

ESTUDO DO DESEMPENHO DE ELETRODOS DE LATÃO, BRONZE, ALUMÍNIO, COBRE E GRAFITE NA ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO ¹

Gustavo Maiochi Mendonça²

Alceri Antônio Schlotefeldt³

Vilmar José Senge⁴

Resumo

O processo de usinagem por eletroerosão caracteriza-se pela eliminação de material através de descargas elétricas entre um eletrodo e a peça através de um fluido dielétrico. A principal vantagem da eletroerosão por penetração é sua capacidade de usinar metais ou ligas com elevada dureza e também a reprodução automática de formas complexas e dimensões pequenas. O objetivo deste estudo é analisar o desempenho de eletrodos de latão, bronze, alumínio, cobre e grafite quanto à taxa de remoção, desgaste e rugosidade superficial na usinagem do aço AISI P20 tratado termicamente. Os parâmetros de eletroerosão por penetração serão mantidos constantes, sendo: potência (TS), tempo de descarga (Ton), tempo de pausa (Toff) e sensibilidade da usinagem. O estudo dos resultados de desgaste foi feito através de análise dimensional, a taxa de remoção de material por meio de cálculo de volume removido e a rugosidade superficial da usinagem por meio de rugosímetro. Neste estudo verificou-se que os eletrodos de latão, bronze e alumínio foram menos eficientes na profundidade de erosão do que os convencionais eletrodos de cobre e grafite. No entanto, as rugosidades das cavidades usinadas com os eletrodos alternativos foram inferiores, além de possuírem boa usinabilidade para a sua construção.

Palavras-chaves: Eletroerosão por penetração; Desgaste; Taxa de remoção; Rugosidade superficial.

STUDY OF BRASS, BRONZE, ALUMINUM, COPPER AND GRAPHITE ELECTRODE PERFORMANCE ON ELECTRIC DISCHARGE MACHINING PROCESS

Abstract

Electric discharge machining process consists of metal removal by electrical discharges between electrode and piece, both dipped in a dielectric fluid. Main advantages of electric discharge machining are the ability to machine high hardness metal and its alloys and automatic reproduction of complex and small sizes shapes. Aim of this study is to analyze brass, bronze, aluminum and graphite electrode performance relative to metal removal rate, wear and surface roughness on treated AISI P20 steel. Electric discharge machining parameters such as power (TS), discharge time (Ton), pause time (Toff), machining sensitivity were kept constant. Wear result study was carried out taking into account dimensional analyze, material removal rate by evaluating the removed volume and measuring machined surface roughness by a stylus instrument. This work showed that brass, bronze and aluminum electrodes obtained lower performance if compared to copper and graphite electrodes, however, in addition to their better manufacturing machinability; non conventional electrodes got lower surface roughness.

Key words: Electric discharge machining; Wear; Removal rate; Surface roughness.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Graduado Tecnólogo em Eletromecânica, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, R. Arno Waldemar Döhler 957, 89218-155 - Joinville - Santa Catarina

³ Mestrando em Educação, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

⁴ Especialista em Gestão Estratégica em Recursos Humanos, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

INTRODUÇÃO

O crescimento industrial verificado nos últimos anos na indústria metalmeccânica gerou uma maior competitividade e processos de fabricação mais complexos. Esta evolução industrial proporcionou um considerável aumento de pesquisas de novas tecnologias e processos mais eficientes e de menor custo, objetivando produtos com maior qualidade e eficiência.⁽¹⁾

Atualmente, existem muitas tecnologias que podem ser utilizadas para a produção de peças pequenas, sendo necessário, portanto, baixa taxa de remoção e alta precisão. São alguns processos que vem sendo utilizados: eletroerosão por descargas elétricas, usinagem ultra-sônica, usinagem por feixe de laser, usinagem por feixe iônico, usinagem eletroquímica e usinagem por feixe de elétrons.⁽²⁾

Diante desta evolução dos processos de fabricação, a eletroerosão por penetração tem surgido como uma tecnologia muito eficiente para a reprodução de cavidades complexas e usinagem com precisão em diferentes tipos de materiais, tais como: aços endurecidos, materiais cerâmicos e outros materiais com condutividade elétrica.⁽³⁾

Na eletroerosão por penetração, o cobre e a grafite são os principais materiais utilizados na construção dos eletrodos. No entanto, estes materiais possuem certas limitações, o primeiro é dúctil, o que dificulta sua usinagem. A grafite, material amorfo e condutor de eletricidade,⁽⁴⁾ quebra com facilidade quando são reproduzidos eletrodos com dimensões pequenas e, principalmente, libera um pó fino que pode danificar os painéis eletrônicos e componentes das máquinas no momento da sua usinagem.

