



ESTUDO DO DESEMPENHO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO ELETROQUÍMICA NA USINAGEM DO AÇO-RÁPIDO ABNT M6

Carlos Alberto Domingos Ramos

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

cadram@mecanica.ufu.br - Araxá, MG, Brasil

Claudionor Cruz¹, Márcio Bacci da Silva²

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica

(1) ccruz@mecanica.ufu.br, (2) mbsilva@mecanica.ufu.br – Uberlândia, MG, Brasil

Resumo. *Uma importante e significativa vantagem da usinagem por retificação eletroquímica (ECG) sobre a retificação convencional de materiais de elevada resistência mecânica está no aumento da taxa de remoção de material (TRM), mantendo um alto padrão na textura superficial sem alterar as propriedades mecânicas de forma significativa. Para analisar estes efeitos, o aço ABNT M6 foi usinado em uma operação de retificação tangencial de mergulho com a mesa parada, utilizando um equipamento de retificação eletroquímica desenvolvido a partir de uma retificadora convencional. O desempenho do referido processo foi estudado e os resultados obtidos foram comparados com os da retificação superabrasiva com rebolos de nitreto de boro cúbico (CBN). Este trabalho analisou também os efeitos de algumas variáveis do processo, tais como a vazão do eletrólito e a diferença de potencial aplicada ao par ferramenta-peça no acabamento superficial e no raio de arredondamento da superfície retificada. Os testes revelaram bom desempenho do processo ao confirmarem alguns resultados clássicos da literatura. Comprovaram também que a retificação eletroquímica oferece algumas vantagens sobre a retificação superabrasiva, principalmente no tocante a aspectos da superfície usinada.*

Palavras-chave: *Retificação eletroquímica, Retificação superabrasiva, Textura superficial.*

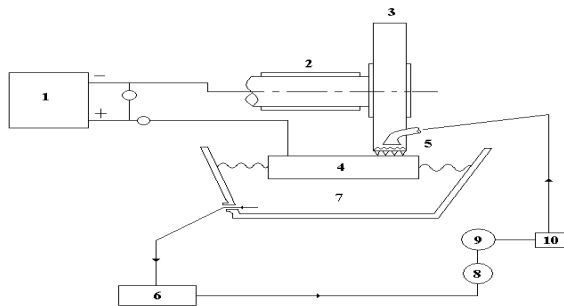
1. INTRODUÇÃO

Diante das necessidades atuais da indústria de fabricação, face ao cenário de mudanças dos novos tipos de produtos e do desenvolvimento de novos materiais, são grandes os desafios da engenharia para o desenvolvimento tecnológico de seus processos. Desta forma, o grande desafio dos procedimentos de usinagem é conseguir elevadas taxas de remoção de material juntamente com excelentes níveis de qualidade da superfície usinada. Segundo Rowe et al (1996), o desenvolvimento dos superabrasivos, como o nitreto boro cúbico (CBN), propiciaram a usinagem de peças com menos danos térmicos que os abrasivos convencionais. Os processos de fabricação podem ser melhorados, ainda mais, com a combinação da usinagem tradicional e não tradicional. A retificação eletroquímica (ECG) é um método fundamentalmente baseado na usinagem de materiais condutores, combinando a usinagem

eletroquímica (*ECM*) e a retificação convencional. A *ECG* tem uma promissora aplicação na usinagem de materiais, independente de sua dureza, fragilidade e resistência mecânica. Entretanto, sua efetiva aplicação é limitada pela ocorrência de vários fenômenos, entre eles, a falta de conhecimento pleno da técnica, o grande número de variáveis que influenciam os resultados finais do produto acabado, bem como o controle destas variáveis. Além disso, o processo *ECG* é complexo do ponto de vista funcional de seus mecanismos, não somente pela falta do entendimento perfeito de seus componentes (eletroquímico e abrasivo), mas também por existir incertezas com respeito a seus inter-relacionamentos. Este trabalho, procura contribuir com os conhecimentos tecnológicos do processo *ECG*, notadamente na usinagem de materiais extra-duros. Para isso, foram realizados ensaios experimentais de usinagem de *ECG* e retificação superabrasiva e os resultados foram então analisados comparativamente.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A RETIFICAÇÃO ELETROQUÍMICA

Os componentes ativos básicos requeridos para este processo são: catodo (rebolo), eletrólito (geralmente solução aquosa), anodo (peça de trabalho) e uma fonte de corrente contínua retificada ou pulsada onde a eletrólise toma lugar entre o anodo e o catodo, removendo material do anodo (fig. 1).



