

MODIFICAÇÕES SUPERFICIAIS PRODUZIDAS NA USINAGEM POR ELETROEROSÃO DE FERROS FUNDIDOS BRANCOS ALTO CROMO LIGADOS AO MOLIBDÊNIO

Alberto Arnaldo Raslan - ltm-raslan@ufu.br

Jorge Francisco Costa Brasil - costabrasil@mec.ufu.br

Cintia Nunes Braga Regattieri - cregattieri@hotmail.com

Luciano José Arantes - ljarantes@mecanica.ufu.br

Cherlio Scandian - cherlios@npd.ufes.br

José Daniel Biasoli de Mello - ltm-demello@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica - Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1M - Uberlândia - MG - 38400-902

Resumo. Na usinagem por descargas elétricas ou eletroerosão (EDM), pode-se usinar materiais duros e frágeis, de difícil usinagem por técnicas convencionais. O processo permite a obtenção de geometrias complexas com precisão dimensional e com preservação da integridade do material. Este trabalho tem como objetivo avaliar a usinabilidade por EDM de ferros fundidos brancos ligados com 28% de Cromo (Cr) e diferentes teores de Molibdênio (Mo). Foi utilizada um equipamento Engemac 440 NC, eletrodo de cobre eletrolítico, regime de semi-acabamento e fluido dielétrico Tutela Meca Fluid 90EE. As amostras, com faces paralelas, foram obtidas a partir de blocos fundidos cortados com disco de CBN, retificadas e lapidadas. A taxa de remoção de material (TRM) foi determinada a partir de usinagens de quatro corpos de prova. Modificações microestruturais foram analisadas por microscopia ótica, tais como número de trincas, comprimento médio de trincas e espessura da camada refundida. Os resultados mostraram que, diferentemente de operações de usinagem por descargas elétricas de aços comuns e de alta liga, não se consegue trabalhar com maiores potências devido ao seu grande percentual de carbono, que cria muita deposição de carbono e impede a boa lavagem na área de usinagem. Com a adição de Molibdênio, não ocorrem modificações significativas na TRM das ligas estudadas. Entretanto, a adição de Mo modifica sensivelmente algumas características importantes, tais como, dureza, número de trincas e espessura da camada refundida, onde todos mostraram crescer com o aumento da quantidade de Molibdênio.

Palavras-chave: EDM, dureza, ferro fundido branco e TRM.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem por descargas elétricas, ou eletroerosão, ou EDM (*Electrical Discharge Machining*), é um dos mais populares processos não tradicionais de usinagem. EDM é um processo que permite a usinagem de furos, ranhuras e superfícies, com formas das mais complexas ou dimensões diminutas e materiais de elevada dureza, que seriam dificilmente usinados por processos convencionais, desde que condutores elétricos. A usinagem por descargas elétricas não é uma tecnologia relativamente recente, já está a mais de quatro décadas fortemente consolidada na indústria metal-mecânica, em especial a indústria de matrizes de conformação, fundição e moldes de injeção de plástico. Apesar de tantos anos de aplicação do processo, a indústria ainda se depara com desafios quanto ao processo quando por exemplo, se deseja usinar um material novo ou de pouca aplicação no processo EDM. A usinagem de ferros fundidos brancos alto cromo é ainda nova na indústria, mas já vem sendo feita a muito tempo nos institutos de pesquisa, especialmente nos laboratórios de materiais, onde o processo é muito utilizado na retirada de corpos de prova para análises posteriores. Seu elevado teor de carbono, diferentemente dos aços comuns e de alta liga, implica em grande dificuldade na aplicação e manutenção das descargas elétricas, pois com as elevadas temperaturas do processo, ocorre grande formação de acúmulo de carbono, chamado no processo de “carvão”, agindo como camada passivadora, o que impede a boa lavagem, em especial em usinagens mais profundas, o que reduz enormemente a TRM (Taxa de Remoção de Material), e em alguns casos, passa a impedir a usinagem, desgastando apenas a ferramenta de cobre.

Por ser um processo térmico, ocorre sempre a formação de camada refundida ou camada branca aderida à superfície usinada. Essa camada é prejudicial à integridade da superfície, onde ocorrem grandes variações de dureza, aumento de rugosidade, grande número de trincas. Todas essas características são muito importantes para avaliação superficial de uma peça usinada por eletroerosão e podem servir como indicador da qualidade de usinagem.

2. FERROS FUNDIDOS BRANCOS

Nos ferros fundidos brancos, praticamente todo o carbono se apresenta na forma combinada de carboneto de ferro Fe_3C , mostrando uma superfície de fratura clara. Suas propriedades fundamentais, devido justamente a alta quantidade de cementita, são elevadas dureza e resistência ao desgaste, além de moderada resistência ao impacto. Em consequência, sua usinabilidade é prejudicada, ou seja, esses materiais são muito difíceis de se usinar, mesmo com os melhores materiais de corte e até mesmo com processos especiais de fabricação, como por exemplo, EDM.

