

As barras de aço rápido que apresentaram os melhores resultados, para cada sal utilizado, podem ser visto na Figura 5.



Figura 5. Barras de aço rápido ABNT M2 após a usinagem.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitem dizer que, na usinagem eletroquímica do aço rápido ABNT M2, a taxa de remoção de material foi pouco influenciada pela variação do pH das soluções. Além disso, os resultados obtidos até o momento, mostram que soluções em pH básico apresentaram desempenho levemente superior às soluções ácidas, tanto em termos de precisão quanto com relação a ocorrência de pequenas descargas e instabilidade da corrente durante a usinagem. Estes resultados não devem ser extrapolados para outros materiais com composições diferentes pois, a influência do pH está diretamente ligada à eficiência da dissolução anódica, ou seja, no melhor ou pior desempenho do eletrólito na oxidação do anodo.

REFERÊNCIAS

- Benedict, G. F., 1987; *Nontraditional Manufacturing Processes*, New York, Marcel Dekker.
- Datta, M., Shenoy, R. T. & Romankiw, L. T., 1996; *Recent Advances in the Study of Electrochemical Micromachining*, Journal of Engineering for Industry, fevereiro, vol. 118, pp. 29-36.
- 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; *Elementary Electrochemistry*, Butterworth & Co(Publishers) Ltd., Londres, pp. 154.
- Malaquias, E., 1996; *Contribuição para o Desenvolvimento de um Protótipo de um Equipamento de Usinagem Eletroquímica*. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, pp. 79.
- Malaquias, E., Cruz, C. & Pelizer, M. C., 1998; *Aspectos Tecnológicos Relacionados com o Revestimento Isolante de Ferramentas Eletroquímicas*, V Congresso Norte-Nordeste de Engenharia Mecânica, Fortaleza.
- Pelizer, M. C., 1997; *Estudo da Influência do Ferramental na Acuracidade de Peças de Aço ABNT M2, Obtidas por Usinagem Eletroquímica*, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, pp. 81.
- Rumyantsev, E. & Davydov, A., 1989; *Electrochemical Machining of Metals*, Mir Publishers, Moscow.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de usinagem em barras de aço rápido ABNT M2.

	Cloreto de Sódio a 100g/L (NaCl)			Nitrato de Sódio a 300g/L (NaNO ₃)		
	pH = 2,27	pH = 7,03	pH = 9,21	pH = 2,22	pH = 7,25	pH = 9,37
Densidade de Corrente (A/cm ²)	30	33	31	39	41	38
Sobrecorte Lateral entrada (mm)	0,47	0,63	0,60	0,55	0,41	0,43
Sobrecorte Lateral saída (mm)	0,37	0,61	0,59	0,53	0,50	0,44
Conicidade (mm/m)	9,6	1,5	0,2	1,9	-9,0	-1,5
Taxa de Remoção de Material (mm ³ /min)	38,47	36,14	36,61	52,40	52,01	51,66

Analisando os dados apresentados na Tabela 2, percebe-se que os resultados obtidos com o NaNO₃, quando comparados ao NaCl, apresentaram desvios menores quanto a forma, tanto no sobrecorte lateral como para a conicidade. Isto ocorre devido ao fato de que soluções eletrolíticas de NaCl oxidam o anodo (peça) mesmo em baixas densidades de corrente (vide análise da Figura 2), possibilitando desta forma uma retirada maior de material nas laterais dos furos. Outra observação importante é que para o caso da usinagem com o nitrato em soluções de pH neutro (7,25) e básico (9,37), os valores de conicidade apareceram negativos, mostrando que o diâmetro de saída foi maior que o diâmetro de entrada. Estes resultados podem ser explicados através da análise da taxa de remoção de material (vide Tabela 2). As soluções eletrolíticas de NaNO₃ apresentaram taxas de remoção maiores que aquelas de NaCl, proporcionando desta forma uma retirada excessiva de material na saída do *bit*, ou seja, neste caso o tempo de usinagem poderia ser menor. Normalmente, soluções eletrolíticas de cloreto de sódio apresentam taxa de remoção de material superiores, o que contrasta com os valores encontrados nos ensaios. O que possibilitou essas discrepâncias foi a diferença de concentração utilizada nas soluções (100 e 300 g/L para o NaCl e NaNO₃, respectivamente). Quanto maior a concentração, maior será o número de íons presente na solução proporcionando um fluxo de elétrons mais intenso aumentando a oxidação do anodo.