Entre os objetivos deste estudo, o principal é analisar o desempenho de eletrodos de latão, bronze e alumínio quanto à taxa de remoção, desgaste, rugosidade superficial e precisão da usinagem em comparação com os convencionais eletrodos de cobre e grafite. Ainda se busca uma maior compreensão do fenômeno de eletroerosão por penetração quanto ao desempenho dos eletrodos e qualidade da usinagem, uma vez que os materiais bibliográficos sobre eletroerosão são escassos, dificultando o acesso e a difusão de novas técnicas dos processos.

Serão ainda objetivos específicos deste estudo: conhecer o desempenho dos materiais selecionados para o desenvolvimento do estudo; aquisição dos materiais necessários; usinagem dos eletrodos; realização dos ensaios de eletroerosão por penetração; avaliação da viabilidade técnica e econômica do uso de materiais alternativos para a construção de eletrodos; estudos dos resultados obtidos; divulgação dos resultados; aplicação didática dos resultados nas dependências da Faculdade de Tecnologia Senai Joinville.

Neste estudo, portanto, se pretende ensaiar eletrodos alternativos de latão, bronze e alumínio e comparar o desempenho com os eletrodos convencionais de cobre e grafite, com o objetivo de facilitar a usinagem, diminuir custos de fabricação e, posteriormente, utilizar os resultados obtidos para fins didáticos nos laboratórios da Faculdade de Tecnologia Senai Joinville e ainda divulgar para a comunidade em geral.

MATERIAL E MÉTODOS

Para os ensaios de eletroerosão por penetração propostos neste estudo, serão usinados eletrodos de diâmetros circulares dos seguintes materiais: latão, bronze, alumínio, cobre e grafite. O material base para o processo de eletroerosão será o aço AISI P20 tratado termicamente, cuja composição química é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química média do aço AISI P20.

Aço	C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)
AISI P20	0,38	1,47	0,31	1,82	0,24	0,94

O aço AISI P20 utilizado neste estudo como material base para a eletroerosão, foi fornecido na forma de placa quadrada (com espessura de 13 mm) no estado beneficiado com dureza de 28 HRC (150 Kgf). O aço foi tratado termicamente sob condições de têmpera a 860°C e revenimento a 560°C durante duas horas obtendo dureza final de 46 HRC. Após os procedimentos de tratamento térmico, a placa do material base foi retificada em aproximadamente 2 mm para acabamento da sua superfície.

Os materiais dos eletrodos usados neste estudo foram fornecidos em barras redondas e foram usinados 3 eletrodos de cada material em um torno convencional com as seguintes medidas: 20 mm de comprimento e 12 mm de diâmetro. Após o torneamento das amostras foram feitas as identificações dos eletrodos para cada tipo de material: I, II e III. Para o processo de eletroerosão foi confeccionada uma haste de aço para facilitar a troca dos eletrodos durante os ensaios propostos.

Na Tabela 2 estão as composições químicas médias dos materiais utilizados como eletrodos neste estudo, sendo a composição da grafite em torno de 77% de carbono.

Tabela 2. Composição química média dos materiais:

Latão	Bronze	Alumínio	Cobre
- cobre: 67% - zinco: restante	- cobre: 70% - estanho: 4% - zinco: 9% - chumbo: 20%	- liga 6351 (magnésio – silício)	- cobre (+prata): 99,9%

Os ensaios deste estudo foram realizados nos laboratórios da Faculdade de Tecnologia Senai Joinville em máquina de eletroerosão por penetração Engemaq NC40A, onde os parâmetros de usinagem serão mantidos fixos da seguinte forma:

- Potência: 4 TS (aproximadamente 14 ampéres);
- Tempo de descarga (Ton): 200 μ s;
- Tempo de pausa (Toff): 92%;
- A sensibilidade e o *gap* (folga) da usinagem serão mantidos fixos;
- Tempo de erosão foi mantido em 5 minutos para todos os ensaios.

