



**UM ESTUDO MICROESTRUTURAL E DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL
DE PEÇAS DE VC 131 E VL 40 USINADAS ATRAVÉS DE DESCARGAS
NÃO ESTACIONÁRIAS**

Verônica Lacerda Arnaud

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – CT – UFPB – Campus I – CEP: 58095-900 – João Pessoa PB, Fax: 216. 7186, e-mail: lacerdaarnaud@uol.com.br

Jobson Francisco da Silva

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – CT – UFPB – Campus I – CEP: 58095-900 – João Pessoa PB, Fax: 216. 7186, e-mail: jobson.francisco.silva@bol.com.br

Romualdo Campos da Fonseca

Departamento de Tecnologia Mecânica – CT – UFPB – Campus I – CEP: 58095-900 João Pessoa PB, Fax: 216. 7186, e-mail: romumetromec@dtm.ct.ufpb.br

Jorge H. E. Silva

Departamento de Tecnologia Mecânica – CT – UFPB – Campus I – CEP: 58095-900 João Pessoa PB, Fax: 216. 7186, e-mail: echude@uol.com.br

Resumo. Aços ABNT D6 e ABNT 4140 foram submetidos a três diferentes regimes de usinagem por eletroerosão usando eletrodos de cobre e de grafite. Os regimes de descargas foram selecionados de forma tal que caracterizassem regime de desbaste, de semi-acabamento e de acabamento. O efeito térmico na zona afetada pelo calor foi magnificado e a penetração e lavagem dificultadas usando eletrodos com forma de cunha na entrada. A análise metalográfica mostra que a espessura da camada branca depende do tipo de aço e do nível de energia da erosão sendo que a maior espessura é encontrada no aço VL 40 quando é usado eletrodo de cobre. As trincas aparecem na camada branca e também no material de base, especialmente no aço D6 (VC 131) onde o alto teor de carbonetos, favorece a formação de trincas intergranulares. O trabalho se encerra com uma discussão sobre a qualidade do perfil gerado, levando em conta as características dos materiais usinados e dos materiais usados como eletrodos.

Palavras-chave: eletroerosão, usinagem, microestruturas.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem por eletroerosão é um dos processos que emprega a corrente elétrica para a remoção do material. Retirar cavaco de um material via potência elétrica, elimina a conversão ineficiente de potência elétrica para potência mecânica, característica da usinagem convencional (Miller e Guha, 1999) e também dos processos de conformação plástica. Outra vantagem inerente ao princípio de usinar com potência elétrica resulta da inexistência de grandes forças tais como as requeridas para o

arranque do cavaco na usinagem convencional (Lima e Cruz, 1997). Isso resulta em projetos de máquinas menos rígidas e, portanto, mais baratas. Por último, vale a pena mencionar que nos processos de usinagem por descarga elétrica, o material “ferramenta” não necessita possuir maior dureza que o material da peça que pode ser de natureza muito mole facilitando, portanto, sua fabricação (cobre, grafite, por exemplo). A restrição tanto para o material da peça quanto para o da ferramenta é que sejam eletricamente condutores. Apesar de que a fabricação de máquinas de usinagem por eletroerosão data da década de 50, o fenômeno de usinagem é de natureza muito complexa com muitas questões para pesquisa em aberto (Tsai and Wang, 2001). O metal a ser usinado assim como o veículo dielétrico que envolve o eletrodo e a peça, são vaporizados mediante uma descarga que atua em minúsculos volumes (do eletrodo, da peça e do dielétrico). O curto espaço de tempo de existência da descarga faz com que uma parte dos materiais dos eletrodos e peça condensem e sejam arrastados pelo dielétrico para fora do sistema, onde ficarão retidos em filtros adequados. Uma outra parte do metal condensa na superfície da peça formando o que se conhece como “camada branca”. Parte do líquido dielétrico é perdido na forma de vapor que escapa pela superfície livre.