A fonte (1) de baixa tensão e alta corrente (contínua ou pulsada) provoca, na interface ferramenta-peça, reações de dissociação anódica responsáveis pela remoção do material da peça (4). Praticamente não há desgaste da ferramenta (3). O eletrólito é conduzido do reservatório (6) pela bomba (9), passando através do filtro (8) e rotâmetro (10) até ser introduzido na área de trabalho, preenchendo um pequeno "gap" (abertura entre o rebolo e a peça), dando início à ação eletrolítica.

Figura 1 -Esquema simplificado do processo de retificação eletroquímica [Benedict,1987].

Neste caso, ao processo eletrolítico alia-se a ação mecânica do rebolo. Esta ação favorece a eletrólise, removendo da superfície de trabalho a camada de óxido. Nota-se que esta camada, pode prejudicar a usinagem devido ao efeito de passivação. Segundo Ilhan et al (1991), as partículas abrasivas servem: como isolamento para manter células eletrolíticas entre a liga metálica do rebolo e a peça de trabalho; para a retirada da camada de óxido e remoção do material resultante das reações químicas. Assim que o filme de óxido é retirado, imediatamente a superfície do metal fica exposta para ser novamente oxidada, num processo contínuo. No contato, os abrasivos tocam a peça e removem algum material por abrasão. De acordo com Phillips (1985), essa remoção esta na faixa de 5 a 10% do material removido. A dissolução anódica requer condições específicas, que são: pequena distância entre eletrodos; alta densidade de corrente elétrica; grande vazão e velocidade do eletrólito.

Fatores que Influem no Desempenho da Retificação Eletroquímica. No processo *ECG* pode-se dizer que a *TRM* e a integridade superficial dependem também de vários fatores. Os mais importantes acham-se indicados, juntamente com os fatores intervenientes da retificação convencional, na Fig.2, cujo diagrama é uma síntese do trabalho de vários autores, entre os quais Kozak (1998), Davydov (1998) e Phillips(1985). Conforme ilustra o referido diagrama, os fatores estão agrupados em três fontes relativas à ação mecânica e três relativas à dissolução anódica. Dentre todos os parâmetros relacionados na Fig. 2, vários são passíveis de controle, direto ou indireto, enquanto outros são controlados pela própria sinergia do processo. Entre os parâmetros passíveis de monitoramento direto, estão: a tensão da fonte; a

velocidade de alimentação da mesa; o tipo, a concentração, a vazão e a pressão do eletrólito. Entre os parâmetros controlados pela sinergia do processo, pode-se relacionar: a tensão no "gap"; o valor do "gap" e a intensidade de corrente.