Os elementos níquel, cromo e molibdênio são geralmente utilizados, isolados ou em combinação, para aumentar a resistência ao desgaste. O molibdênio tem um efeito equivalente a um terço do cromo no que diz respeito ao aumento da profundidade de coquilhamento. O objetivo inicial em se adicionar Mo em pequenos teores (0,25 a 0,75%) consiste em melhorar a resistência da superfície a fenômenos de lascamento, corrosão localizada, trincamento pelo calor e efeitos semelhantes. Além disso, o Mo endurece e melhora a tenacidade da matriz perlítica e melhora, em consequência, a resistência à abrasão. Ferros fundidos brancos com 12 a 18% de Cr, usados em peças fundidas resistentes ao desgaste, apresentam uma melhora dessa qualidade, quando se adiciona 1 a 4% de Mo, pois a matriz perlítica é suprimida, mesmo com resfriamento lento característico de seções mais espessas (Chiaverini, 1988).

Os ferros fundidos brancos são muito utilizados em equipamentos de manuseio de terra, mineração e moagem, na confecção de rodas de vagões, cilindros coquilhados, revestimentos de moinhos, bolas de moinhos de bola, e qualquer aplicação de fundição que necessite boa resistência à abrasão.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram divididos em 3 etapas, descritas a seguir:

- 1^a Etapa: Definição dos parâmetros;
- 2^a Etapa: Testes preliminares;
- 3^a Etapa: Testes definitivos.

3.1. Definição dos Parâmetros

Entre os parâmetros a serem definidos estão: o equipamento EDM usado com suas principais características e variáveis de usinagem, o material e a geometria da peça a ser usinada, o projeto e fabricação do ferramental necessário.

Os testes foram realizados em equipamento EDM por penetração, uma ENGEMAQ 440NC. Esse é um equipamento com gerador de controle de pulso, sem CNC, operando automaticamente após seleção dos níveis de operações possíveis, mediante prévia seleção das funções disponíveis no painel gerador. Segundo McGeough (1988), equipamentos com controle de pulso comparados com os de circuito de relaxação apresentam melhor taxa de remoção de material com a grande vantagem de redução do desgaste do eletrodo, para acabamento superficiais comparáveis. Estes resultados se devem ao melhor ciclo de trabalho dado por T_{on} e T_{off} (Kaminski & Capuano, 1999). O regime escolhido foi de semi-acabamento (Tabela 1), devido ao simples fato de não se conseguir trabalhar com potências maiores (o que aumentaria a velocidade de usinagem) devido à particularidade da usinagem por eletroerosão de ferros fundidos brancos.

Tabela 1. Parâmetros empregados nos testes definitivos.

REGIME	T_{on} [μs]	D_T [%]	T_s	Corrente [A]	Tensão [V]
Semi-acabamento	70	55	4,5	~5	~15

Os ciclos de cada descarga são o balanço entre os tempos ativo – T_{on} (duração do tempo de descarga) e inativo ou simplesmente intervalo – T_{off} (duração do tempo de pausa entre duas descargas consecutivas). Portanto, inúmeros regimes de trabalhos podem ser selecionados variando-se a intensidade de corrente, a tensão, o T_{on} e o T_{off} isoladamente.

Foram escolhidas quatro composições diferentes de ferro fundido branco alto cromo, variando-se apenas a composição do Molibidênio, como ilustra a Tabela 2.

Tabela 2. Composição química nominal das 4 ligas de ferro fundido branco alto cromo ao molibidênio.

Amostra	% Cr	% C	% Mo
A	28	2,8	0
B	28	2,8	3
C	28	2,8	6
D	28	2,8	9

Os blocos de ferro fundido branco alto cromo foram cortados com disco de CBN, retificados e lapidados para posteriormente serem usinados por eletroerosão. As dimensões dos blocos e da ferramenta de cobre eletrolítico são mostradas na Figura 1. O fluido dielétrico utilizado foi um óleo específico para eletroerosão, Meca Fluid 90 EE, da Tutela.