O processo de eletroerosão por penetração foi realizado com lavagem sob pressão e com o sistema eletrodo-material base submerso, utilizando-se de óleo mineral hidrocarbônico como fluido dielétrico.

As análises dos resultados serão feitas por meio de estudos dimensionais do desgaste dos eletrodos, cálculo do volume de material removido das cavidades para determinar a taxa de remoção da erosão e a rugosidade superficial dos eletrodos e das cavidades através de ensaios com rugosímetro. Para todos os eletrodos (antes e depois da eletroerosão) e as cavidades, foram feitas 3 medidas de rugosidade Ra e depois foi feita a média dos valores, com o objetivo de se obter uma maior confiabilidade dos resultados.

RESULTADOS

Objetivando o condicionamento da microestrutura do material base e um aumento da sua dureza para a posterior eletroerosão, foram feitos tratamentos térmicos de têmpera e revenido, proporcionando ao aço AISI P20 dureza final de 46 HRC.

Depois de concluída a etapa de usinagem dos três eletrodos para cada um dos cinco materiais (totalizando 15 eletrodos) foi feita uma análise da rugosidade Ra inicial, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Média da rugosidade Ra inicial para cada tipo de eletrodo:

Eletrodo:	Latão	Bronze	Alumínio	Cobre	Grafite
Rugosidade inicial:	0,38 μm	0,40 μm	0,98 μm	0,43 μm	2,41 μm

Na Tabela 4 estão os resultados das rugosidades Ra (medidas em μm) dos eletrodos de latão, bronze, alumínio, cobre e grafite após os três ensaios propostos neste estudo. Na Tabela 5 estão dispostos os resultados das rugosidades verificadas nas cavidades erodidas.

Tabela 4. Rugosidade Ra dos eletrodos utilizados neste estudo após os ensaios:

Latão		Bronze		Alumínio		Cobre		Grafite	
Ensaio	Ra (μm)	Ensaio	Ra (μm)	Ensaio	Ra (μm)	Ensaio	Ra (μm)	Ensaio	Ra (μm)
I	2,38	I	2,80	I	4,78	I	1,54	I	1,88
II	3,10	II	3,27	II	5,25	II	1,92	II	1,88
III	2,61	III	2,95	III	4,50	III	1,78	III	2,00
Média:	2,69	Média:	3,00	Média:	4,84	Média:	1,74	Média:	1,92

Tabela 5. Rugosidade Ra das cavidades do aço AISI P20 após eletroerosão:

Latão		Bronze		Alumínio		Cobre		Grafite	
Ensaio	Ra (μm)	Ensaio	Ra (μm)	Ensaio	Ra (μm)	Ensaio	Ra (μm)	Ensaio	Ra (μm)
I	5,19	I	3,00	I	7,28	I	7,32	I	6,69
II	3,68	II	3,03	II	7,91	II	6,93	II	8,25
III	4,32	III	3,36	III	6,31	III	7,51	III	6,82
Média:	4,39	Média:	3,13	Média:	7,16	Média:	7,25	Média:	7,25

Através da análise dimensional dos eletrodos por meio de medições com paquímetro, foram feitas comparações entre os tamanhos iniciais dos eletrodos e os finais, após os ensaios de eletroerosão. Tendo como base estas medidas, foram feitos cálculos para determinar o desgaste dos eletrodos, conforme disposição dos dados na Tabela 6.

Tabela 6. Desgaste dos eletrodos (%) após ensaios de eletroerosão:

Eletrodo:	Latão	Bronze	Alumínio	Cobre	Grafite
Desgaste:	0,55 %	0,49 %	0,25 %	0,05 %	0,10 %

Depois de concluída as etapas de medições das cavidades erodidas durante os ensaios, foram feitos os cálculos dos volumes de material removido durante o processo. Na Tabela 7 se encontram os valores e as respectivas médias gerais de volume removido para cada uma das cavidades.

