



## ASPECTOS DE USINABILIDADE DA LIGA CuBe C17200 SUBMETIDA AO ENSAIO DE ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO

### **Fritz Klocke**

WZL-RWTH - Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen - Alemanha

### **Walter L. Weingaertner**

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica  
[wlw@emc.ufsc.br](mailto:wlw@emc.ufsc.br) - Florianópolis, SC, Brasil

### **Fred L. Amorim**

Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR, Curso de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, CPGEM  
WZL-RWTH (Assistente de pesquisa visitante)  
[amr@wzl.rwth-aachen.de](mailto:amr@wzl.rwth-aachen.de) - Aachen, Alemanha

**Resumo.** *As ligas de cobre são utilizadas como materiais de moldes de injeção por proporcionarem vantagens no processo de moldagem que, em muitos casos, incluem: redução de tempo do ciclo de moldagem, melhor controle dimensional e menores distorções na peça, resultando em redução nos custos totais do processo. Estas vantagens estão relacionadas à alta condutividade térmica dessas ligas, bem como às características de boa resistência à corrosão e ao desgaste abrasivo. Foram encontrados poucos trabalhos desenvolvidos na área de tecnologia de usinagem por eletroerosão das ligas de cobre-berílio. Neste trabalho, a liga CuBe C17200 (ASTM) foi ensaiada sob regimes de desbaste e de acabamento. Investigou-se também aspectos das zonas superficiais dos corpos de prova termicamente afetadas pelo processo.*

**Palavras-chave:** Eletroerosão por penetração, Liga de cobre-berílio, Parâmetros do processo

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de usinagem por eletroerosão é amplamente utilizado na indústria de ferramentaria. Alguns exemplos incluem a fabricação de moldes de injeção e de fundição, matrizes de forjamento e de extrusão. Em particular, é tipicamente utilizado na usinagem de cavidades geometricamente complexas em materiais de difícil usinagem, como os aços temperados e ligas de alta dureza.

Klocke (1998) relata que fontes potenciais de redução de custos na indústria de produtos plásticos têm sido encontradas na utilização de novos materiais para os moldes de injeção. Destaca as ligas de alumínio e as ligas de cobre de alta resistência. As ligas de cobre têm sido empregadas

como material da cavidade, do macho ou em pontos críticos do molde. Embora estas ligas sejam em média dez vezes mais caras que os aços, os custos totais do processo têm sido reduzidos, pelo fato de em muitos casos haver um aumento de até três vezes do número de peças produzidas em comparação a um molde inteiramente de aço. Engelman & Dealey (2000) reportam que especialmente as ligas C17200, C17510 e C18000, por apresentarem alta condutividade térmica ( $\cong 105\text{W/m}^\circ\text{C}$ ), três a quatro vezes superior a dos aços tradicionalmente utilizados na indústria de moldes, aliada à alta resistência mecânica, à boa resistência ao desgaste abrasivo e corrosão química, fazem dessas ligas excelentes materiais para a fabricação de moldes de injeção e de sopro de pequenas e grandes dimensões. Favorecem uma remoção mais uniforme de calor e reduzem o tempo de resfriamento do molde, contribuindo assim para um melhor controle dimensional, minimização de tensões, marcas superficiais e do empenamento das peças produzidas.

Em razão da alta condutividade térmica das ligas de cobre comparada a dos aços, os parâmetros de eletroerosão ótimos para a usinagem dos aços não produzem resultados satisfatórios quando aplicados às ligas de cobre (Guha *et al.*, 1995). O presente trabalho, teve por objetivo investigar o comportamento geral de eletroerosão por penetração da liga de cobre-berílio C17200 (ASTM), avaliando a efetividade do processo em termos da taxa de remoção de material da peça  $V_w$  ( $\text{mm}^3/\text{min}$ ), do desgaste relativo  $J$  (relação percentual entre a taxa de desgaste do eletrodo  $V_e$  e a taxa de remoção de material  $V_w$ ) e da rugosidade superficial, em regimes de desbaste e de acabamento.

