

# DESEMPENHO DE ELÉCTRODOS PARA EDM EM COBRE/BRONZE OBTIDOS PELO PROCESSO DMLS

L. Esperto, M. Santos, A. Osório

[luis.esperto@ineti.pt](mailto:luis.esperto@ineti.pt); [mario.santos@ineti.pt](mailto:mario.santos@ineti.pt); [antonio.osorio@ineti.pt](mailto:antonio.osorio@ineti.pt)  
INETI/DMTP/UTP, Edifício C, Estrada do Paço do Lumiar, 1649-038 Lisboa



## RESUMO

*A maquinagem por electroerosão (EDM) de moldes e matrizes com geometria complexa exige o fabrico de eléctrodos, normalmente em cobre ou grafite, através de tecnologias convencionais como a frezagem e o torneamento. A maquinagem destas ferramentas requer normalmente o fabrico de vários eléctrodos para as diferentes operações de desbaste e acabamento o que aumenta o tempo de fabrico das ferramentas e o respectivo custo. A Sinterização Directa por Laser de Metais (DMLS) permite o fabrico de ferramentas de produção com elevada complexidade geométrica e rigor dimensional, a partir de um desenho CAD 3D, sendo a construção feita em camadas e numa única operação, através da sinterização de misturas pós metálicos por meio de um laser com elevada potência. Estas características poderiam permitir uma significativa redução de tempo e custos de fabrico de eléctrodos. A produção de eléctrodos pela tecnologia DMLS requer o desenvolvimento de novas misturas de pós metálicos com boa condutividade térmica e elevada temperatura de fusão. Uma nova mistura de pós (Cobre/Bronze) desenvolvida para o processo DMLS foi utilizada no fabrico de eléctrodos com diversos níveis de densidade e condutividade térmica. Estes eléctrodos foram testados em regime de desbaste na maquinagem do aço AISI H13 e o seu desempenho foi inferior ao dos eléctrodos convencionais de cobre electrolítico testados nas mesmas condições.*

## ABSTRACT

*Electrical discharge machining (EDM) of tools with complex geometry demands the production of electrodes, usually in copper or graphite, by conventional technologies like turning or milling. The machining of these tools requires multiple electrodes for roughing or finishing which increases both time and costs. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) enables the production, directly from a 3D CAD model, of accurate tool inserts or metal components; parts are built in layers in one single operation by sintering metal powder mixtures with a high power laser. Reduction of lead times and tooling costs could be achieved by the use of this technology to produce EDM electrodes. The production of EDM electrodes by DMLS requires the development of new metal powder mixtures with the good thermal conductivity and high melting point. A new powder mixture (Copper/Bronze) developed for the DMLS process was used on the production of EDM electrodes with different densities and thermal conductivities. The performance of those electrodes using roughing parameters for machining AISI H13 tool steel was very poor when compared with electrolytic copper electrodes tested on the same conditions.*

## 1. - INTRODUÇÃO

As tecnologias de prototipagem rápida permitem a construção por camadas a partir de um ficheiro CAD-3D de protótipos, modelos funcionais e ferramentas de produção com elevada complexidade geométrica numa única operação.

Tendo em consideração estes aspectos, cedo surgiu a ideia de utilizar estas tecnologias no fabrico de eléctrodos rápidos para electroerosão, uma vez que isso permitiria uma redução significativa de tempo e custos de fabrico associados à sua obtenção através das tecnologias convencionais de maquinagem e freamento [1, 2].

O processo DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*) é uma tecnologia de prototipagem rápida que permite o fabrico de protótipos funcionais e ferramentas de produção, a partir da sinterização de misturas de pós 100% metálicos por acção de um laser de CO<sub>2</sub> de 250W.

A produção de eléctrodos através desta tecnologia requer o desenvolvimento de misturas de pós metálicos que garantam uma boa eficiência e desempenho dos eléctrodos durante o processo de maquinagem. No caso presente estudou-se a aplicação de uma mistura de pós constituída por Cu, Cu/Sn11 e Cu<sub>3</sub>P ao fabrico dos eléctrodos rápidos pela tecnologia DMLS.

## 2 - FABRICO DE ELÉCTRODOS RÁPIDOS

As cadeias indirectas de fabrico de eléctrodos rápidos envolvem o recurso a tecnologias como a electrodeposição ou a infiltração de cobre ou ligas de cobre, para além da prototipagem rápida.

Uma das alternativas consiste em utilizar os modelos rápidos como *master* para o fabrico de uma casca de cobre por electrodeposição; os referidos modelos também podem servir de base à obtenção de um negativo em silicone ou poliuretano que é revestido com cobre por electrodeposição. Para se obter o eléctrodo é necessário preencher o interior da casca de cobre com

um metal ou liga de baixo ponto de fusão [3].

Outra cadeia de fabrico consiste no revestimento de modelos SL (Estereolitografia) com cobre por electrodeposição; neste caso o modelo SL faz parte do eléctrodo [4].