Tabela 7. Volume removido das cavidades durante o processo de eletroerosão:

Latão		Bronze		Alumínio		Cobre		Grafite	
Ensaio	V (mm ³)								
I	19,29	I	23,34	I	9,67	I	37,70	I	43,41
II	19,79	II	23,91	II	12,48	II	57,69	II	43,48
III	21,84	III	23,99	III	10,85	III	44,67	III	43,55
Média:	20,30	Média:	23,74	Média:	11,00	Média:	46,68	Média:	43,48

Na Figura 1 são apresentadas as micrografias dos eletrodos de latão, bronze, alumínio, cobre e grafite após o processo de eletroerosão. Os eletrodos foram submetidos à limpeza por ultra-som para retirada do excesso de carvão dos ensaios. A análise foi feita através de microscópio óptico com aumento de 200X, com o objetivo de evidenciar a superfície dos eletrodos para posterior análise.

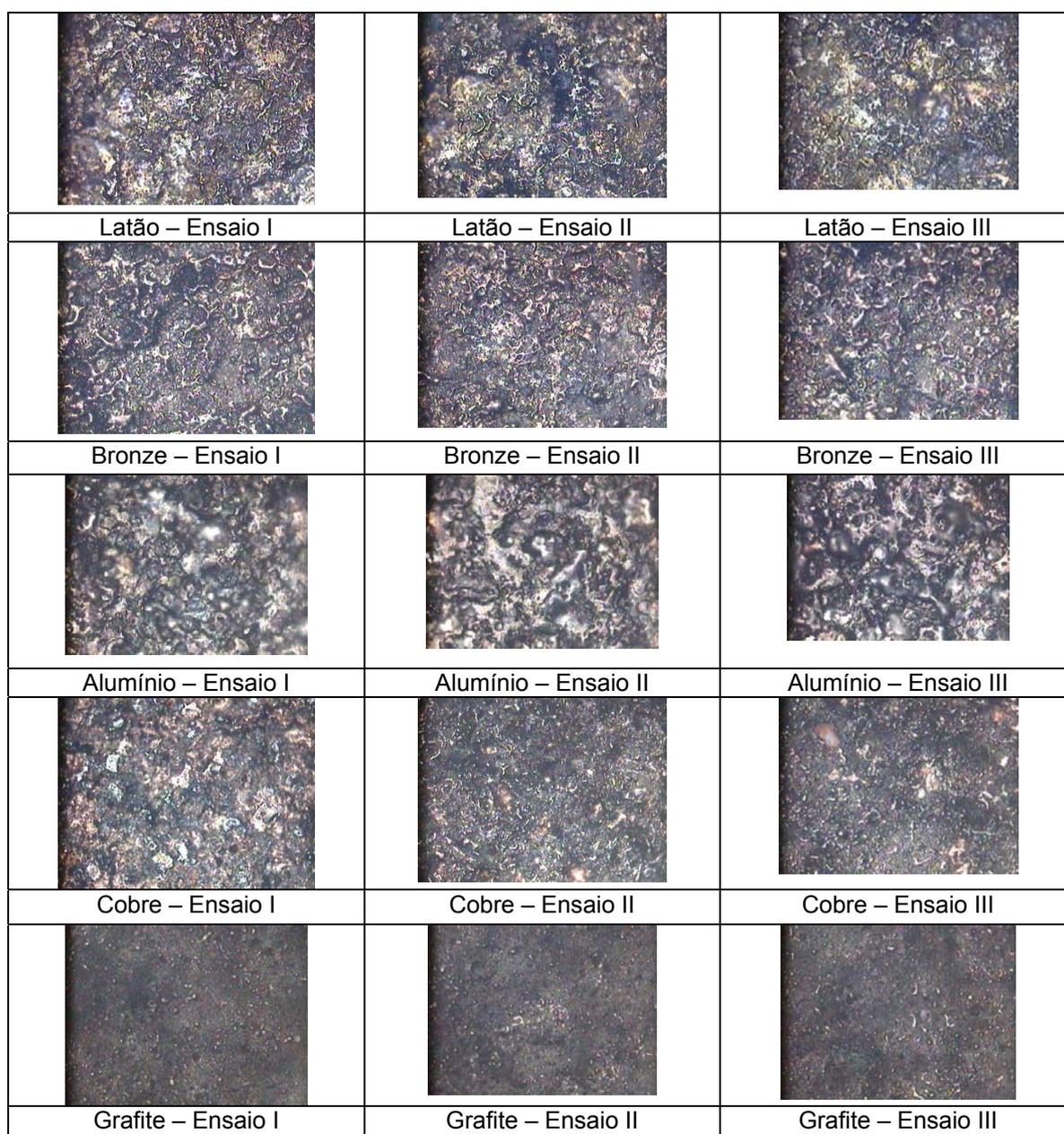


Figura 1. Micrografias dos eletrodos após os ensaios de eletroerosão por penetração, aumento de 200X.

DISCUSSÃO

Na conclusão dos ensaios com os eletrodos e depois de feita a análise dos resultados obtidos, verificou-se que o melhor desempenho, no que diz respeito à taxa de remoção, foi obtido com os eletrodos de cobre seguido dos eletrodos de grafite, em seguida vieram os alternativos eletrodos de bronze, latão e alumínio.

Na realização da análise do volume removido nos ensaios com os eletrodos de cobre, a taxa de material removido por minuto, também foi superior aos eletrodos alternativos e aos eletrodos de grafite. O valor da taxa de remoção de material por minuto para os eletrodos de cobre foi de $9,34 \text{ mm}^3/\text{min}$, em seguida a grafite com $8,70 \text{ mm}^3/\text{min}$. Os eletrodos alternativos de latão, bronze e alumínio tiveram taxas de remoção de $4,04 \text{ mm}^3/\text{min}$, $4,75 \text{ mm}^3/\text{min}$ e $2,20 \text{ mm}^3/\text{min}$, respectivamente.