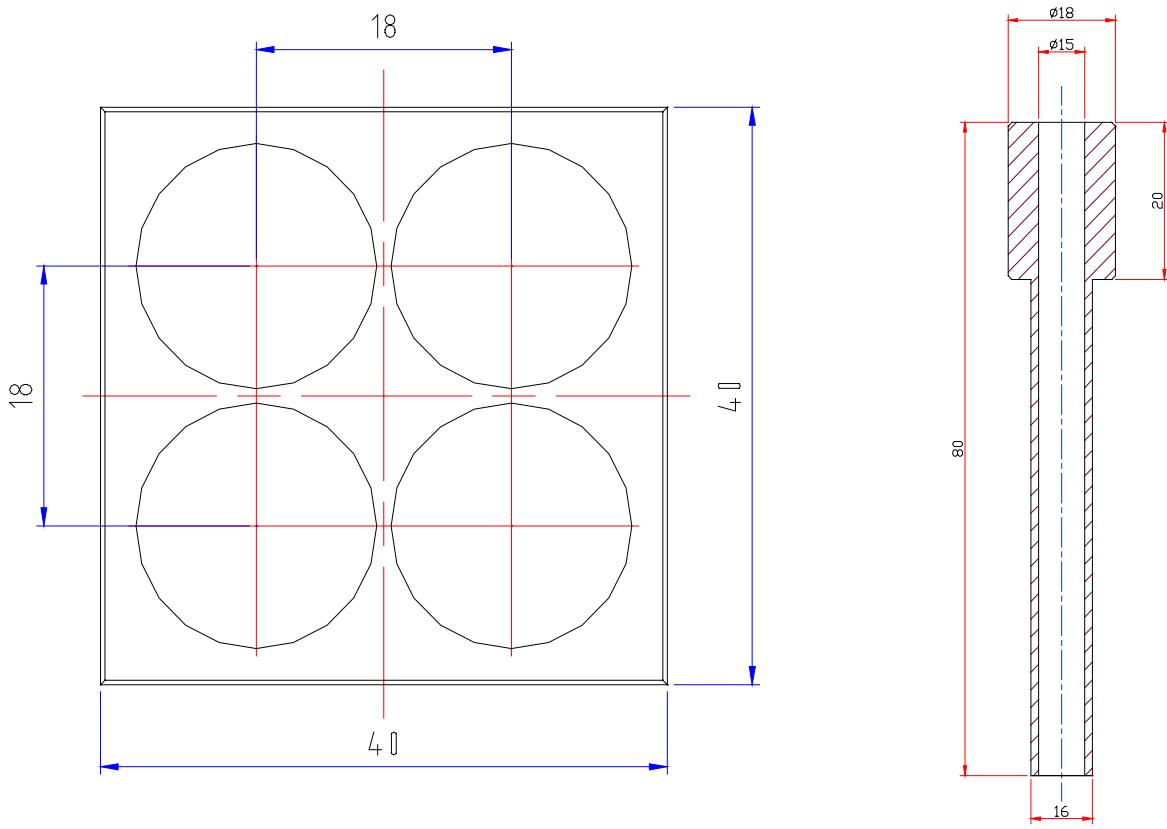


Figura 1. Disposição dos furos nos blocos de ferro fundido branco alto cromo e projeto da ferramenta de cobre eletrolítico vazada.

3.2. Testes Preliminares

Nessa etapa, foram realizados testes para fazer a seleção mais adequada dos parâmetros de usinagem, de tal forma que os mesmos possibilitem resultados precisos e confiáveis. Foi necessário ajustar os parâmetros de usinagem, até se encontrar os valores otimizados para o processo. As amostras retiradas durante os testes preliminares foram descartados na análise desse trabalho.

3.3. Testes Definitivos

Com a escolha dos parâmetros ideais para o processo, foram realizados os testes definitivos, colhendo-se o tempo de usinagem, medindo-se as massas dos blocos de ferro fundido e da ferramenta, para se fazer a medição das TRMs de cada operação. Posteriormente aos testes preliminares, foram feitas análises no Microscópio Ótico (número de trincas, comprimento de trincas e espessura da camada refundida), Interferômetro laser (rugosidade), Macrodurômetro (dureza).

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Figura 2 apresenta os resultados para TRMs das 4 ligas testadas e para a ferramenta de cobre (dando o indício de desgaste).