A variação do pH, tanto na usinagem com o NaCl como com o NaNO₃, não apresentou alterações significativas na taxa de remoção de material. Conforme pode ser visto na Tabela 2, as maiores diferenças percentuais foram em torno de 5% a mais para o NaCl (no caso de pH = 2,27) e 0,8% para o NaNO₃ (no caso de pH = 2,22). Isso se deve ao fato de que, em todas as condições utilizadas, a usinagem ocorreu em potenciais elevados (10V), dentro da região de transpassivação (vide Figura 1).

Os melhores resultados com relação ao sobrecorte lateral, na usinagem com o NaCl, foram obtidos com pH 2,27. Já em termos de conicidade, pH iguais a 7,03 e 9,21 tiveram melhores desempenho. No caso da usinagem com NaNO₃, os melhores resultados tanto para conicidade como sobrecorte lateral foram obtidos com pH igual a 9,37.

Além dos resultados apresentados, deve-se ressaltar que a liga usinada (aço ABNT M2) apresenta em sua composição os elementos químicos tungstênio e molibdênio, no qual a dissolução anódica é favorecida em pH alcalinos. Outro aspecto importante observado, em soluções com pH ácidos, foi a ocorrência de pequenas descargas elétricas e grande instabilidade da corrente durante a usinagem. Além destes problemas operacionais, as peças usinadas com eletrólitos ácidos sofreram efeito corrosivo em maior proporção, posteriormente à usinagem.