Estima-se que o processo desenvolva temperaturas locais entre uns 8.000°C e 30.000 °C (Lima, 1997) e, conseqüentemente, existirá na peça uma ZAC (zona afetada pelo calor) onde, além da camada branca, existirão eventualmente, produtos das transformações térmicas resultantes do forte efeito de têmpera a que a peça é submetida durante a usinagem. Assim, a ZAC (de materiais temperáveis como o aqui estudado) é normalmente subdividida em três regiões: a camada branca, produto da vaporização e posterior condensação do metal de base (com composição química diferente face a perda de elementos e que, em alguns casos, pode adquirir uma estrutura não cristalina como conseqüência das altas taxas de resfriamento), uma segunda camada temperada ou retemperada e uma camada revenida. A maior ou menor susceptibilidade à têmpera dos materiais e os parâmetros relacionados com a energia do processamento determinarão tanto as espessuras dessas camadas quanto as taxas de desgaste do material de base, bem como do material usado como eletrodo.

Neste trabalho se apresentam alguns resultados obtidos na usinagem por eletroerosão de aços AISI 4140 e AISI D6 em regimes de desbaste, semi-acabamento e acabamento experimentando eletrodos de cobre eletrolítico e de grafite. São analisados e discutidos os resultados obtidos da taxa de erosão e de desgaste dos eletrodos, contrastando-as com as rugosidades superficiais medidas. Detalhes microestruturais mostram que os danos na ZAC são maiores para o aço D6.

2. EXPERIMENTAL

Uma máquina de eletroerosão por penetração do tipo EDM 240 NC da ENGEMAQ foi regulada para trabalhar, entre outros parâmetros, com descargas de duração de 200 μ s (desbaste), 100 μ s (semi-acabamento) e 20 μ s (acabamento) erodindo, com eletrodos com forma de cunha, de cobre eletrolítico e de grafite (tipos MR 6004, 6012 e 6014), aços tipos VC 131 e VL 40 (equivalentes aproximadamente aos AISI D6 e AISI 4140) com composição química e dureza segundo mostrado na Tab. (1). O formato de cunha dado aos eletrodos visou atingir dois principais objetivos: maximizar os efeitos térmicos de têmpera na ZAC e testar um novo extrator de cavacos de sucção num tipo de peça sabidamente complicada para a operação de lavagem. Cada regime de erosão foi iniciado com um eletrodo novo com profundidade de penetração igual (para todos) a 12 mm, calibrada na máquina. Nessas condições, cada regime de erosão erodiu volumes distintos de material e o eletrodo correspondente perdeu massa de maneira distinta.

Tabela 1. Composição química nominal dos materiais usados para os testes

	C (%)	Cr (%)	W (%)	V (%)	Mn (%)	Mo (%)	NH (Brinell)
VC 131	2,1	11,5	0,7	0,2	0,3	-	210
VL 40	0,4	0,95	-	-	0,87	0,2	152

Os materiais não receberam tratamento térmico (foram usinados no estado de recebimento). Observe-se que a dureza Brinell (medida com um durômetro Wolpert Testor HT 1a) difere entre os dois materiais. A observação via microscopia ótica da ZAC é importante, pois esses materiais, usados em ferramentaria de corte e de estampagem, entre outros, podem sair da máquina de usinagem com trincas indesejáveis, fruto das altas taxas de aquecimento e resfriamento durante a eletroerosão (Lima, 1997). Dos dois materiais em estudo é esperado que, pelo alto teor de Cr e a presença de W e V, o aço VC 131 apresente uma susceptibilidade à formação de trincas maior que o VL 40.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As taxas de erosão dos aços e as taxas de desgaste dos eletrodos se mostram na Tab. (2) e Tab. (3). As rugosidades (médias de 6 leituras com comprimento de amostragem de 0,25 mm, medidas com rugosímetro MITUTOYO Mod. SJ-201) na Fig. (2). Uma vez que foi estabelecida uma profundidade de descida do eletrodo de 12 mm fixa, as mudanças nas taxas de desgaste (erosão das peças e desgaste dos eletrodos) são os fatores dos quais depende a profundidade final de erosão. Verifica-se, em primeiro lugar, que as taxas de erosão resultam maiores quando são usados eletrodos de grafite, tanto para o VC 131 como para o VL 40, para os três regimes de potência testados. No regime de desbaste a diferença entre as taxas de erosão é relativamente pequena ($37,70\text{mm}^3/\text{min}$ no desbaste com eletrodo de cobre, $41,63\text{mm}^3/\text{min}$ no desbaste com eletrodo de grafite). Em regime de acabamento a taxa de erosão com eletrodo de grafite é maior que o dobro para o aço VC 131 ($14,05\text{mm}^3/\text{min}$ contra $6,93\text{mm}^3/\text{min}$) e quase 60 % maior para o aço VL 40 ($11,20\text{mm}^3/\text{min}$ contra $7,12\text{mm}^3/\text{min}$).