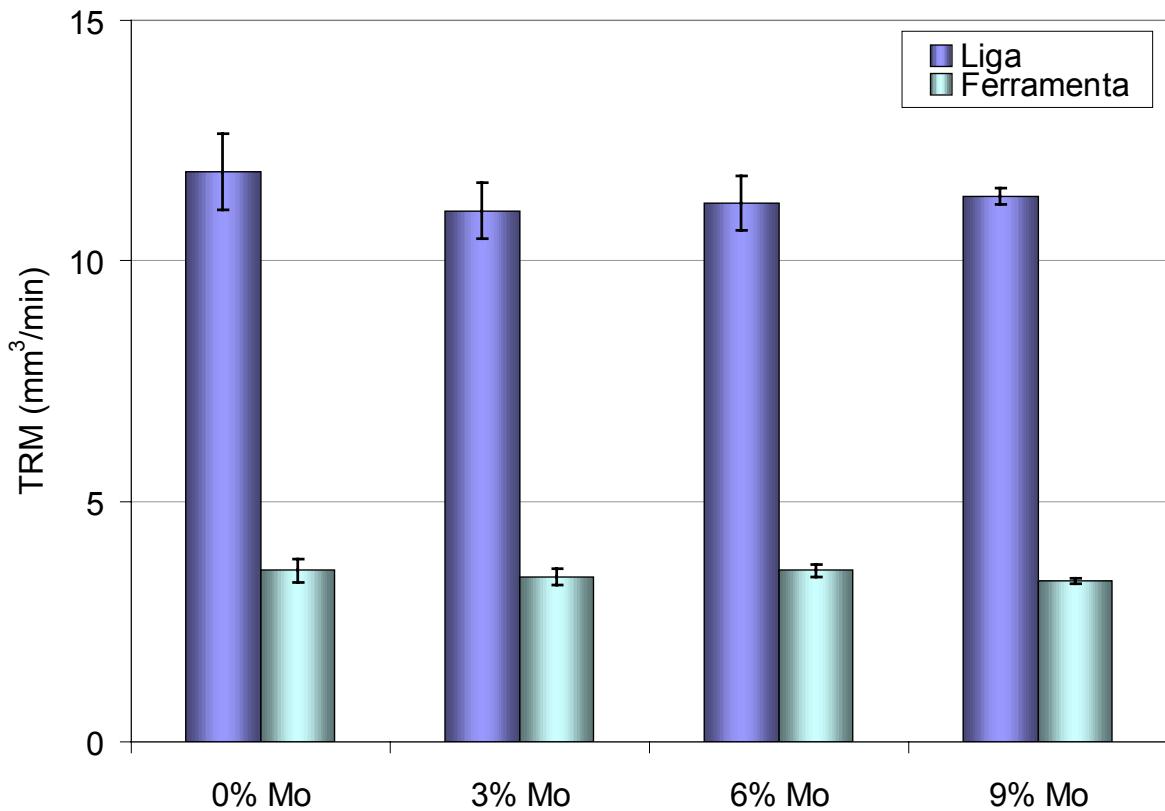


Figura 2. Taxa de Remoção de Material das 4 ligas e da ferramenta de cobre.

Quanto à TRM, tanto da peça de ferro fundido quanto da ferramenta (desgaste), não apresentaram sensíveis diferenças para ligas com diferentes teores de Molibdênio (Figura 2). Portanto, não há mudança significativa na velocidade de usinagem, ou seja, na taxa de fusão do material pelo processo de eletroerosão, ou usinagem por descargas elétricas. Entretanto, deve-se observar que quando se tentou usinar mais rapidamente, aumentando a potência da máquina (parâmetros de usinagem), o processo praticamente ficava estagnado, sem ocorrer fusão de material. Esse fenômeno ocorre devido à grande quantidade de carbono associada ao ferro em forma de Fe_3C , pois seu ponto de fusão é bem alto, e devido às altas temperaturas geradas pelo processo ($\sim 12000^\circ\text{C}$), o carbono se desprende das moléculas de ferro, formando na superfície usinada um acúmulo do que chamamos na eletroerosão de “carvão”, que age como camada passivadora, impedindo que descargas uniformes ocorram, o que “paralisa” o processo de usinagem.

Entretanto, quando analisamos o número de trincas numa área de 1 mm^2 em todas as amostras (Figura 3), observamos que há claramente uma relação do número de trincas geradas na superfície usinada com a quantidade de Mo, sendo crescente o número de trincas com o aumento do teor de Mo na liga, o que sugere que durante o resfriamento da camada refundida, que sempre ocorre em peças usinadas por eletroerosão (devido à natureza do processo: descarga elétrica – fusão de material – remoção de material), ocorra uma maior fragilização dessa camada, propiciando o aparecimento de trincas de solidificação. A literatura sugere que a adição de pequenas quantidades de molibdênio (0,25% à 0,75%) diminui a possibilidade de trincamento pelo calor (Chiaverini, 1988). Aparentemente, em grandes quantidades (acima de 3%), o trincamento por solidificação passa a ser predominante. Já o comprimento de trincas nas amostras, apresentado na Figura 4, notou-se que não há uma correlação entre a quantidade de Mo e o comprimento dessas trincas. A maior possibilidade de ocorrer trincamento por solidificação da camada refundida não implica em sensível mudança do comprimento das trincas.

