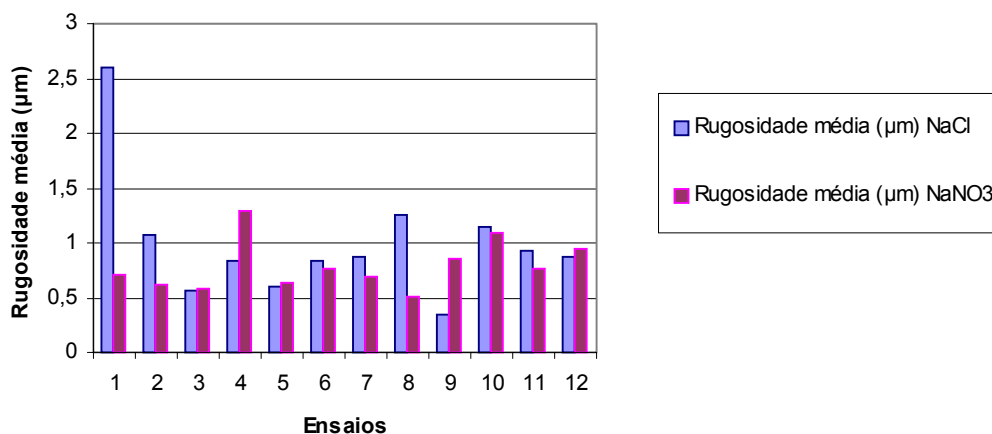


Figura 11. Rugosidade média aritmética comparativa com NaCl e NaNO<sub>3</sub>.

## 5. CONCLUSÕES

- O NaCl apresentou rugosidade média aritmética maior que o NaNO<sub>3</sub>,
- Na maioria dos casos o NaNO<sub>3</sub> apresentou densidade de corrente maior que o NaCl.
- Sendo o NaCl um eletrólito não passivador, durante a usinagem com esse eletrólito pode ocorrer curto-circuito entre a peça e a ferramenta que pode afetar o acabamento superficial da peça usinada.
- A vazão do eletrólito pode influenciar na usinagem eletroquímica.



## 6. 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.

## 7. REFERÊNCIAS

BENEDICT, G. F., 1987, **Nontraditional Manufacturing Processes-Electrochemical Machining**, Marcel Dekker, New York and Basel, pp.125 – 172.

BARBOSA, C., 2004, **Processo de Fabricação de Válvula de Exaustão**, Villares Metals S.A., São Paulo.

DATTA, M., 1993, **Anodic Dissolution of Metals at High Rates**, *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 37 n° 02, pp. 207 – 226.

DATTA, M., SHENOY, R.V. e ROMANKIN, L.T., 1996; **Rt Advances in the Study of Electrochemical Micromachining**, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 118, pp. 29 – 36.

KOZAK, J., DABROWSKI, L., LUBKOWSKI, K. e ROZENEK, M., 1995b; **The Effect of Electrochemical Dissolution Characteristics on Shape Accuracy in ECM**, *International Symposium for Electromachining*, Lousanne, pp. 511 – 519.

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.

RUMYANTSEV, E. e DAVYDOV, A., 1989; **Electrochemical Machining of Metals**, Mir Publishers, Moscou, 168 pp.

SILVA NETO, J. C, **Variáveis Intervenientes na Usinagem Eletroquímica**, 3° COBEF, Joinville, SC, 2005.

TLUSTY, J. 2000, **Manufacturing Process and Equipment**, 1<sup>st</sup> ed., Prentice-Hall, Upter Sadie River, N. Y, (USA).

## 8. DIREITOS AUTORAIS

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

## ANALYSIS OF THE ROUGHNESS AVERAGE IN ELECTROCHEMICAL MACHINING OF VALVE-STEEL.

**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  
38.180-084, Araxá, MG, 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, 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, MG, Brazil.

**Abstract.** *This work shows a study of the roughness average in electrochemical machining of SAE-XEV-F Valve-Steel. A prototype developed at the Federal University of Uberlândia was used. 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 electrochemical machining with electrolytic solutions chloride sodium presented high roughness.*

**Keywords:** *Electrochemical Machining, Roughness, Valve-Steel.*