Tabela 2. Volume erodido, tempo empregado e taxas de erosão e de desgaste dos eletrodos

Aço VC 131					
Operação	Erosão (mm^3)	tempo (min)	Taxa erosão (mm^3/min)	Desgaste eletrodo (mm^3)	Taxa (DE) (mm^3/min)
Desbaste, eletrodo de cobre	3846,15	102	37,70	44,64	0,43
Semi-acabamento, eletrodo de cobre	3846,15	143	26,89	245,53	1,71
Acabamento, eletrodo de cobre	3205,13	462	6,93	580,35	1,25
Desbaste, eletrodo de grafite	4038,46	97	41,63	4166,66	42,95
Semi-acabamento eletrodo de grafite	3974,35	120	33,11	1222,22	10,18
Acabamento, eletrodo de grafite	2782,05	198	14,05	388,88	1,96

Tabela 3. Volume erodido, tempo empregado e taxas de erosão e desgaste dos eletrodos

Aço VL 40					
Operação	Erosão (mm^3)	tempo (min)	Taxa, erosão (mm^3/min)	Desgaste eletrodo (mm^3)	Taxa (DE) (mm^3/min)
Desbaste, eletrodo de cobre	2564,10	88	29,13	401,78	4,56
Semi-acabamento, eletrodo de cobre	2564,10	125	20,51	535,71	4,28
Acabamento, eletrodo de cobre	2564,10	360	7,12	848,21	2,35
Desbaste, eletrodo de grafite	2564,10	62	41,35	111,11	1,79
Semi-acabamento eletrodo de grafite	3846,15	126	30,52	111,11	0,88
Acabamento, eletrodo de grafite	3205,12	286	11,20	388,88	1,35

Verificam-se, também, substanciais diferenças de comportamento entre os dois materiais de base quanto ao desgaste dos eletrodos. Usinando o aço VL 40 as taxas de desgaste dos eletrodos são decrescentes, no sentido desbaste - acabamento, quando é usado eletrodo de cobre. Uma anomalia acontece quando se passa a usar os eletrodos de grafite, verificando-se um mínimo da taxa de desgaste do eletrodo no regime de semi-acabamento. Usinando o aço VC 131, a anomalia acontece no uso de eletrodos de cobre no regime de semi-acabamento. Quando são usados eletrodos de grafite, as taxas de desgaste dos eletrodos, decrescem sensivelmente no sentido desbaste – acabamento onde uma taxa de $42,95\text{mm}^3/\text{min}$ para o desbaste, parece ser extraordinariamente alta.

A Figura (1), contrasta a penetração final obtida nos dois aços para os três regimes de erosão testados: maior a penetração, menor o desgaste do eletrodo. Observa-se que, desprezando a pequena diferença que ocorre entre as taxas de acabamento com eletrodo de grafite entre o VC 131 e o VL 40, este último desgasta mais o eletrodo (seja de cobre ou grafite) para qualquer dos regimes de processamento usados. Este fato destacaria o aço VC 131 como “melhor para ser usinado por processo de eletroerosão” uma vez que, ainda apresentando maior dureza (210 contra 152 Brinell), mostra taxas maiores de erosão e menores de desgaste dos eletrodos. Mas outra variável de grande importância deve ser analisada: a rugosidade superficial resultante dos diversos regimes testados.