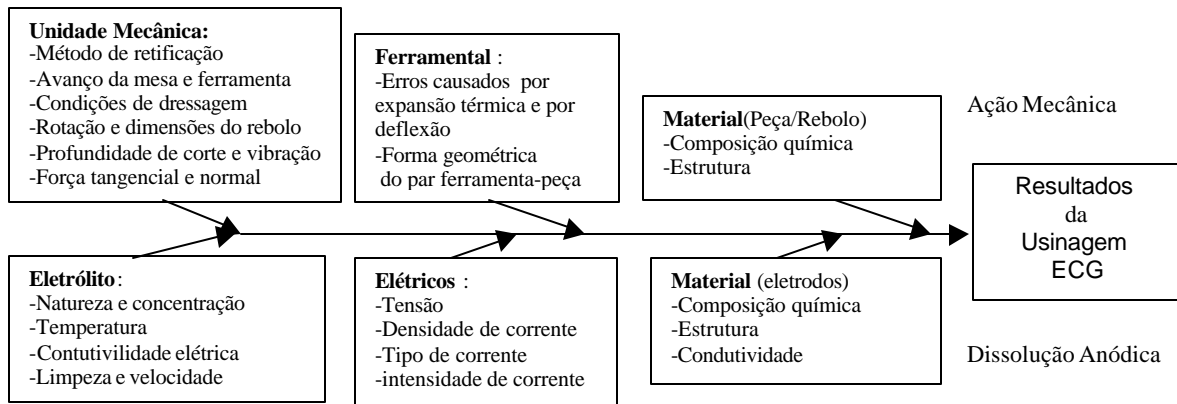


Figura 2 - Fatores que influenciam os resultados da usinagem por ECG [Ramos, 1999].

Na figura 3 tem-se uma representação esquemática das influências dos parâmetros que compõe o processo de usinagem por ECG.

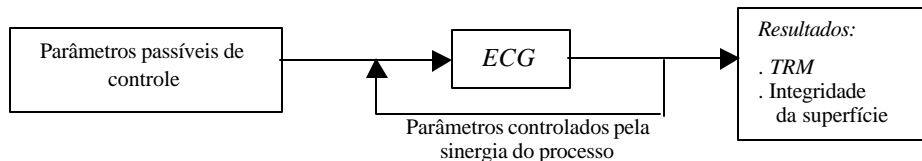


Figura 3 – Inter-relação dos parâmetros físico-químicos do processo ECG [Ramos, 1999].

Estes parâmetros estão reunidos em três grupos, segundo as possibilidades de medição e controle. Estes parâmetros representam, ao todo, um conjunto de elementos físico-químicos interativos (ação mecânica e dissolução anódica). Um grupo é formado pelas variáveis de entrada (independentes) as quais são passíveis de controle. Outro grupo é formado pelos resultados obtidos pelo processo e podem ser medidos e comparados com valores desejados. O terceiro grupo são os parâmetros controlados pela sinergia do processo ou variáveis dependentes. Forma-se assim um sistema possível de controle ou auto-regulável a partir da otimização dos parâmetros de entrada.

Desempenho do processo de retificação eletroquímica. O desempenho do processo de retificação eletroquímica pode ser avaliado através do seu produto, qual seja, os resultados da usinagem representados nas figuras 2 e 3. Tais resultados do processo podem ser medidos e comparados com aqueles encontrados na literatura, possibilitando a verificação do seu desempenho ou mesmo o controle dos parâmetros de entrada em função dos resultados desejáveis. Na figura 4, tem-se uma representação esquemática dos principais resultados da retificação eletroquímica, inter-relacionadas segundo as ações eletrolítica e mecânica.

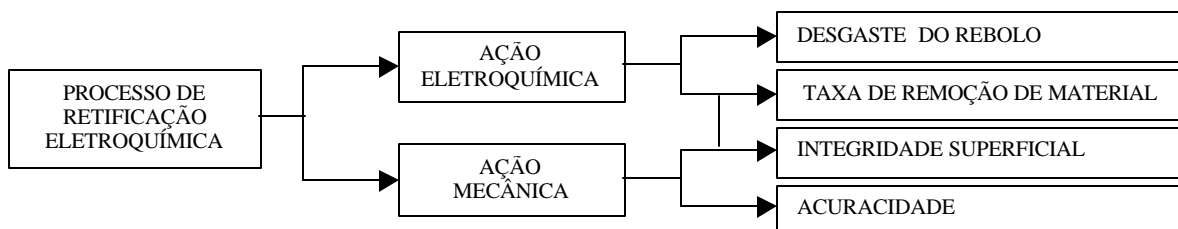


Figura 4 - Inter-relação dos resultados do processo de usinagem por ECG [Ramos,1999].

3. METODOLOGIA, EQUIPAMENTO E PARÂMETROS

Os experimentos empregados obedeceram ao fluxograma apresentado na Fig. 5.