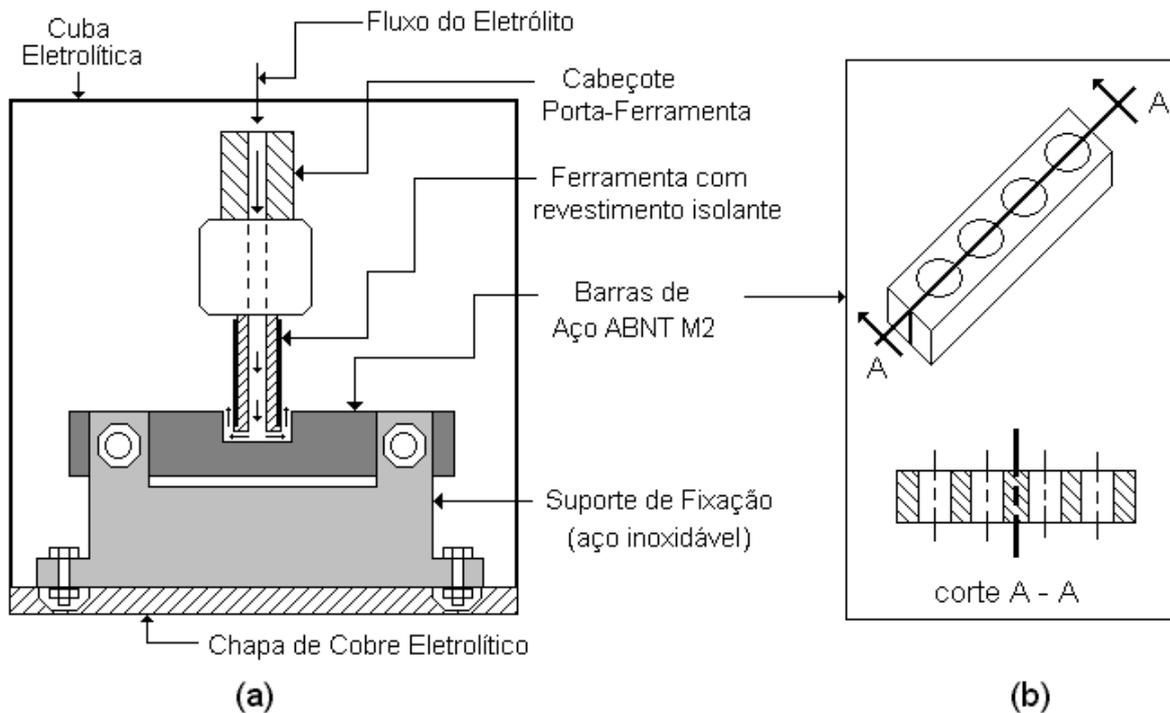


Figura 4. Esquema da cuba eletrolítica com: (a) o ferramental utilizado nos ensaios de usinagem e (b) a vista superior do perfil usinado em barras de aço rápido ABNT M2.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

A primeira etapa dos experimentos foi a realização de ensaios preliminares com o objetivo de selecionar os parâmetros de corte adequados para a realização dos ensaios nas condições desejadas. A Tabela 1 apresenta os valores adquiridos ao final desta fase, que posteriormente foram utilizados nos ensaios definitivos.

Tabela 1. Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de usinagem do aço ABNT M2.

Tensão da Fonte	10 V	Pressão do Eletrólito	0,2 MPa
Velocidade de Avanço	0,45 mm/min	Vazão do Eletrólito	150 L/h
Distância Ferramenta-Peça	0,2 mm	Tempo de Usinagem	21 min

Durante os ensaios preliminares, houve a preocupação de que os parâmetros escolhidos possibilitassem a realização dos ensaios em todas as condições (soluções eletrolíticas e pH) sem a presença de curto-circuito durante a usinagem, possibilitando desta forma a manutenção destas condições de corte nas diferentes composições do eletrólito.

Após a definição dos parâmetros, foram realizados os ensaios definitivos. Antes de cada ensaio, o eletrólito nos dois reservatórios permanecia limpo, livre dos resíduos da etapa anterior.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos durante os ensaios de usinagem. Os valores apresentados equivalem à média de quatro furos obtidos para cada condição preestabelecida.

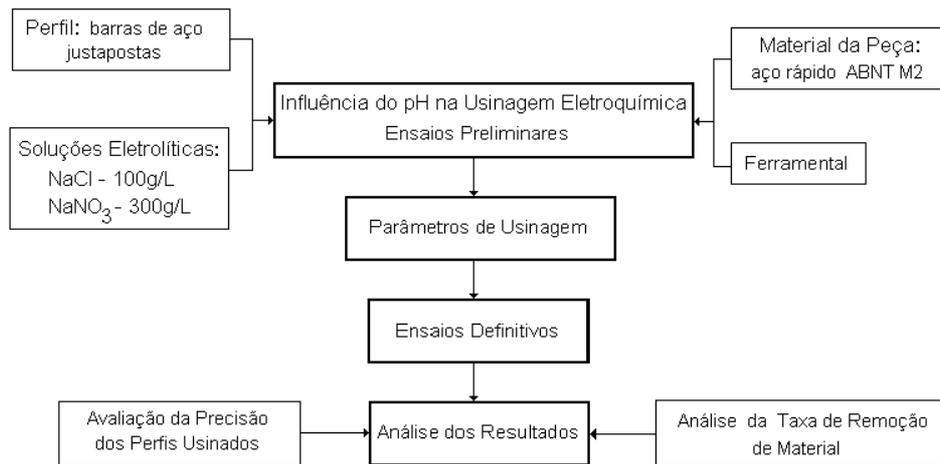


Figura 3. Digrama esquemático da metodologia utilizada no trabalho.