A usinagem por eletroerosão é um processo de usinagem baseado, preponderantemente, no mecanismo térmico de remoção de material (Van Dijck, 1973; DiBitonto *et al.*, 1989). Assim, as camadas superficiais das peças são afetadas termicamente na proporção da energia de descarga, influenciando o desempenho das peças eletroerodidas (König & Klocke, 1997). Neste trabalho, investigou-se a caracterização das camadas afetadas termicamente pelo processo por meio de micrografias e medição de microdureza na seção transversal de corpos de prova ensaiados sob regimes de desbaste e de acabamento.

Os constituintes básicos da liga C17200 são: 1,6 a 2,0 % Be, 0,3 % Co+Ni e 98 % Cu. O berílio, quando presente no ar em quantidades excessivas na forma de névoa ou partículas ( $<10\mu\text{m}$ ), pode constituir-se como elemento tóxico dependendo da susceptibilidade do indivíduo (Stonehouse, 1986). Entretanto, o risco potencial envolve o manejo ou extração de formas solúveis de berílio (fluoreto de berílio e cloreto de berílio), (Kreibel *et al.*, 1988). Recomenda-se que os processos de usinagem (convencionais e não convencionais) sejam efetuados sempre sob a proteção de fluidos lubrificantes ou refrigerantes, e que sejam utilizados sistemas de ventilação local (exaustores) no decorrer do processo, (ACGIH, 1995). Durante a eletroerosão, os eletrodos (ferramenta e peça) estão submersos num meio dielétrico, geralmente um hidrocarboneto, e as máquinas possuem sistema de sucção dos gases produzidos durante o processo. Estas características reduzem a possibilidade de danos a saúde do operador no decorrer da usinagem.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram desenvolvidos no WZL-RWTH-Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Alemanha. Para a execução dos testes utilizou-se uma máquina de eletroerosão por penetração, modelo DECKEL DE-10 CNC, equipada com gerador de pulsos estáticos isofrequentes. Foram ensaiados corpos de prova de seção transversal de 20 x 20 mm e espessura de 10 mm, retificados na superfície a ser eletroerodida ( $R_a=2\mu\text{m}$ ). Barras cilíndricas de cobre

eletrolítico e cobre-tungstênio (75% W, 25% Cu) de diâmetro 15 mm foram utilizadas como eletrodos ferramenta (polaridade positiva). Pelas características do trabalho (plano e pouco profundo), uma lavagem por jato lateral (pressão de 0,15 bar) conferiu boa estabilidade ao processo, sendo o hidrocarboneto IME 82 do fabricante OEL-HELD (viscosidade a 20°C = 3,0 cSt) utilizado como fluido dielétrico. A tensão em aberto  $\hat{u}_i$  de 220 V foi mantida constante para todos os testes por minimizar a formação de curto-circuito, sendo estabelecida após pré-testes com  $\hat{u}_i = 120$  e 160 V, disponíveis na máquina. Para a quantificação precisa de  $V_w$  e  $J$ , empregou-se uma balança de precisão (resolução de 0,0001 g) para a medição da massa de cada um dos corpos de prova e dos eletrodos ferramenta, antes e após um tempo médio de ensaio de 20 minutos.

Na série inicial de testes foram variadas a duração do pulso de tensão  $t_i$  e a corrente de descarga  $i_e$ . Manteve-se constante a relação de contato  $t$  (relação entre a duração do pulso de tensão  $t_i$  e a duração do período do ciclo de eletroerosão  $t_p$ ) em 0,5 por garantir um desempenho estável da erosão. Os seguintes parâmetros foram estabelecidos: a) regimes de desbaste,  $i_e = 21, 40, 64$  A e  $t_i = 10, 30, 100, 300, 500, 600$   $\mu$ s e b) regimes de acabamento,  $i_e = 4, 8, 15$  A e  $t_i = 8, 10, 20, 30, 100, 300, 500$   $\mu$ s.

A relação de contato  $t$  exerce influência importante sobre o comportamento do processo e, por conseguinte, sobre os valores de  $V_w$  e  $J$  (König & Klocke, 1997). Na segunda série de testes, procurou-se por valores ótimos de  $V_w$  e  $J$  variando a relação de contato de 0,5 a 0,97.