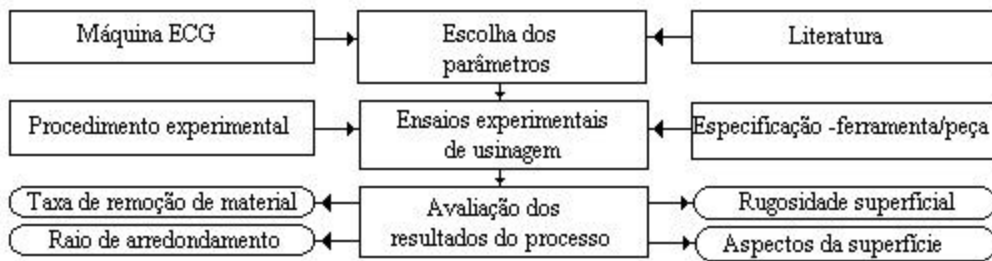


Figura 5 – Fluxograma das etapas de realização dos ensaios.

Procedimento Experimental. Neste trabalho utilizou-se o planejamento fatorial 2^3 [Montgomery, 1984] para estudar o efeito dos fatores sobre os resultados. Devido a vários fatores que, simultaneamente, ofereciam maior facilidade na transformação da máquina escolheu-se a operação de usinagem referida na Tabela 1. A Figura 6 ilustra esta operação onde o rebolo se aproxima da peça com velocidade de rotação e avanço constantes. A Figura 7 apresenta a seqüência operacional dos ensaios. Para a usinagem superabrasiva utilizou-se a mesma montagem, o mesmo bico ejetor, porém, com a fonte desligada e empregando fluido de corte no lugar do eletrólito. Na obtenção da rugosidade da superfície usinada foi empregado um rugosímetro “Taylor Hobson”, modelo “Surtronic 3+”. Os procedimentos seguiram a norma ISO 4287/1, adequado ao aparelho, com 0,8 mm de comprimento de onda (“cut-off”, λ_c), e o percurso de medição (l_n) de 2,4mm.

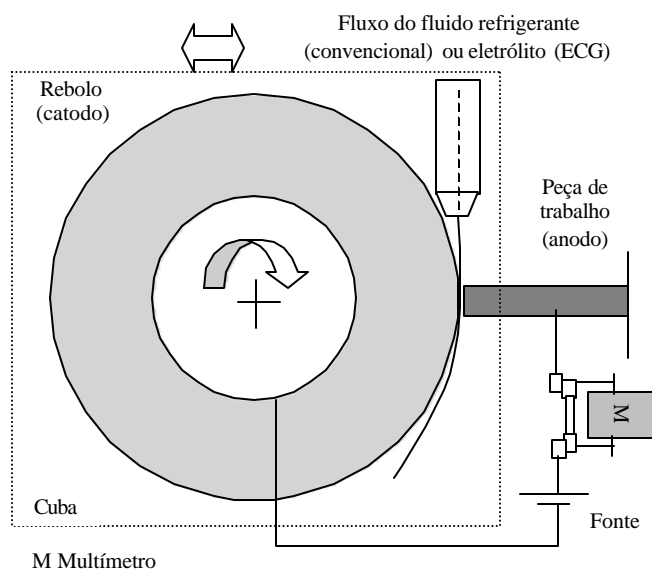


Figura 6 - Esquema operacional dos ensaios experimentais de usinagem.