Na primeira etapa foram realizados vários ensaios preliminares a fim de relacionar os parâmetros a serem utilizados nos ensaios definitivos. Os testes foram feitos em barras (também chamados de *bits*) de aço rápido ABNT M2 (9,5x9,5x127mm) com a seguinte composição: Fe \approx 82,15%; C \approx 0,85%; Cr \approx 4%; V \approx 2%; W \approx 6% e Mo \approx 5%. Este aço é muito utilizado na fabricação de ferramentas de corte.

Ainda nesta fase, foram definidas as soluções eletrolíticas. Os eletrólitos utilizados foram: solução aquosa de NaCl (100 gramas de sal por litro de água) com diferentes valores de pH (2,27; 7,03 e 9,21) e solução aquosa de NaNO₃ (300 gramas de sal por litro de água) também com diferentes valores de pH (2,22; 7,25 e 9,37). Os valores de pH foram obtidos utilizando um pHmêtro marca QUIMIS, com eletrodo de vidro combinado marca SENSOTEC, sendo que a calibração do mesmo foi feita utilizando soluções tampão com pH igual a 4,0, 7,0 e 9,0.

A Figura 4b mostra um esquema das barras de aço rápido após a usinagem, onde percebe-se a formação, em cada barra, de um semi-cilindro. Este perfil foi escolhido para uma melhor visualização das superfícies laterais dos furos, verificando as distorções do perfil ao longo da profundidade de corte.

Com relação às características da ferramenta, tem-se que a mesma é tubular, fabricada em cobre eletrolítico com diâmetro externo de 10 mm e diâmetro interno de 4 mm (vide Figura 4a). Dentro destes 10 mm, a ferramenta possui um revestimento fabricado em PVC de 0,2mm de espessura (Malaquias et al., 1998).

O suporte de fixação dos *bits* foi fabricado em aço inoxidável 304 para resistir à corrosão do meio onde ocorre a usinagem, conforme mostra a Figura 4a, e fixado na base de cobre da cuba eletrolítica através de grampos de fixação, também em aço inoxidável 304.

O tempo de usinagem foi estabelecido nos ensaios preliminares. Este foi o tempo necessário para que a ferramenta vazasse no final do furo sem arrancar uma quantidade de material excessiva nesta superfície.

Após a definição dos parâmetros, foram realizados os ensaios definitivos, onde em cada par das barras de aço, foram feitos quatro furos para uma condição estipulada, ou seja, um determinado eletrólito e pH.

As peças usinadas foram analisadas em termos de taxa de remoção de material, sobrecorte lateral e conicidade dos perfis obtidos em cada condição.

Para a obtenção da taxa de remoção material foram realizados testes de 7 minutos de duração para cada condição. As barras eram pesadas antes e depois dos ensaios. De posse da variação da massa obteve-se, através da densidade do material, o volume de material retirado.

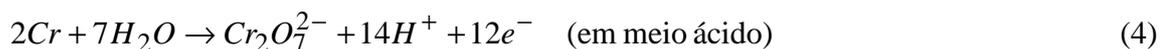
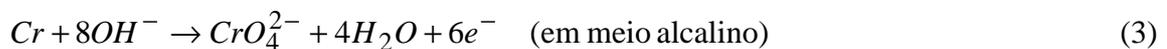
íons decompostos da água. A dissociação parcial proporciona a formação de íons H^+ acidificando o eletrólito. Essa reação pode ser representada pela equação química (2).



Estudos sobre a dissolução anódica de alguns metais tem revelado que o anólito (região próxima do anodo) torna-se mais ácido (Datta, 1993).