### 3. RESULTADOS

As figuras 1 e 2 apresentam as curvas da taxa de remoção de material  $V_w$ , do desgaste relativo  $J$  e da rugosidade superficial  $R_a$  em função da duração do pulso  $t_i$  e da corrente de descarga  $i_e$ , para usinagem com eletrodos de cobre eletrolítico e cobre-tungstênio, respectivamente.

Com a elevação da corrente de descarga  $i_e$ , foram observados um aumento progressivo dos valores de  $V_w$  e do tempo ótimo de duração do pulso  $t_i$ . Invariavelmente, as maiores taxas de remoção (com relação de contato de 0,5) foram obtidas para usinagem com eletrodos de cobre-tungstênio, tanto nos regimes de desbaste como nos regimes de acabamento, sendo que para  $i_e = 64$  A e  $t_i = 300$   $\mu$ s foi obtido o valor máximo de  $V_w = 63,5$  mm<sup>3</sup>/min. Para usinagem com eletrodos de cobre eletrolítico, constatou-se que o aumento da corrente de descarga ocasiona um aumento do desgaste relativo, e para usinagem com eletrodos de cobre-tungstênio ocorre justamente o contrário, ou seja, aumentando os valores de  $i_e$  o desgaste relativo diminui gradativamente.

Para a garantia da estabilidade do processo considerando os aspectos: a) lavagem dos produtos da usinagem, evitando adesão excessiva de partículas de erosão e de subprodutos da decomposição do dielétrico no eletrodo ferramenta, b) adequada dispersão das descargas em toda a área dos eletrodos, c) desgaste uniforme do eletrodo ferramenta, d) deionização adequada do dielétrico e e) diminuição da ocorrência de curto-circuito, obtendo conseqüentemente os melhores níveis de  $V_w$  e do acabamento superficial, sugere-se realizar a usinagem sob os seguintes parâmetros: a) para as correntes de descarga de 64 e 40 A a duração do pulso  $t_i$  de 300  $\mu$ s é a mais adequada, exceção para o valor de  $i_e = 40$  A quando usinando com cobre-tungstênio, que obtém-se melhores resultados com  $t_i = 100$   $\mu$ s, b)  $i_e = 21$  A, utilizar  $t_i = 100$   $\mu$ s e  $t_i = 30$   $\mu$ s para eletrodos de cobre e cobre-tungstênio respectivamente, e c) correntes de descarga da ordem de 15, 8 e 4 A, a utilização de  $t_i = 30$   $\mu$ s que, para ambos os materiais dos eletrodos, apresentou os melhores resultados considerando as características de processo citadas anteriormente.

Condições de teste:

peça: CuBe C17200  
ferramenta: Cobre (+)