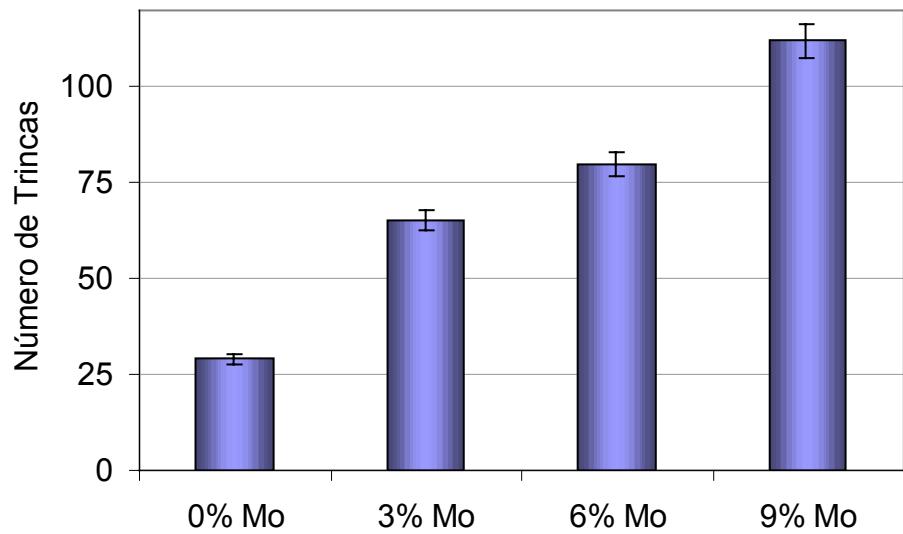


Figura 3. Número de trincas em cada tipo de liga (microscópio ótico).

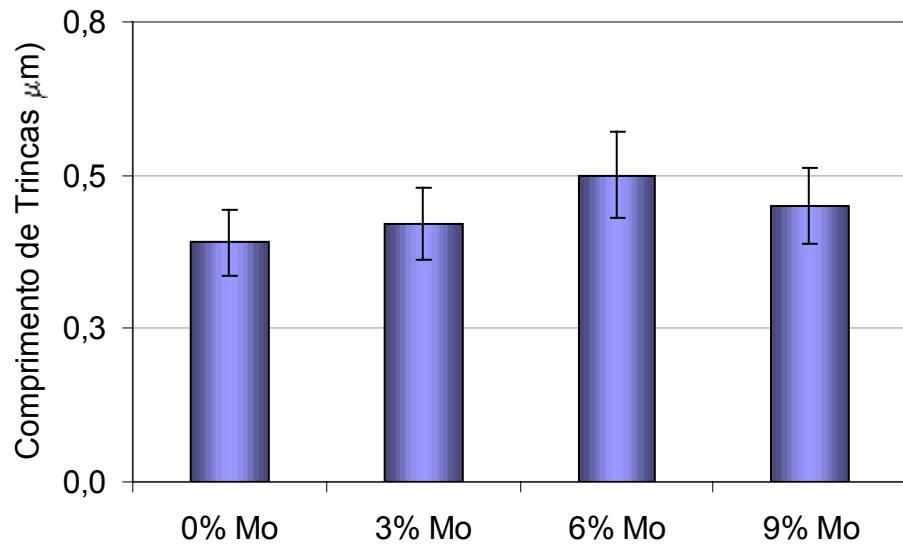


Figura 4. Comprimento de Trincas em cada liga (microscópio ótico).

Na análise da espessura da camada refundida realizada com o microscópio ótico (Figura 5), não há diferenças significativas para as três primeiras ligas (0%, 3% e 6%Mo). Entretanto, para a liga com 9% de Mo, a espessura da camada branca salta de uma média de $0,13\mu\text{m}$ para $0,45\mu\text{m}$, e esse efeito pode ser explicado pelo ponto de fusão da liga, pois quanto seu valor, mais próximas do ponto de solidificação estarão as gotas de material fundido, o que aumenta a quantidade de material que volta a se solidificar por sobre a superfície já usinada, aumentando assim, a espessura da camada refundida. Esse efeito parece ser significativo somente quando a quantidade de molibdênio supera os 6 ou 7%. Seria necessário a preparação de novas ligas, talvez 12% e 14% de Mo para se estabelecer uma relação mais confiável quanto sua influência na espessura da camada refundida. Como se sabe, a presença da camada branca é praticamente inevitável no processo EDM. O que se procura fazer é controlar essa redeposição de material, levando a níveis aceitáveis, principalmente quando se usina peças que sofrerão desgaste abrasivo ou erosivo.