A influência do valor do pH do eletrólito na usinagem eletroquímica deve ser verificado para cada aplicação específica. Por exemplo, Rumyantsev & Davydov (1989) tem apresentado que na dissolução anódica do ferro em soluções tampão de NaCl, o aumento do valor do pH de 1 até 6 praticamente não afeta a forma da curvas de polarização, enquanto o seu aumento de 6,5 até 8 resulta na passivação do eletrodo. Na solução de pH 8,5, o efeito de passivação predomina, impossibilitando a ativação aniônica no anodo, conseqüentemente, impedindo a usinagem. Em eletrólitos de NaCl não tamponados, a transição de dissolução ativa para passiva ocorre em valores de pH substancialmente maiores (em torno de 12). A causa para esta ocorrência vem do fato de que, em eletrólitos não tamponados, a camada ácida próxima do anodo possui valores de pH significativamente menores do que aqueles que devem causar uma transição para passivação em eletrólitos tamponados (para pH menores que 8). Além disso, embora o valor do pH no volume total do eletrólito seja alto (pH = 10), existe, no anodo, uma camada de eletrólito ácido que permite que ocorra normalmente a usinagem.

Nem todos os metais apresentam curvas de polarização com mecanismo semelhante ao da Figura 1. Por exemplo, o cromo irá dissolver no estado de transpassivação durante a usinagem eletroquímica. Quando atinge-se o potencial de transpassivação, os óxidos formado são solúveis, evitando a passivação. A dissolução anódica do cromo por transpassivação pode ser descrita pelas equações químicas 3 e 4. A eficiência de corrente não depende da composição do eletrólito ou densidade de corrente e está próxima a 100%.



O tungstênio apresenta forte tendência de passivação. Para se atingir altas taxas de dissolução do metal que é requerida em usinagem eletroquímica, a dissolução anódica do tungstênio só é possível em eletrólitos alcalinos capazes de dissolver a camada de óxidos passivadores. A dissolução eletroquímica do tungstênio em meio alcalino procede com a participação direta dos íons OH^- , conforme pode ser visto na equação química 5. O molibdênio apresenta comportamento similar ao tungstênio.



3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos deste trabalho foram desenvolvidos seguindo a metodologia apresentada no diagrama da Figura 3.

densidade de corrente na dissolução do ferro utilizando soluções de NaCl (curva a) e de NaNO₃ (curva b), conforme pode ser visto em Datta et alli (1996).

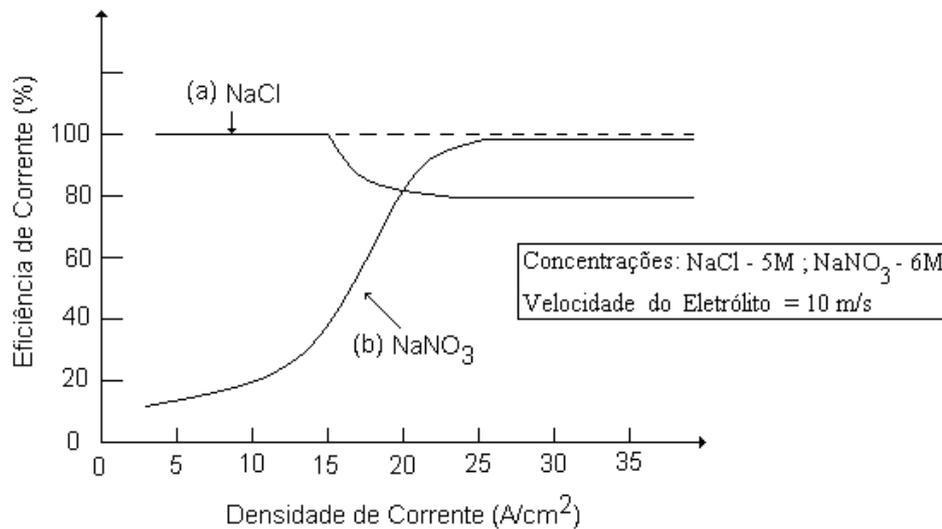


Figura 2. Eficiência de corrente para a dissolução do ferro em função da densidade de corrente: (a) utilizando soluções de NaCl e (b) utilizando soluções de NaNO₃.