lavagem lateral  $p = 0,15$  bar  
 $\tau = 0,5$

$\hat{u}_i = 220$  V  
 $\hat{u}_e = 25$  V

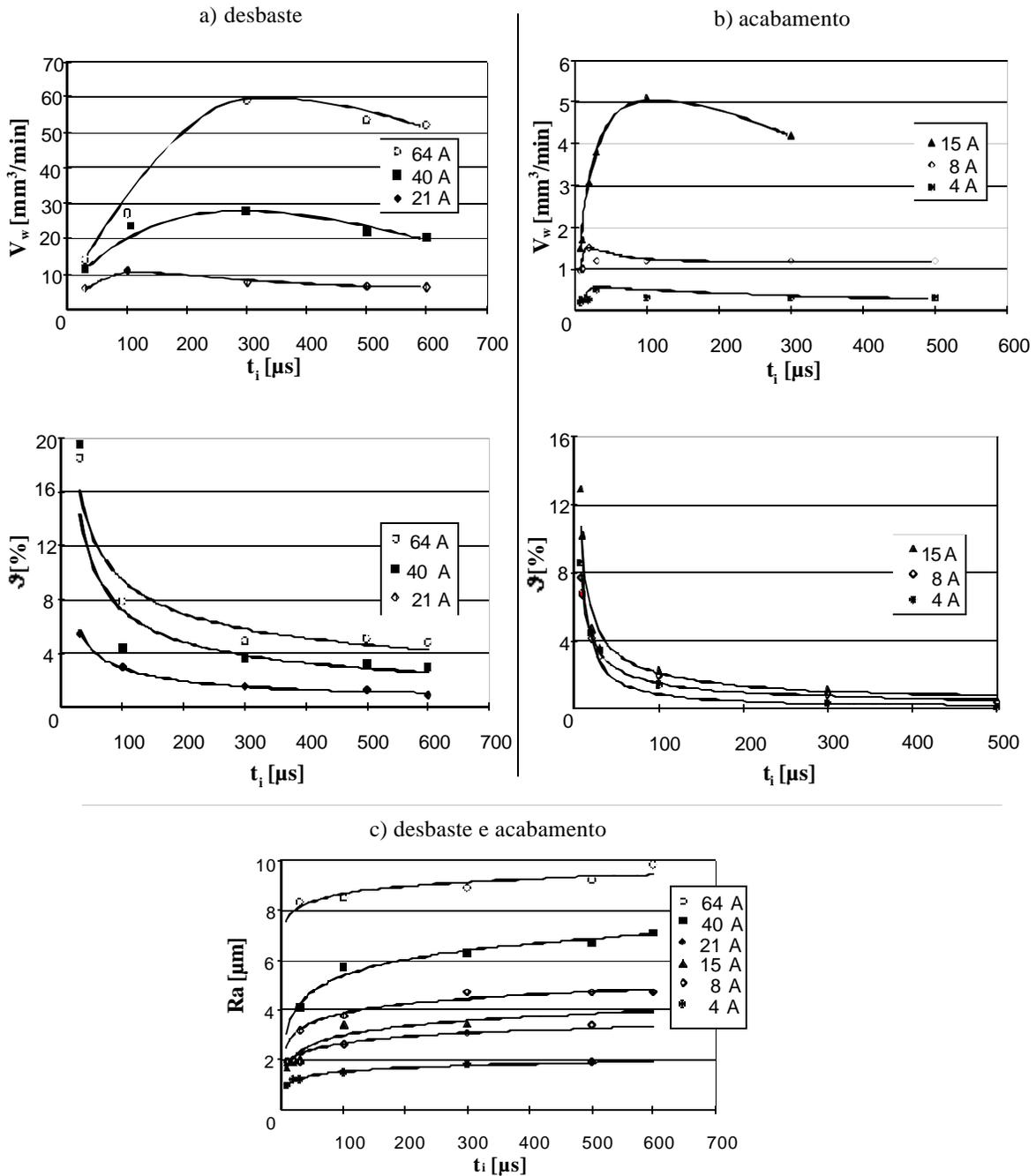


Figura 1 - Efeitos da corrente de descarga  $i_e$  e da duração do pulso  $t_i$  sobre a taxa de remoção  $V_w$ , desgaste relativo  $\vartheta$  e rugosidade superficial  $R_a$  para eletrodos de cobre eletrolítico.

Cabe observar que características como o modelo da máquina utilizada, a geometria do eletrodo e as condições de lavagem, podem produzir resultados de usinagem distintos dos obtidos nesse trabalho.

Condições de teste:

peça: CuBe C17200

lavagem lateral  $p = 0,15$  bar

$\hat{u}_i = 220$  V

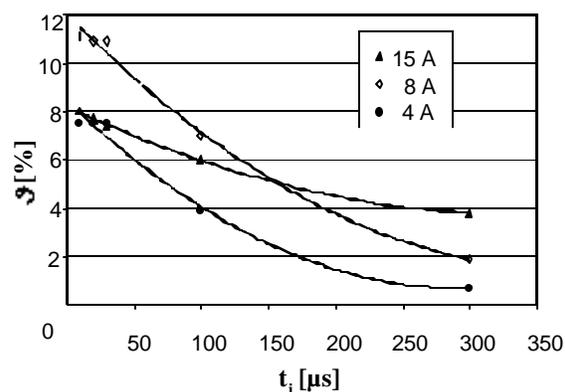
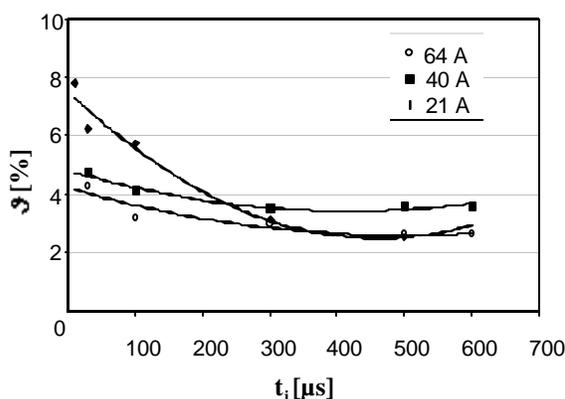
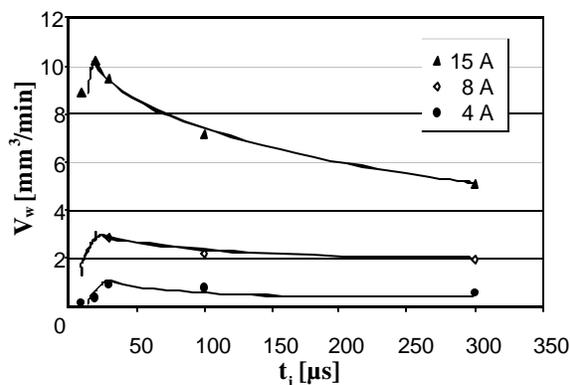
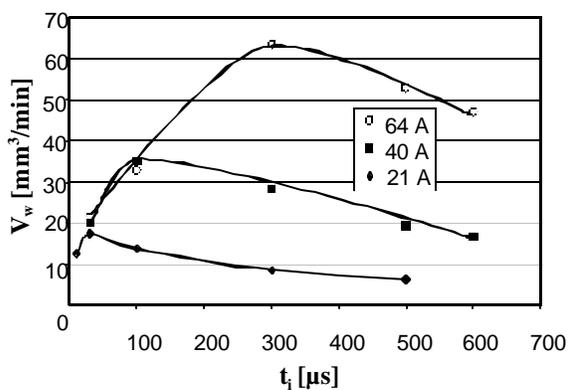
ferramenta: CuW (+)

$\tau = 0,5$

$\hat{u}_e = 25$  V

a) desbaste

b) acabamento



c) desbaste e acabamento

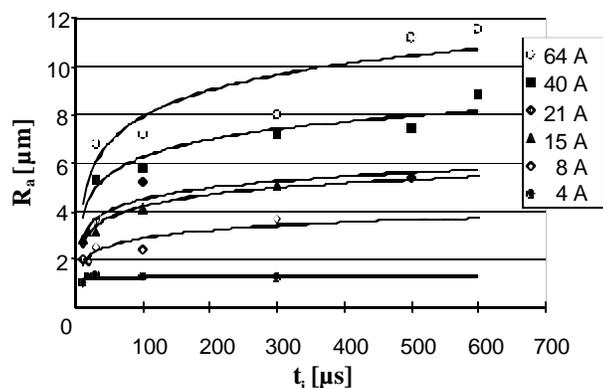


Figura 2 - Efeitos da corrente de descarga  $i_e$  e da duração do pulso  $t_i$  sobre a taxa de remoção  $V_w$ , desgaste relativo  $\vartheta$  e rugosidade superficial  $R_a$  para eletrodos de cobre-tungstênio.

A relação de contato  $t$  pode ser controlada pelo ajuste do tempo de intervalo  $t_o$  entre os pulsos de tensão  $t_i$  e, normalmente, busca-se trabalhar com a maior relação de contato possível (reduzindo o valor de  $t_o$ , que acarreta em aumento da frequência de descargas), com o objetivo de elevar a taxa de remoção de material e reduzir o desgaste relativo. A máxima relação de contato  $t$