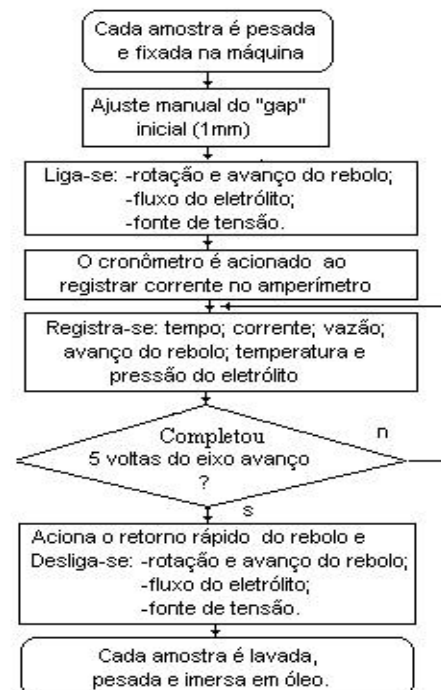


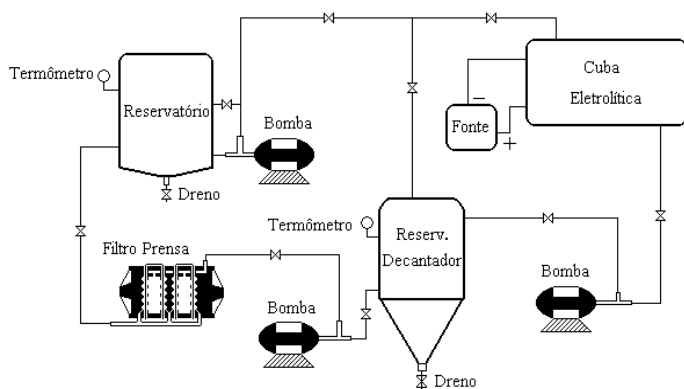
Figura 7 - Seqüência operacional dos ensaios experimentais de usinagem.

Parâmetros. Os parâmetros foram escolhidos baseando-se em valores encontrados na literatura e considerando as limitações do fluxo do eletrólito. As condições de retificação para os testes estão agrupadas segundo os processos de usinagem na Tabela 1.

TABELA 1 - Parâmetros utilizados nos ensaios

Usinagem	Parâmetros	Valores
Superabrasiva	Vazão do fluido refrigerante (Q)	450 L/h
Superabrasiva e Eletroquímica	Peça	Bits redondo ϕ 8x25 mm (63 a 64 HRC)
	Material da peça	Aço-rápido ABNT M6 (superkobalt 12%)
	Área da seção transversal	$\cong 0,45 \text{ cm}^2$
	Composição (%elemento de liga)	Co-12; Cr-4,25; Mo-5; W-6,2; V-1,9; C-0,9
	Operação de retificação	Plana tangencial de mergulho/ mesa parada
	Velocidade avanço do rebolo (V_f)	0,5 e 1,00 mm/min
	Velocidade máxima do eletrólito	5,35 m/s
	Velocidade periférica do rebolo	24 m/s
	Direção do jato eletrolítico	Tangencial à superfície de trabalho
	Bico ejetor circular ($f_{interno}$ 6,3mm)	à 80mm da superfície de trabalho do rebolo
	Rebolo CBN 150N(M)	Reto-aglomerante de Bronze, alma de aço
Eletroquímica	Eletrólito	Solução aquosa de NaNO_3
	Concentração do eletrólito	300 g/l
	Vazão do eletrólito (Q)	400 e 600 l/h
	Tensão da fonte (V)	8 e 12 V

Máquina ECG. O equipamento empregado foi uma retificadora eletroquímica, obtido a partir da incorporação de um circuito eletrolítico e de uma fonte de potência a uma retificadora hidráulica universal [Silva Neto, 1999]. A figura 6 ilustra, de forma esquemática, o circuito eletrolítico



Fonte de potência com tensão constante, baixa voltagem (0 a 25V) e alta amperagem (0 a 2000 A), com alto fator de potência e velocidade de resposta de sinais. Especificações do fabricante *Rapid Power Co. (USA)*: entrada - 220 Volts, 167 A, 3 fases, 60 Ph/Hz; saída - 0 a 25 volts, 0 a 2000A, corrente pulsada. Filtro tipo prensa, retém partículas acima de 4 μm , vazão máxima de 1000 l/h. Reservatório decantador retém partículas grosseiras.

Figura 6 - Esquema do circuito eletrolítico [Malaquias, 2000].

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os principais resultados obtidos são apresentados na Tabela 2. Os ensaios 1 e 2 são relativos à retificação superabrasiva e de 3 a 10, à ECG. Os resultados da usinagem foram divididos em variáveis dependentes, neste caso a intensidade de corrente (I), a densidade de corrente (J) e a resistência elétrica (R) entre o rebolo e a peça e os parâmetros usados para avaliação do desempenho do processo, a taxa de remoção de material específica ($TRMe - TRM/100A$), rugosidade média aritmética (Ra) e o raio de arredondamento externo da seção retificada (r_a).