Conseqüentemente, o volume total de material erodido nos ensaios de eletroerosão, durante um tempo de cinco minutos, ficou disposto da seguinte forma decrescente: cobre ($46,68 \text{ mm}^3$), grafite ($43,48 \text{ mm}^3$), bronze ($23,74 \text{ mm}^3$), latão ($20,20 \text{ mm}^3$) e alumínio ($11,00 \text{ mm}^3$).

Ao analisar os resultados de rugosidade nos eletrodos de grafite, observou-se que a sua rugosidade inicial foi maior que a rugosidade final ao processo de eletroerosão, ou seja, $2,41 \mu\text{m}$ no início e $1,92 \mu\text{m}$ no final. Isto se deve pelo fato de que os eletrodos de grafite não foram lixados após sua construção, uma vez que teriam um desgaste excessivo se tivesse sido feito algum procedimento de acabamento com lixa. Os eletrodos de latão, bronze, alumínio e cobre, pelo contrário, passaram pelo procedimento de lixamento para acabamento superficial antes dos ensaios de eletroerosão, obtendo as respectivas rugosidades para cada tipo de eletrodo: $0,38 \mu\text{m}$, $0,40 \mu\text{m}$, $0,98 \mu\text{m}$ e $0,43 \mu\text{m}$.

As rugosidades dos eletrodos após os ensaios de eletroerosão geralmente são maiores do que as rugosidades do início do processo. Isto se deve pelo fato do tipo de usinagem utilizada na construção dos eletrodos e também que, após a eletroerosão, os eletrodos apresentam regiões transformadas em carvão, deixando a superfície com maior rugosidade. Os resultados de rugosidade dos eletrodos ficaram assim dispostos: alumínio com $4,84 \mu\text{m}$, bronze com $3,00 \mu\text{m}$, latão com $2,69 \mu\text{m}$, grafite com $1,92 \mu\text{m}$ e, por último, cobre com $1,74 \mu\text{m}$.