Quando o eletrólito utilizado é uma solução aquosa de NaCl (curva **a** da Figura 2), percebe-se que a eficiência de corrente permanece constante e equivalente a 100% durante toda a faixa de densidade de corrente, apresentando uma queda a partir de um certo valor crítico da densidade de corrente (no caso, cerca de 15A/cm²). Esta queda está associada à produção simultânea de íons Fe²⁺ e Fe³⁺.

Analisando a curva **b** da Figura 2, onde o eletrólito é uma solução de NaNO₃, observa-se que a eficiência de corrente é pequena para baixas densidades de corrente, aumentando significativamente quando atinge um valor crítico (no caso, cerca de 25A/cm²). Neste caso, para baixos valores de densidade de corrente, ocorre a formação de óxidos passivadores impedindo a ocorrência de altas taxas de dissolução do metal. O valor crítico da densidade de corrente para qual ocorre a transição depende do par metal-eletrólito envolvido no processo.

2.2 A importância do valor do pH do eletrólito

O valor do pH do eletrólito durante a usinagem eletroquímica (ECM) não é o mesmo em toda a região onde ocorre a usinagem. A dissolução anódica ocorre nas interfaces eletrodo-eletrólito, onde aparece o fenômeno da dupla camada elétrica, que ocorre quando um metal entra em contato com uma solução eletrolítica, adquirindo uma diferença de potencial que se deve a uma distribuição desigual das cargas através da superfície dos eletrodos (Denaro, 1971). No catodo, o eletrólito próximo da ferramenta torna-se mais alcalino devido a evolução de hidrogênio ou devido a redução dos íons nitratos. No anodo, o metal é oxidado, o que, de forma simplificada, pode ser expresso como:



As reações anódicas devem produzir um composto com íons metálicos e alguns componentes do eletrólito. Os íons metálicos, quando em solução saturada, reagem com os

Após apresentar um estudo da dissolução anódica dos metais e da importância do pH das soluções eletrolíticas e o procedimento experimental, o presente trabalho enfoca a discussão dos resultados obtidos sob a ótica dos diferentes valores de pH das soluções.

2. DISSOLUÇÃO ANÓDICA DOS METAIS

O bom desempenho do processo de usinagem eletroquímica, ou até mesmo a possibilidade de ocorrer a usinagem, depende fundamentalmente da dissolução anódica dos metais.

A dissolução anódica é favorecida por condições específicas tais como pequena distância entre a ferramenta e a peça, altas densidades de corrente e velocidade do eletrólito na região de usinagem. Estes fatores proporcionam altas taxas de remoção de material, grande precisão e excelente acabamento superficial.

2.1 Características básicas do processo de dissolução anódica

As características básicas do processo de dissolução anódica são as curvas de polarização e a eficiência de corrente. As curvas de polarização apresentam a variação da densidade de corrente como resposta ao potencial externo que é aplicado ao circuito. Estas curvas são diferentes para cada metal. A Figura 1 apresenta a curva de polarização representativa do comportamento do ferro e suas ligas durante a usinagem.

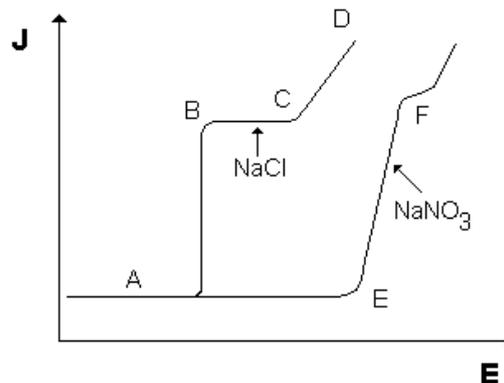


Figura 1. Curvas de polarização anódica simplificadas do ferro e suas ligas.

As curvas de polarização qualitativas (Figura 1), representadas de forma simplificada, apresentam a densidade de corrente (**J**) em função do potencial aplicado (**E**) ao sistema ferramenta-eletrólito-peça. A forma da curva de polarização depende do tipo de eletrólito. Curvas semelhantes à ABCD da Figura 1 são observadas quando se utilizam soluções eletrolíticas de NaCl, e semelhantes à AEF, quando se utilizam soluções de NaNO₃.