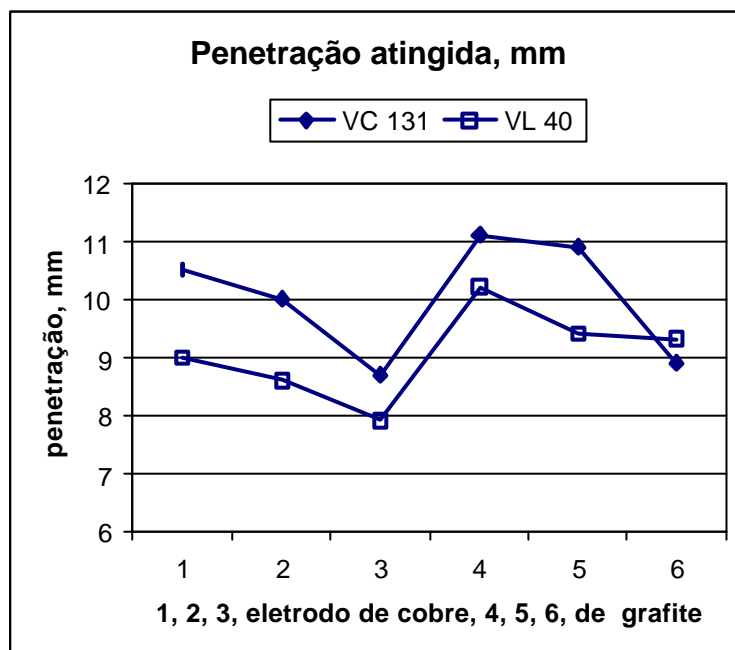


Figura 1. Profundidade de penetração atingida para setup de 12 mm

A rugosidade superficial foi medida com um rugosímetro da MITUTOYO, modelo SJ-201, usando o conceito de rugosidade Ra (média entre os picos e vales do intervalo medido).

Tendo o eletrodo a forma de um V, para cada regime de erosão, são criadas duas superfícies, uma das quais apresentará certa vantagem qualitativa em relação à outra. Isto devido ao fato de que o dispositivo de sucção (para a operação de lavagem) foi sempre colocado longitudinalmente em relação ao eletrodo, de um só lado. A Fig. (2) mostra as rugosidades médias obtidas para cada face (duas para cada regime). Pode-se observar que, se o eletrodo é de grafite, existe pouca diferença entre uma face do V erodido e a outra (particularmente notável nos regimes de desbaste, 1 e 2 no gráfico). As diferenças do valor da rugosidade entre as duas faces diminuí com a diminuição da potência, sendo mínima para o regime de acabamento.

É plausível atribuir essas diferenças ao dispositivo de sucção, provavelmente lavando muito bem uma das faces, sendo que na outra ocorre arraste de partículas, dado o gradiente de pressão existente. Esse arraste implica na diminuição do *gap* e, como consequência, maior faiscamento numa das faces.