Quando analisado os resultados dos ensaios de rugosidade das cavidades erodidas no processo, verificou-se que a média da rugosidade das cavidades usinadas com os eletrodos de cobre e grafite foram as maiores entre os materiais escolhidos para utilizar como eletrodos (em média $7,25 \mu\text{m}$), enquanto que a média das rugosidades das cavidades feitas pelos eletrodos de alumínio foi de $7,16 \mu\text{m}$, nos eletrodos de latão foi de $4,39 \mu\text{m}$ e nos eletrodos de bronze foi de $3,13 \mu\text{m}$.

A análise da alta rugosidade, encontrada na cavidade feita pelos eletrodos de cobre, pode ser explicada pela maior facilidade que este material tem para conduzir eletricidade e calor, ou seja, pela eficiência da descarga elétrica, isto acaba potencializando a quantidade de volume removido, proporcionando uma qualidade inferior na peça e uma rugosidade maior em função da remoção abrupta de material e melhor direcionamento da faísca na peça.

O baixo desempenho encontrado nos eletrodos alternativos de latão, bronze e alumínio quanto a taxa de remoção de material, em comparação aos eletrodos convencionais (cobre e grafite), se deve pelo fato destes materiais possuírem uma baixa condutividade elétrica e térmica, o que acarreta um faiscamento desigual e de potência inferior.

O faiscamento desigual (devido a ineficiente descarga elétrica) verificado nos ensaios com os eletrodos de latão, de bronze e, principalmente, de alumínio, acabaram determinando uma alta rugosidade final, além de produzirem nos eletrodos superfícies muito irregulares, com sulcos e porosidades. Os eletrodos de cobre e grafite, entretanto, tiveram baixa rugosidade e superfície regular, conforme Figura 1.

Ao estudar o desgaste dos eletrodos através de análise dimensional comparativa entre o início e o final dos ensaios, foi verificado que o desgaste dos eletrodos de cobre e grafite foram os menores: 0,05% e 0,10%, respectivamente. Nos eletrodos de latão foi obtido o maior percentual de desgaste: 0,55%, seguido de 0,49% de desgaste dos eletrodos de bronze e 0,25% nos eletrodos de alumínio.

CONCLUSÃO

- Com a conclusão deste estudo, verificou-se que os eletrodos de cobre e grafite possuem o melhor desempenho na eletroerosão quanto à taxa de remoção de material, visto que sua performance foi superior em termos de remoção de material erodido;
- Nos ensaios com os eletrodos de latão e bronze, entretanto, foram obtidas as menores rugosidades nas cavidades erodidas;
- Os convencionais eletrodos de cobre e grafite produziram cavidades com alta rugosidade em função da eficiência da descarga elétrica;
- Os eletrodos alternativos podem ser utilizados para fins didáticos nos laboratórios do Senai Joinville e até comerciais, uma vez que são de fácil aquisição e construção, além de possuírem custo inferior;
- Como os eletrodos convencionais de cobre e grafite removeram maior volume de material, poderiam ser utilizados para desbaste da peça a ser erodida e, posteriormente, poderia ser feito um acabamento superficial com os eletrodos alternativos, pois produziram cavidades com baixa rugosidade final;
- Quanto às percentagens de desgaste dos eletrodos, o cobre e a grafite foram as que menos tiveram desgaste: 0,05% e 0,10%, respectivamente.

Agradecimentos

Faculdade de Tecnologia Senai Joinville.

REFERÊNCIAS

- 1 SINGH, Shankar; MAHESHWARI, Sachin; DEY, Alope; PANDEY, Poorn Chandra. **An experimental study of die sinking electrical discharge machining of AISI D2 tool steel using different electrode materials**. Division of manufacturing Process and Automation Engineering. Netaji Subhas Institute of Technology, Dwarka, New Delhi, India.
- 2 MASUZAWA, Tomoya. **An approach to micromachining through Machine Tool Technology**. In: 2^{sd} International Symposium on Micro Machine and Human Sciences, 1991, vol. 1, pp 47-52.
- 3 AMORIM, Fred. **An experimental investigation on the performance of graphite versus copper electrodes on the finish EDM of tool steel**. In: 18th International Congress of Mechanical Engineering, 2005, Ouro Preto. Minas Gerais: ABCM, 2005.
- 4 ENGEMAQ. **Manual de Tecnologia**. Caxias do Sul: Engemaq Eletroerosão S/A, 1996.