Fazendo uma análise das curvas para os dois casos, percebe-se algumas diferenças como: o NaCl provoca aumento significativo da corrente mesmo para pequenos valores de potencial aplicado (**E**). Isto implica que mesmo em potenciais baixos ocorre a dissociação eletrolítica quando se utiliza soluções de NaCl (trecho **BC** da curva). Por outro lado, com soluções de NaNO₃, são necessários potenciais maiores para que ocorra a dissociação (trecho **EF**).

Como consequência imediata deste fato, tem-se que o uso de soluções de NaCl proporciona a usinagem em partes indesejáveis da peça com conseqüente perda da precisão. Já com o soluções de NaNO₃ este problema é minimizado, gerando peças mais precisas.

A eficiência de corrente (ou eficiência de dissolução) é outro fator importante na dissolução anódica dos metais. A Figura 2 apresenta um gráfico da eficiência de corrente pela

A INFLUÊNCIA DO pH DO ELETRÓLITO NA USINAGEM ELETROQUÍMICA DO AÇO RÁPIDO ABNT M2

Evaldo Malaquias da Silva¹

Rafael Luís Teixeira¹

Claudionor Cruz¹

Luiz Alfredo Pavanin²

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica¹ e Instituto de Química², 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil. E-mail: emalaqui@mecanica.ufu.br.

Resumo

A obtenção de peças de alta precisão geométrica é um dos maiores problemas no processo de usinagem eletroquímica. Entre os vários fatores mais decisivos sobre a questão está a escolha do eletrólito. A influência do eletrólito dá-se não apenas pela sua natureza (diferentes sais em solução aquosa, por exemplo) mas também pela sua concentração e pH. O presente trabalho apresenta resultados obtidos na furação do aço rápido ABNT M2 utilizando-se soluções eletrolíticas de NaCl e NaNO₃ em três diferentes valores de pH (em torno de 2, 7 e 9). Dos resultados, analisados em termos do sobrecorte lateral, conicidade e taxa de remoção de material dos furos obtidos, conclui-se que a taxa de remoção de material foi pouco influenciada pela variação do pH e que as soluções em pH básico apresentaram desempenho levemente superior às soluções ácidas em relação à precisão geométrica das peças usinadas.

Palavras-chave: usinagem eletroquímica, dissolução anódica, eletrólito

1. INTRODUÇÃO

A usinagem eletroquímica é um processo no qual a retirada de material se dá pela dissolução anódica do material da peça, que necessariamente tem que ser condutora. Este processo apresenta vários aspectos altamente positivos na fabricação de peças em materiais de difícil usinagem, entre os quais: usar materiais independentemente de suas características físicas (dureza, tenacidade e fragilidade) e remover material sem geração de calor significativa na superfície da peça (Benedict, 1987). No entanto, em muitos casos, tem como ponto negativo a falta de precisão das peças usinadas (Pelizer, 1997). Existem várias maneiras para minimizar este problema. Uma delas é a escolha do eletrólito, que engloba a determinação da concentração, o tipo e o pH do mesmo.

Neste trabalho são apresentados os resultados da usinagem de furos de 10 mm de diâmetro em barras de aço rápido ABNT M2, obtidos com ferramentas eletroquímicas fabricadas em cobre eletrolítico e revestidas com PVC. Na usinagem foram utilizadas duas barras do aço, sendo que a furação proporcionou a geração de furos bipartidos (um semi-cilindro em cada barra, conforme Figura 4), para a melhor visualização das superfícies laterais dos furos. Os eletrólitos utilizados foram: soluções aquosa de NaCl (100 gramas de sal por litro de solvente) e NaNO₃ (300 gramas de sal por litro de solvente) com diferentes valores de pH (em torno de 2, 7 e 9). Os parâmetros de corte (conforme Tabela 1) foram selecionados após a realização de ensaios preliminares.