que permite um comportamento estável do processo para usinagem com eletrodos de cobre é de 0,85 ( $t_i = 300 \mu\text{s}$ ,  $t_o = 53 \mu\text{s}$ ,  $i_e = 40 \text{ A}$ ), onde se obteve a elevação da taxa de remoção para  $35,5 \text{ mm}^3/\text{min}$  e a redução do desgaste relativo até 2,4 %, fig. 3a. Para as correntes de desbaste de 64 e 21 A, foram alcançados valores de  $V_w$  da ordem de  $65,6 \text{ mm}^3/\text{min}$  e  $16,6 \text{ mm}^3/\text{min}$ , respectivamente, fig. 3b. A rugosidade superficial das peças produzidas sob usinagem com  $t = 0,85$  sofreu pouca alteração, pelo fato da energia útil por descarga continuar sendo a mesma. Em contrapartida, nos regimes de acabamento onde os valores de  $t_i$  são bastante curtos, valores de  $t$  superiores a 0,5 mostraram-se bastante ineficientes por favorecer a ocorrência de curto-circuito no decorrer do processo e, em alguns casos, ausência completa de erosão. Da mesma forma, para usinagem com eletrodos de cobre-tungstênio, os testes demonstraram que não é adequada a utilização da relação de contato acima de 0,5, tanto para os regimes de acabamento como para os regimes de desbaste.

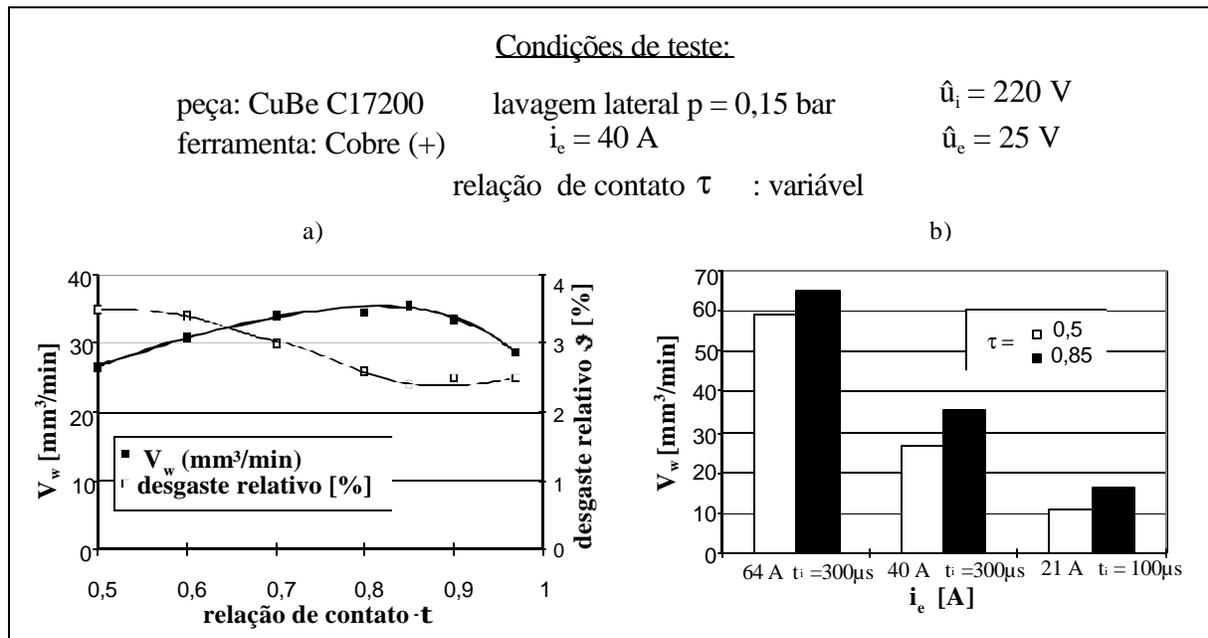


Figura 3 - Variação da relação de contato para usinagem com eletrodos de cobre eletrolítico.

Como pode ser observado na fig.4, e similar ao comportamento característico dos aços, o aumento da rugosidade está diretamente relacionado ao aumento da corrente de descarga, bem como ao aumento da duração do pulso  $t_i$ , fig. 1c. Os melhores valores de rugosidade ( $R_a$ ) para a liga C17200, da ordem de 1,0 a 2,6  $\mu\text{m}$ , são obtidos para as correntes de descarga de 4, 8 e 15 A e duração do pulso  $t_i$  de 30  $\mu\text{s}$ .