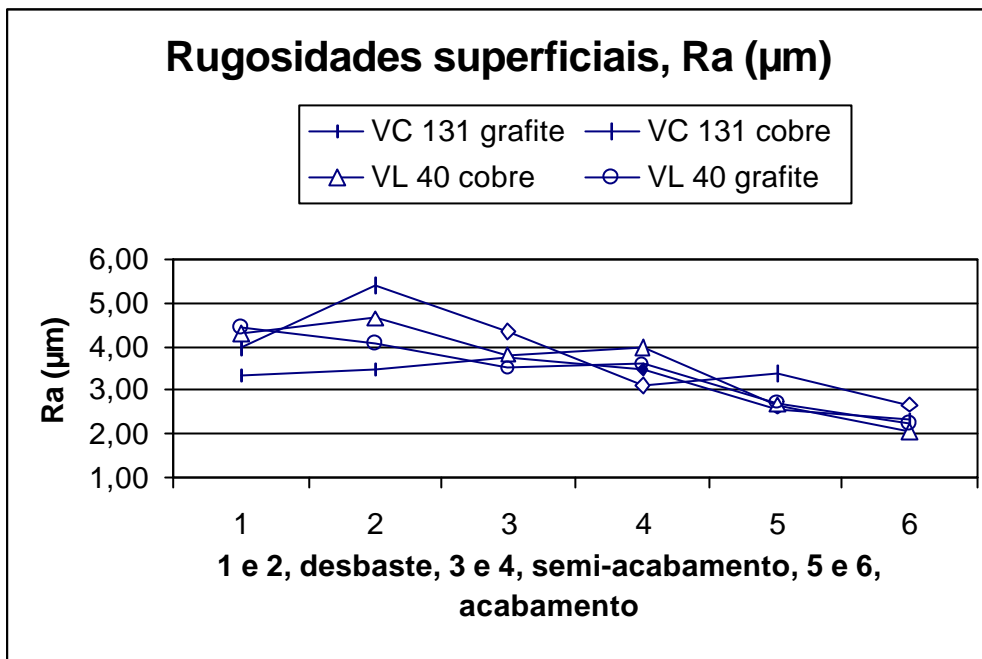


Figura 2. Medidas de Ra (μm) para as duas faces do V erodido nos três regimes.

As microestruturas permitem assegurar que, particularmente para os regimes mais severos, existem, além de maiores espessuras de camada branca, desigualdades de acabamento entre ambas as faces. Observa-se, também, desprendimento de material no aço VC 131, como se existisse uma tendência, neste aço, de desagregação de grãos.

A Figura (3) mostra fotomicrografias das regiões da ponta da cunha erodida no aço VC 131, em regime de desbaste, com eletrodo de cobre em a) e com eletrodo de grafite em b). Percebe-se que existem trincas no material de base quando trabalhado com eletrodo de cobre, bem como uma camada branca mais uniforme quando trabalhado com eletrodo de grafite.

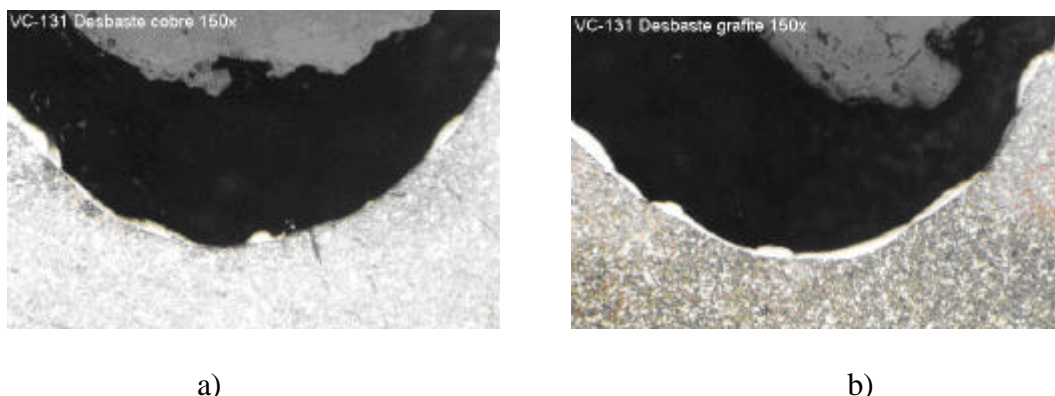
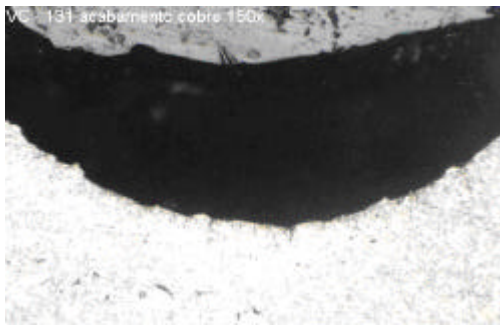
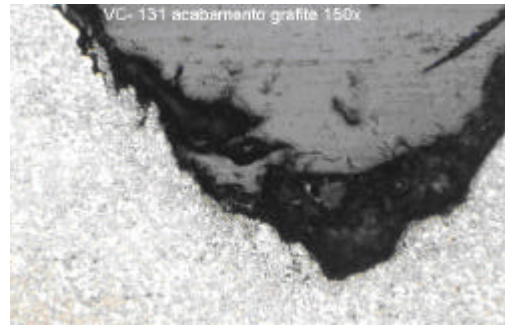