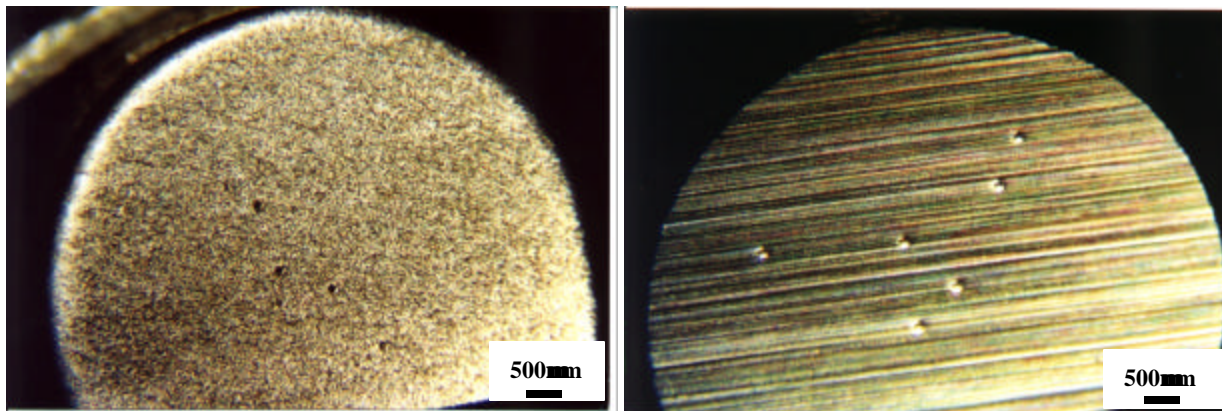
Conforme a Tabela 2, a $TRMe$ está entre 0,15 e 0,19 $\text{cm}^3/(\text{min}/100A)$. Esta é uma faixa próxima do valor de 0,17 $\text{cm}^3/(\text{min}/100A)$ mencionado no Machining Data Handbook (1980) e de 0,16 $\text{cm}^3/(\text{min}/100A)$ mencionado no trabalho de Drozda (1983), para os casos de usinagem ECG bem sucedidos.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de usinagem em aço ABNT M6 - rebolo de CBN

	Parâmetros de entrada			Resultados dos Processos					
				Variáveis Dependentes			Parâmetros Avaliação dos Processos		
	V_f	U	Q	I	$J = I/S_a$	R	TRM_e	Ra^*	r_a
Unidad →	mm/ min	Volt	L/h	A	A/cm ²	Ω	cm ³ /(min/100A)	μm	mm
Ensaio			x1000	média ± Δ	média ± Δ	média		média ± Δ	média
1	0,5		0,45					1,2 ± 0,1	0,0
2	1		0,45					1,3 ± 0,1	0,0
3	0,5	8	0,6	12,4 ± 0,6	28 ± 1,3	0,65 ± 0,03	0,18	0,7 ± 0,2	0,15
4	0,5	8	0,4	12,8 ± 2,3	28 ± 5,1	0,63 ± 0,14	0,16	0,9 ± 0,3	0,16
5	0,5	12	0,6	11,8 ± 0,8	26 ± 1,8	1,02 ± 0,04	0,18	0,6 ± 0,2	0,21
6	0,5	12	0,4	12,2 ± 2,0	27 ± 4,4	0,98 ± 0,10	0,19	0,6 ± 0,1	0,20
7	1	8	0,6	27,6 ± 1,7	61 ± 3,8	0,29 ± 0,08	0,15	0,7 ± 0,2	0,14
8	1	8	0,4	25,8 ± 3,1	57 ± 6,9	0,31 ± 0,15	0,18	0,4 ± 0,1	0,13
9	1	12	0,6	26,8 ± 1,7	59 ± 3,8	0,45 ± 0,08	0,16	0,6 ± 0,2	0,19
10	1	12	0,4	23,0 ± 4,2	51 ± 9,3	0,52 ± 0,21	0,17	0,5 ± 0,1	0,13

V_f = velocidade de avanço do rebolo; U = tensão da fonte; Q = vazão do eletrólito; D = desvio máximo; S = desvio padrão; (*) ensaios onde foram realizados 4 repetição para cada amostra (8 repetições por ensaio).