A superfície das peças, apresentando a sobreposição de crateras produzidas pelas sucessivas descargas, e os produtos da remoção de forma esférica, evidenciam a natureza térmica da remoção de material por eletroerosão, fig.4c-d. Micrografias da seção transversal dos corpos de prova revelam a formação de uma camada superficial, decorrente da resolidificação do material líquido fundido durante a descarga, e que apresenta espessura de aproximadamente 70  $\mu\text{m}$ , para usinagem sob regime de desbaste, fig. 4a. Para regimes de acabamento, esta camada apresenta-se extremamente fina com espessura da ordem de 5  $\mu\text{m}$ . Observa-se também, nas peças analisadas, a inexistência de microfissuras em ambos os regimes de usinagem. Medições de dureza, em intervalos de 10  $\mu\text{m}$  a partir da superfície, demonstraram que a camada superficial não possui a mesma dureza do material base da liga, sendo nela em torno de 212 HV e aumentando gradativamente até

489 HV no material base. Nos aços, ao contrário, a camada superficial das peças apresenta-se com elevada dureza, bem superior ao material base da liga, devido à interação química da mesma com o carbono liberado pelo dielétrico formando carbeto de Ferro ( $Fe_3C$ ).

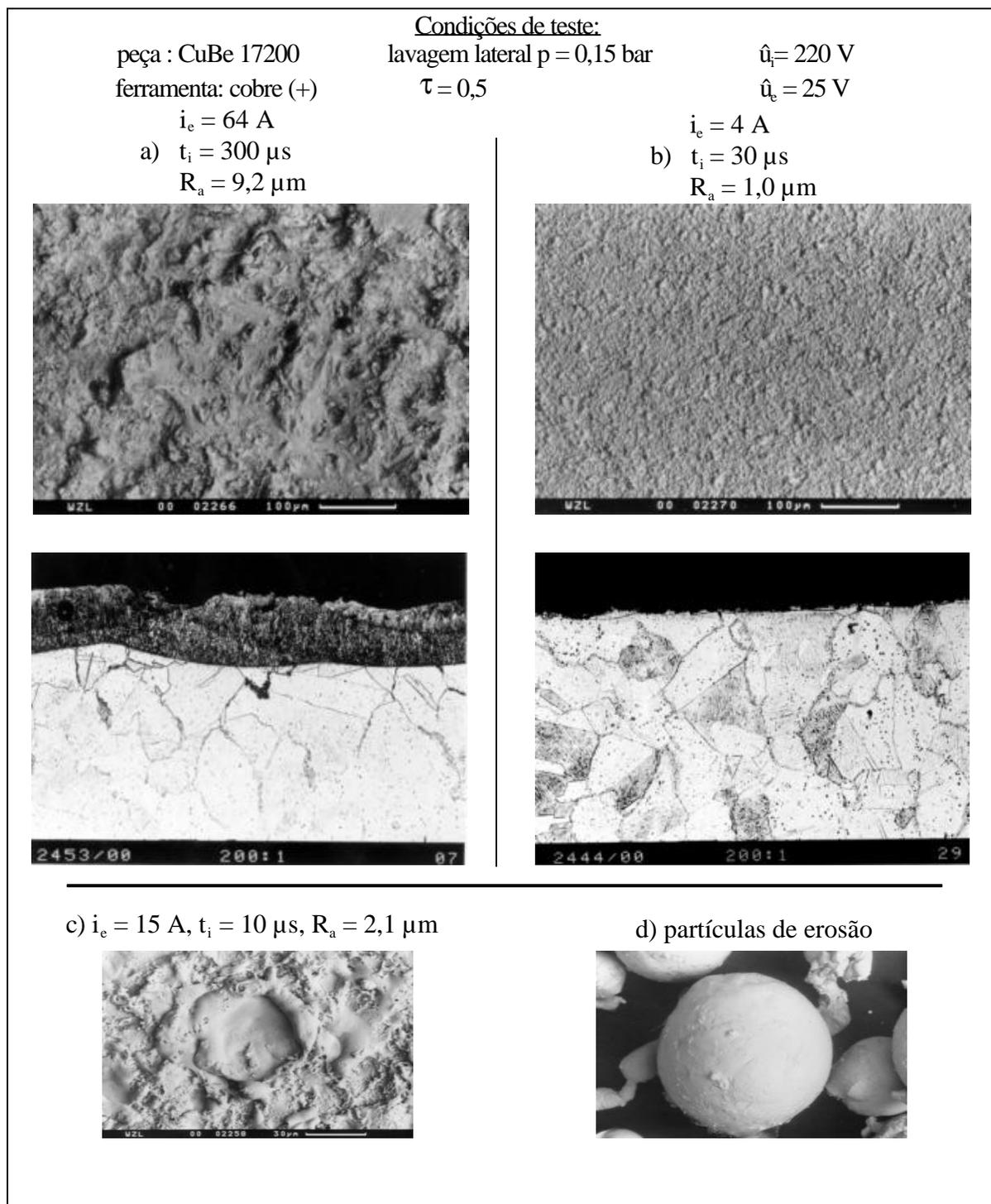


Figura 4 - Aspectos superficiais e caracterização da seção transversal de corpos de prova da liga C17200 após eletroerosão por penetração.

## 4. CONCLUSÃO

Foi investigado o comportamento geral de eletroerosão da liga de cobre-berílio C 17200 (ASTM) e parâmetros adequados de usinagem da liga C17200 são sugeridos. Observou-se, nas peças eletroerodidas, a existência de uma camada superficial com dureza inferior ao material base da liga, e que apresenta espessuras de aproximadamente 70 µm e 5 µm para regimes de desbaste e acabamento, respectivamente.

## REFERÊNCIAS

- ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1995, Industrial ventilation: a manual of recommended practice, 22<sup>nd</sup> edition, USA.
- Dibitonto, D. D., Eubank, P. T., Mukunk, R. P., Barrufet, M.A., 1989, Theoretical models of the electrical discharge machining process I: a simple cathode erosion model, Journal of Applied Physics, vol. 66, n. 9, pp. 4095-4103.