Figura 3. a) Vista com 150 aumentos da superfície de desbaste do aço VC 131 eletroerosionada com eletrodo de cobre; b) Vista com 150 aumentos da superfície de desbaste do aço VC 131 eletroerosionada com eletrodo de grafite.

Observando-se o que ocorre nas condições de acabamento para o aço VC 131, Fig. (4a), nota-se um maior arredondamento da ponta do eletrodo, significando maior taxa de desgaste do eletrodo de cobre. São visíveis as micro-trincas distribuídas no metal de base. Quando é usado o eletrodo de grafite, verifica-se um grau de arredondamento muito menor, porém, com desprendimentos de material numa das superfícies, Fig. (4b).



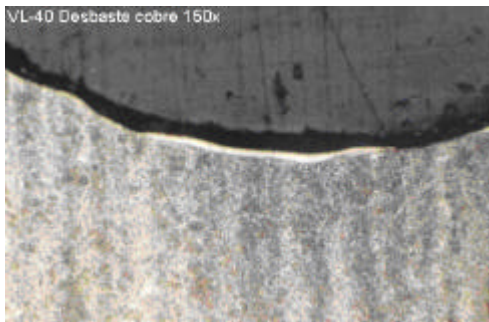
a)



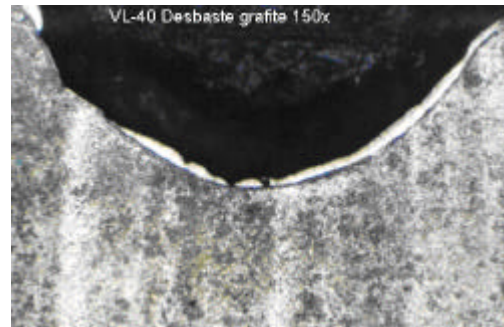
b)

Figura 4. a) Vista com 150 aumentos da superfície de acabamento do aço VC 131 eletroerosionada com eletrodo de cobre; b) Vista com 150 aumentos da superfície de acabamento do aço VC 131 eletroerosionada com eletrodo de grafite.

As superfícies resultam ser de maior qualidade nos aços da classe VL 40, coisa que fica evidenciada na Fig. (5) e Fig. (6), onde não são visíveis trincas ou material desagregado. As camadas brancas, para este material são mais uniformes. Ocorre um menor desgaste do eletrodo de grafite que o de cobre, verificado pela simples observação dos raios de curvatura.

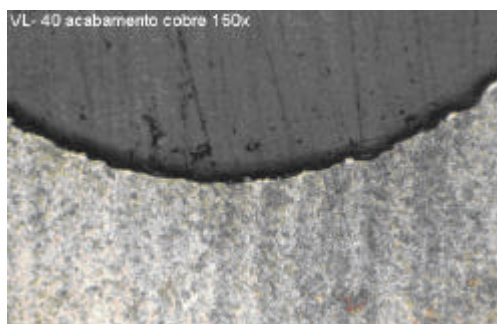


a)

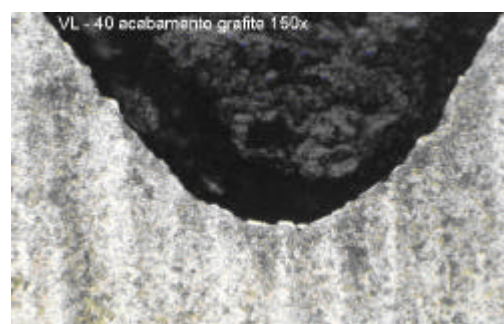


b)

Figura 5. a) Vista com 150 aumentos da superfície de desbaste do aço VL 40 eletroerosionada com eletrodo de cobre e b) com eletrodo de grafite.



a)



b)

Figuras 6. a) Vista com 150 aumentos da superfície de acabamento do aço VC 131 eletroerosionada com eletrodo de cobre e b) com eletrodo de grafite.