Aspectos gerais da superfície usinada. A Figura 9 ilustra duas amostras obtidas pelos processos *ECG* (amostra 19) e retificação superabrasiva (amostra 2). Esta figura evidencia as diferenças nos aspectos gerais das superfícies retificadas pelos dois processos, nota-se que a textura da superfície usinada por *ECG* não apresenta os riscos preferenciais verificados na retificação superabrasiva.



a) Processo *ECG*

b) Retificação superabrasiva

Figura 9 - Aspectos das superfícies obtidas pelos processos de retificação eletroquímica (a) e superabrasiva (b), em uma ampliação aproximada de 20 X [Ramos, 1999].

Outro aspecto, digno de nota, é a geometria arredonda e sem rebarbas da peça usinada por *ECG*, o mesmo não acontecendo com a peça usinada por retificação superabrasiva que contém cantos vivos e rebarbas. Pode-se observar também que na peça usinada por *ECG* tem-se um fundo escuro, nas indentações. Enquanto estas são lisas e brilhantes na retificação superabrasiva, na *ECG* ela é escura com presença de resíduos eletroquímicos, causados pela oxidação [Phillips, 1985]. O raio de arredondamento externo médio das amostras obtidas por *ECG* foi de 0,16mm, enquanto que na retificação superabrasiva não houve arredondamento de cantos.

Rugosidade da Superfície Usinada. Como mostra a Fig.10, os resultados dos testes indicaram que a rugosidade das superfícies das amostras usinadas por *ECG* são consideravelmente inferiores àquelas usinadas pelo processo de retificação superabrasiva.

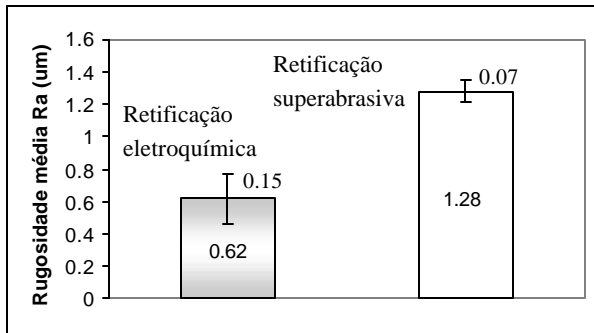


Figura 10 - Rugosidade média das superfícies retificadas por *ECG* e rebolo superabrasivo.

Figura 11- Detalhe da superfície após sofrer descargas elétricas em condições agressivas.

Na retificação superabrasiva, como em todos os processos convencionais de usinagem, o acabamento superficial piora com o aumento da *TRM*. Na *ECG*, no entanto, quando se aumenta a *TRM* de cerca de 22 mm³/min para cerca de 44 mm³/min o valor de *R_a* caiu em média de 0,7 µm para cerca de 0,5 µm.

A troca da tensão da fonte de 8V para 12V diminuiu a rugosidade da superfície usinada (média em 0,13 µm), e esse efeito é mais pronunciado a baixa velocidade de avanço (0,23µm contra – 0,01µm em média). Nota-se também que de nada adianta aumentar a tensão da fonte pois isso não faz aumentar a *TRM*. Além disso, o aumento de *U* pode provocar descargas entre o rebolo e a peça. A Figura 11 mostra detalhes da superfície da peça após sofrer processo de fusão por descargas elétricas, quando se aplicou uma tensão de 15V, um avanço do rebolo de 1 mm/min e uma vazão de 400 L/h.