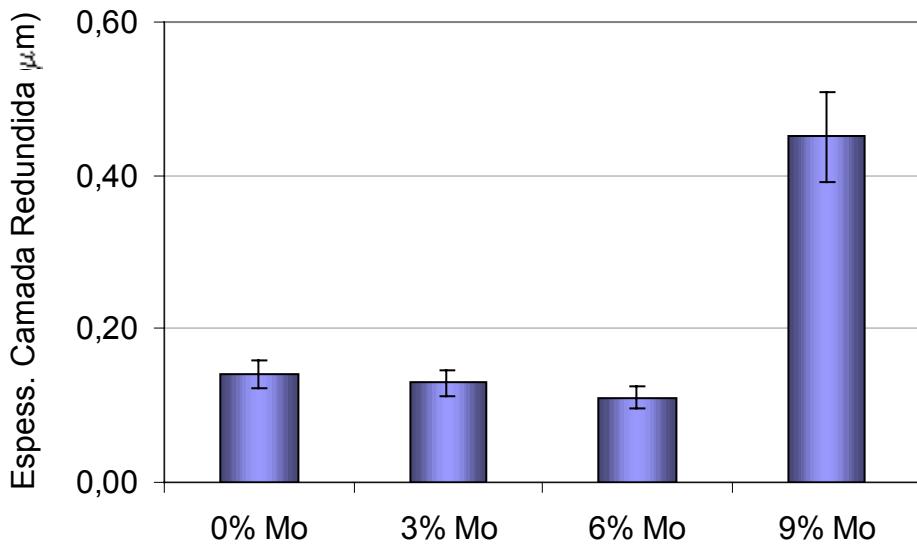


Figura 5. Espessura da camada refundida (Microscópio ótico).

Na Figura 6, encontra-se os resultados para rugosidade média aritmética obtida pelo interferômetro laser. Observa-se que não há grande influência da quantidade de Molibdênio na rugosidade Ra. O maior ponto de fusão da liga com maiores percentuais de Mo não modifica significamente a rugosidade da superfície usinada.

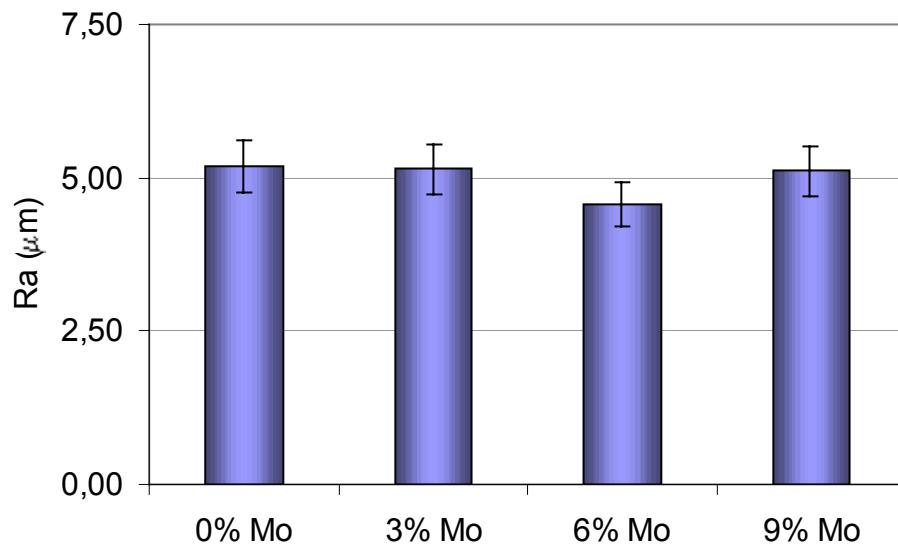


Figura 6. Rugosidade média aritmética medida por Interferômetro Laser, área: 1 mm^2 ; eixo primário: 1000 pontos; eixo secundário: 100 pontos; velocidade de leitura: 0,5 mm/s.

Tabela 3. Resultado das leituras de rugosidades Ra e Rq para as quatro ligas de Ferro Fundido Branco ao Molibdênio obtidas pelo Interferômetro Laser.

Medidas	0% Mo	3% Mo	6% Mo	9% Mo
Ra (μm)	5,19	5,14	4,56	5,11
Rq (μm)	6,77	6,64	5,86	6,5
Média (μm)	-0,28	-0,1	-0,09	0,06
K	4,59	3,88	3,84	3,25
Sk	0,82	0,53	0,56	0,26

Foram feitas leituras de dureza Hv para as amostras de ferro fundido branco alto cromo ao molibdênio, e os resultados são apresentados na Figura 7. Existe uma tendência marcante de crescimento da dureza quando se aumenta os percentuais de Mo, pois esse possui a característica de melhorar a resistência da superfície a fenômenos de lascamento, corrosão localizada, trincamento pelo calor e efeitos semelhantes, que são características quase sempre ligadas à maior dureza superficial do material.. Para melhor ilustrar essa clara tendência de crescimento da dureza superficial da camada branca, que segue aproximadamente o valor da dureza do material de base, considerando que o processo EDM nesse caso não modificou seus valores, mostra-se no gráfico da Figura 7 uma curva de tendência e sua equação ($y = 65,3x + 263$). Trata-se de uma curva de tendência praticamente linear, mas é claro que se trata de uma curva teórica, e possivelmente para valores em torno de 12 à 20% de Mo a tendência se inverta, fazendo com que a dureza caia.