A Figura (6) mostra a maior qualidade das superfícies do aço VL 40 quando eletroerodidos com eletrodos de cobre e grafite, a) e b) respectivamente. Pouco volume de camada branca, ausência de trincas e menor desgaste de eletrodo quando se usa a grafite.

4. CONCLUSÕES

A taxa de erosão do aço VC 131 é sempre maior que a taxa de erosão do aço VL 40 para operações de desbaste e semi-acabamento para parâmetros de erosão similares quando se usa eletrodo de cobre. Nessas duas condições de operação foram obtidas taxas ao redor de 30 % maiores (27 % e 31 % para desbaste e semi-acabamento, respectivamente). Quando se usa eletrodo de grafite, as taxas de erosão dos dois materiais passam a ter valores sem diferenças significativas para todos os regimes aqui estudados. Microtrincas podem ser observadas no aço VC 131, especialmente quando é trabalhado com eletrodo de cobre. No aço VL 40, não houve formação de trincas perceptíveis com aumento de até 600 vezes para nenhum dos regimes de trabalho investigados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CEFET-PB e ao Laboratório METROMECC da UFPB-CT, pelo apoio Laboratorial.

6. REFERÊNCIAS

- Lima, F. E., 1997, “Rugosidade e Integridade Superficial do aço ABNT M2 Após Usinagem por Descargas Elétricas”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia.
- Lima, F. E. e Cruz, C., 1997, “Aspectos da superfície usinada do aço rápido ABNT M2 pelo processo de eletroerosão”, Anais do CONEM 1997, trabalho 397.
- Miller, P. et al, 1999, “Efeitos da usinagem por eletroerosão na superfície dos materiais para moldes”, Revista Máquinas e Metais, junho/1999, pg.40-51.
- Tsai, K. and Wang, P., 2001, “Semi-empirical model of surface finish on electrical discharge machine”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, N 41, 2001, p.1455-1477.

A MICROSTRUCTURAL AN ROUGHNESS STUDY OF D6 AND 4140 AISI STEELS WORKED WITH SPARK MACHINING

Verônica Lacerda Arnaud

Pós-Graduation Course in Mechanical Engineering – CT – UFPB–Campus I–CEP: 58095-900 – João Pessoa PB, Fax: 216.7186, e-mail: lacerdaarnaud@uol.com.br

Jobson Francisco da Silva

Pós-Graduation Course in Mechanical Engineering – CT – UFPB–Campus I–CEP: 58095-900 – João Pessoa PB, Fax: 216.7186, e-mail: jobson.francisco.silva@bol.com.br

Romualdo Campos da Fonseca

Department of Mechanical Technology – CT – UFPB – Campus I – CEP: 58095-900 – João Pessoa PB, Fax: 216. 7186, e-mail: romumetromec@dtm.ct.ufpb

Jorge H. E. Silva

Department of Mechanical Technology – CT – UFPB – Campus I – CEP: 58095-900 – João Pessoa PB, Fax: 216. 7186, e-mail: echude@uol.com.br

Abstract. D6 and 4140 AISI Steels were submitted to three different electrical-discharge machining (EDM) power levels using copper and graphite tools (electrodes). The discharge parameters were selected in such way that characterized high, intermediate and little metal removal rate. The thermal

effect in the heat-affected zone was magnified using eletrodes with form of it coins in the entrance. The metalograph analysis show that the thickness of the white layer depends on the type of steel and of the level of energy of the erosion and the largest thickness is found in the steel VL 40 when copper eletrode is used. The microcracks appear in the white layer and also in the work material, especially in the steel D6 type where, the strong carbides, helps the cracks intergranular formation. The work contains the quality surface finish discussion and show that the largest rate of removal of the steel D6 presents the disadvantage of happening with larger rough finish.

Keywords: *Electric discharge machining, spark machining, Surface finish.*