5. CONCLUSÃO

- Com relação aos parâmetros analisados, pode-se concluir que:
 - (i) independentemente da variação da tensão aplicada pela fonte, a densidade de corrente permaneceu constante para o mesmo avanço;
 - (ii) o aumento da corrente se deve à redução da resistência no “gap”, causada pela redução da dimensão do próprio “gap” provocada, por sua vez, pelo aumento do avanço do rebolo;
 - (iii) somente com o aumento da vazão do eletrólito, acima de 400 L/h, foi possível manter o processo de usinagem sem ocorrer descargas na interface de trabalho, possibilitando assim o aumento da tensão da fonte até a faixa de 12V;
- A *TRM* específica média e a rugosidade média obtidas pelo processo *ECG* mostraram ser bastante satisfatórias, quando comparadas com aquelas obtidas na literatura.
- Com o novo processo, mostrou ser possível o prolongamento da vida da ferramenta.
- Com relação à textura superficial, pode-se concluir que:
 - (i) para o tipo de operação e equipamento empregado, o aspecto eletroquímico é responsável pelas características da textura final da superfície usinada;
 - (ii) A retificação superabrasiva deixa marcas visíveis dos abrasivos do rebolo, enquanto que na usinagem por *ECG*, estas marcas não são visíveis mesmo ao microscópio;
 - (iii) a usinagem por *ECG* não deixa rebarbas e nem cantos vivos, enquanto que na usinagem superabrasiva estes efeitos são perceptíveis;

- (iv) as amostras obtidas pela processo *ECG* apresentam uma camada de aspecto escuro em função da oxidação, podendo ser removida com facilidade, com escova de aço;

REFERÊNCIAS

- BENEDICT, G. F., 1987, Nontraditional Manufacturing Processes, Electrochemical Grinding, New York: Marcel Dekker, , pp. 153 – 164.
- KOZAK, J., OSMAN, H.M., DABROWSKI, L., 1998, Theoretical and Experimental investigations for Profile Electrolytic Machining With Rotating Electrode, Poland: Institute or Mechanical Tecnolog, Technical University or Warsaw.
- MACHINING DATA HANDBOOK, Nontradicional Machining, Nova Ed. Volume 2, 1980.
- MALAQUIAS, E., 2000, Contribuição ao Estudo de Usinagem Eletroquímica do Aço-Rápido ABNT M2, Tese de Doutorado, Universidade de Uberlândia, Uberlândia, MG.
- MONTGOMERY, D.C., 1984, Design and Analysis of Experiments, 2º edição, John Wiley & Sons, New York, 536 pp.
- PHILLIPS R. E., 1985, What Is Electrochemical Grinding and How Does It Work, Philadelphia, Pennsylvania, USA, pp. 65 – 70.
- RAMOS, C.A.D., 1999, Estudo do Desempenho do Processo de Retificação Eletroquímica na Usinagem do Aço-Rápido ABNT M6, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 87pp.
- ROWE, W.B., BLACK, S.C.E., MILLS, B., 1996, Temperature control in CBM grinding. the international journal of advanced manufacturing tecnology, Liverpool, England, 387 pp..
- RUMYANTSEV, E. e DAVYDOV, A., 1989, Eletrochemical Machining of Metals, Moscow: Mir Publishers, pp. 9-36.
- SILVA NETO, J. C., 1999, Desenvolvimento de uma Retificadora Eletroquímica a Partir de Uma Retifica Cilíndrica Universal, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 76 pp

STUDY OF THE PERFORMANCE OF ELECTROCHEMICAL GRINDING PROCESS IN THE MACHINING OF ABNT M6 HIGH SPEED STEEL

Abstract. *An important and significant advantage of the electrochemical grinding process (ECG) over conventional grinding machining of hard-to-machined and high-strength materials, are the increase of material removal rate and better surface characteristics without changing mechanical properties of the material. To analyse these effects, high-speed steel ABNT M6 was machined by ECG process using tangential plunging grinding operation with stable table. The machine used was derived from a conventional grinding machine. It was used CBN grinding wheel. The performance of the operation was studied and the results compared with the CBN grinding process. This work also analysed the effects of some process variables, such as the electrolyte flow rate, the current density and the applied load on the supply source, upon surface roughness, nose radius of the machined surface. The findings indicated that the electrochemical-abrasive process was effective and has some advantage upon conventional grinding, manly concerning machined surface.*

Keywords: *Electrochemical grinding, surface texture, superabrasive grinding*