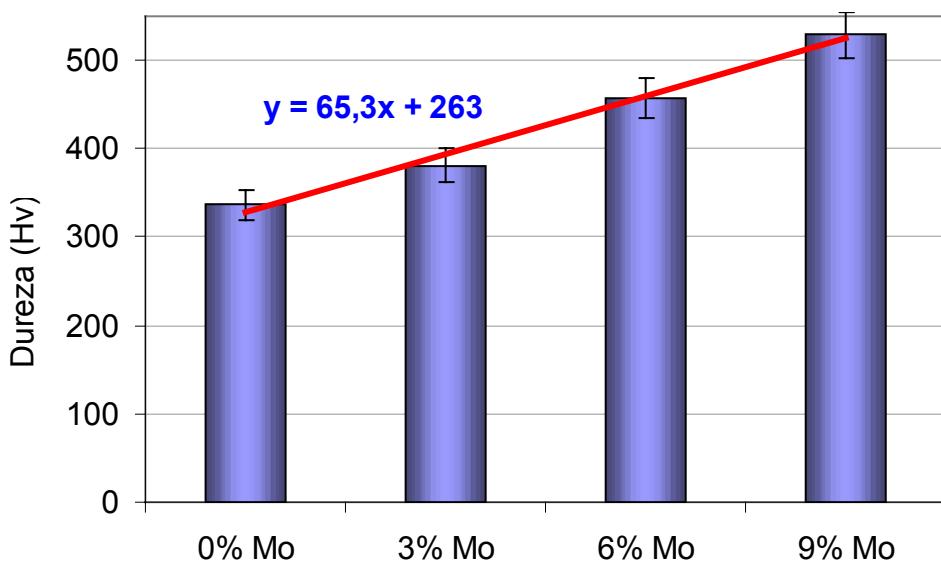


Figura 7. Dureza Vickers das amostras para cada liga (Marcodurômetro), com curva de tendência ($y = 14,5x + 352,5$).

5. CONCLUSÕES

- ◆ Não se consegue usinar com altas potências ligas de ferro fundido branco alto cromo pois o processo praticamente fica estagnado, sem avanço da ferramenta. Isso se deve à grande quantidade de carbono associada ao ferro em forma de Fe₃C, pois seu ponto de fusão é bem alto, e devido às altas temperaturas geradas pelo processo, o carbono se desprende das moléculas de ferro, formando na superfície usinada um acúmulo de “carvão”, que age como camada “passivadora”, impedindo que descargas uniformes ocorram. Portanto, os parâmetros escolhidos para usinagem de tais ferros fundidos são bem específicos e não permitem grande margem de variação;

- ◆ Há uma clara relação entre o número de trincas na camada refundida e o percentual de Molibdênio; quanto maior a quantidade de Mo, maiores serão a quantidade de trincas numa mesma área de análise. Este fenômeno deve-se ao fato de que durante o resfriamento da camada refundida, ocorre maior fragilização devido à maior dureza que o Mo em maior quantidade dá ao material, e portanto, maior o número de trincas superficiais;

- ◆ A maior possibilidade de ocorrer trincamento por solidificação da camada refundida não implica em sensível mudança do comprimento das trincas;

- ◆ A liga com 9% de Mo apresentou camada refundida com espessura muito maior que das outras ligas. Esse fato pode ser explicado através do ponto de fusão médio da liga, que é bem maior

nesse caso do que nos outros (0%-6%), onde mais próximas do ponto de solidificação estarão as gotas de material fundido, o que aumenta a quantidade de material que volta a se solidificar por sobre a superfície já usinada, aumentando assim, a espessura da camada refundida.

◆ Não há grande influência da quantidade de Molibdênio na rugosidade Ra das quatro ligas testadas. O maior ponto de fusão da liga com maiores percentuais de Mo não modifica significamente a rugosidade da superfície usinada.

◆ Existe uma tendência marcante de crescimento da dureza quando se aumenta os percentuais de Mo, pois este possui a característica de melhorar a resistência da superfície a fenômenos de lascamento, corrosão localizada, trincamento pelo calor e efeitos semelhantes, que são características quase sempre ligadas à maior dureza superficial do material.

Fazendo-se uma análise geral da influência do Molibdênio na qualidade superficial do ferro fundido branco alto cromo, deve-se tomar cuidado quanto à adição de Mo, que por um lado aumenta consideravelmente a dureza do material e resistência ao desgaste, quanto usinados por EDM, produz superfícies com camada branca muito espessas e com grande número de microtrincas.

6. AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos à CST (Companhia Siderúrgica de Tubarão), à Capes, ao CNPq, ao LTM (Laboratório de Tribologia e Materiais) da Universidade Federal de Uberlândia, à Ana Elisa Gomes, Flávia Cavalcanti de Miranda e Sílvia Nascimento Rosa por todo apoio na realização desse trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Arantes, L.J., 2001; “Performance Evaluation of Dielectric Fluids for Electrical Discharge Machining Process”, Master’s Dissertation, Federal University of Uberlandia, MG-BR / MIT (Massachusetts Institute of Technology), MA, USA.
- Allison, Sam; 2000, “The Case For Additive Technology In EDM”, ONLINE ARTICLE From the Editorial Staff of Modern Machine Shop. Internet address: www.mmsonline.com/articles
- Benedict, G. F.; 1987, “Nontraditional Manufacturing Processes”, New York, Marcel Dekker, pp.207-246.
- Bhattacharyya, A.; 1973, “New Technology, Hooghly Printing Company”, Calcutá, pp. 144- 177.
- Chiaverini, V., 1988, “Aços e Ferros Fundidos; Editora da Associação Brasileira de Metais”, pp. 485-492.
- Cruz, C., Malaquias, E.S., Fernandes, L.A., 1999, “Introdução à Usinagem Não Tradicional”, DEEME, UFU, Uberlândia-MG, pp. 7-19.
- EDM Today, January/February 1999, Issue, “The Electrodes Tell the Story”. Internet address: www.edmtoday.org
- Fernandes, A. Luciano; 1999, “Efeito da Adição de Pó de Carboneto de Silício nos Fluidos Dielétricos Sobre o Desempenho da Usinagem por Descargas Elétricas do Aço-Rápido ABNT M2”, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 72 págs.
- Fuller, J.E., 1989, “Electrical Discharge Machining, Metals Handbook”, 9^a Ed. Vol. 16, machining, pp. 557-564.
- Guitral, E.B., 1997, “The EDM Handbook”, Hanser Gardner Publication, Cincinnati, 306 pp.
- Intech EDM, 1996, “A Guide to Understanding and Selecting EDM Dielectric Fluids”, Broadview, IL.
- König & Dauw, D. F., 1998, “Estudo de um Sistema por Penetração em meio Aquoso”, São Paulo, Revista Máquinas & Metais, Aranda Editora – Ano XXXIV, Dezembro, n.º 395, pp. 20-27.
- Kurafuji, H. & Suda, K., 1965, “Study on Electrical Discharge Machining”, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo, Vol. XXVIII, No 1, pg., 1-18.

- Lima, E.F., 1997, "Rugosidade e Integridade Superficial do Aço Rápido ABNT M2 Após Usinagem por Descargas Elétricas", Dissertação de mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 97 pgs.
- McGeough, J.A.; 1988, "Advanced Methods of Machining, London", Chapman and Hall, pp.128-152.
- Medeiros, J.T.N; 1985, "Aspectos Termodinâmicos do Processo de Usinagem por Eletroerosão", VIII COBEM, S. J. Campos, SP.
- Rodrigues, J.R.P., 1999, "Efeito da Adição de Carboneto de Silício em Pó na Geração de Microtrincas e na Topografia da Superfície Usinada por Descargas Elétricas do Aço Rápido ABNT M2", Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 47 pgs.

8. DIREITOS AUTORAIS

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

SUPERFICIAL MODIFICATIONS PRODUCED BY ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF HIGH CROMIUM WHITE CASTING IRON LINKED TO MOLYBDENUM

Alberto Arnaldo Raslan - ltm-raslan@ufu.br
Jorge Francisco Costa Brasil - costabrasil@mec.ufu.br
Cintia Nunes Braga Regattieri - cregattieri@hotmail.com
Luciano José Arantes - ljarantes@mecanica.ufu.br
Cherlio Scandian - cherlios@npd.ufes.br
José Daniel Biasoli de Mello - ltm-demello@ufu.br

Federal University of Uberlândia – Faculty of Mechanical Engineering - Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1M - Uberlândia - MG - 38400-902

Abstract. *The electrical discharge machining (EDM) process can machine hard and fragile materials that are very difficult to be processed by traditional machining. This process can produce complex geometry with good dimension precision and maintenance of the material integrity. This paper has as objective evaluate the machinability by EDM process of with cast iron linked with 28% of chromium (Cr) and different amount of molybdenum (Mo). Was used an Engemac 440 NC equipment, copper electrode, semi-finish regimen and Tutela Meca Fluid 90EE dielectric fluid. The workpieces, with parallel faces, were gotten from casting blocks cut with CBN disc, rectified and stoned. The metal removal rate (MMR) was obtained from four workpieces. Microstructure modifications were analyzed by optical microscopy, and the results were number of microcracks, length of microcracks and thickness of recast layer. The results shown that, differently of the machining of standard and high linked steels, it's not possible to machine with high parameters of machining because the white casting iron has great amount of carbon and this produces such a deposit of this excessive carbon, which hinders the good flushing on the machining area, stopping the process. The addition of molybdenum does not change significantly the metal removal rate (MMR) of the workpieces tested. However, the addition of Mo changes some important surface characteristics as hardness, number of microcracks, length of microcracks and thickness of recast layer, and all of them increase with the addition of Molybdenum.*

Keywords: EDM, Hardness, White casting iron and MRR.