- Engellman, P., Deadey, B., 2000, Maximizing performance using copper alloys, Modern Mold & Tooling, vol. 2, n. 2, pp. 39-42.
- Guha, A., Smyers, S., Rajurkar, K. P., Garimella, P.S., Konda, R., 1995, Optimal parameters in electrical discharge machining of copper beryllium alloys, Proceedings of the International Symposium for Electromachining, April 17-21, Switzerland, vol. 1 pp. 217-224.
- König, W., Klocke, F., 1997, Fertigungsverfahren - 3: Abtragen und Generieren, Springer, Berlin.
- Klocke, F., 1998, The process sequence in tool and diemaking, Proceedings of the International Symposium for Electromachining, May 11-13, Germany, vol. 1, pp. 65-97.
- Kreibel, D., Brain, J. D., Sprince, N. L., Kazemi, H., 1988, The pulmonary toxicity of beryllium, American Rev. Respiratory Disease, vol. 137, pp. 464-473.
- Stonehouse, A. J., 1986, Physics and chemistry of beryllium, J. Vac. Sci. Technol., vol. 4, n.3, pp. 1163-1170.
- Van Dijck, F., 1973, Physico-mathematical analysis of the electro discharge machining process, doctoral thesis, faculty of applied sciences, Dpt. Mechanics, K.U. Leuven, Belgium.

### ASPECTS ON THE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF CuBe C17200 ALLOY

**Abstract.** *High strength copper alloys are used as materials for injection moulding tools or as cores and inserts in steel moulds because of their good high thermal conductivity, corrosion and wear resistance. Advantages of these alloys include, in many situations, a reduction of moulding cycle time, minimization of part distortion, warpage and poor replication of details. There is little technological know-how on Electrical Discharge Machining of copper beryllium C 17200 (ASTM) alloy. In this paper roughing and finishing regimes were tested. Copper and tungsten copper were used as materials for the electrode. Some study on the characteristics of the thermally affected zones were performed. Appropriate parameters are suggested for EDM of the investigated alloy.*

**Keywords:** *Electrical discharge machining, Copper beryllium alloy, Process parameters.*