O desempenho dos eléctrodos baseados em cascas de cobre preenchidas com metal ou resina é de uma forma geral inferior ao dos eléctrodos convencionais de cobre electrolítico.

Outro processo indirecto consiste em produzir os modelos por SLS (Sinterização Selectiva por Laser) a partir de pós cerâmicos (ZrB<sub>2</sub>) revestidos com um polímero e infiltrá-los com uma liga de cobre, de modo a obter-se o eléctrodo. O desempenho destes eléctrodos é similar ao dos eléctrodos convencionais de cobre ou de grafite [5].

A tecnologia DMLS está particularmente vocacionada para o fabrico directo de eléctrodos, uma vez que permite a obtenção de formas geometricamente complexas através da sinterização directa de misturas de pós metálicos.

No entanto, eléctrodos produzidos a partir da mistura de pós constituída por Níquel, Bronze e Cu<sub>3</sub>P não apresentaram bom desempenho, devido à elevada porosidade ( $\geq 20\%$ ) e baixa condutividade térmica [6, 7].

Por outro lado, eléctrodos produzidos a partir de uma mistura de pós constituída por WC e Cu/Ag apresentaram um desgaste elevado porque, embora apresentassem uma porosidade residual, a temperatura de fusão da liga de cobre era muito baixa [8].

Verifica-se assim que o comportamento à erosão por parte dos eléctrodos produzidos por DMLS a partir de misturas de pós metálicos é determinado pelo grau de porosidade, pela temperatura de fusão e pela condutividade térmica do material sinterizado. A optimização destas propriedades permitiria a este tipo de eléctrodos remover uma grande quantidade

de material da peça, sem apresentar um desgaste significativo.

### 3. - TECNOLOGIAS DE FABRICO

#### 3.1 - Sinterização Directa por Laser de Metais

As misturas de materiais utilizadas no fabrico de protótipos funcionais e ferramentas de produção pela tecnologia DMLS instalada no INETI são constituídas por metais ou ligas com composição química e temperatura de fusão distintas (Figura 1).

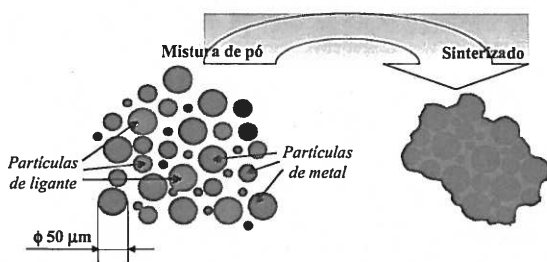


Fig. 1: Princípio de sinterização de pós.

A geometria da peça a construir encontra-se descrita num ficheiro stl que é posteriormente convertido num ficheiro de camadas sli para utilização na máquina de prototipagem.

O processo de construção do protótipo necessita de uma plataforma rígida de suporte, fabricada em aço e revestido com um material à base de fósforo, para melhor adesão do suporte e evitar reflexão do laser.

O pó é espalhado uniformemente formando uma camada fina na superfície da plataforma e a construção começa por um suporte em forma de grelha com 4mm de altura; após cada exposição do pó pelo laser, a plataforma de construção desce 50µm (uma camada) e o depósito de pó sobe para que uma nova camada de pó possa ser aplicada pelo distribuidor de pó (Figura 2).

A aplicação sucessiva das camadas de pó e respectiva sinterização repete-se até ser atingida a altura total da peça a construir. No final a peça é retirada por corte da placa de aço, na zona do suporte [9].

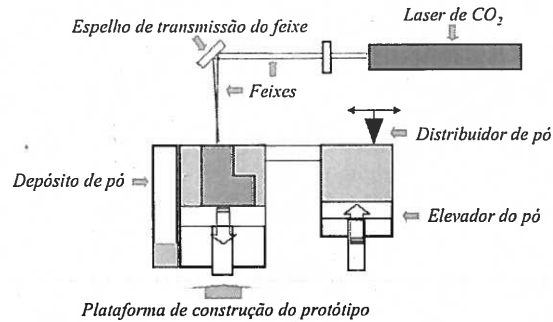


Fig. 2: Processo DMLS.

A densidade do material sinterizado depende da mistura de pós utilizada (composição química, distribuição granulométrica e forma das partículas, etc) e dos parâmetros do processo DMLS (potência do laser e velocidade e distância entre linhas de varrimento).

#### 3.2 - Maquinagem por Electroerosão

A maquinagem por electroerosão (EDM) baseia-se no princípio da remoção de material da peça, por meio de um processo termoelétrico.

As descargas eléctricas entre o eléctrodo e a peça, começam por ionizar o dieléctrico existente no espaço entre ambos (*gap*). Criam-se assim as condições eléctricas para que se estabeleça uma corrente uniforme e regular de descarga entre eles (Figura 3).

O material removido da peça sai do *gap* devido ao movimento de subida e descida do eléctrodo e à agitação do dieléctrico, normalmente um hidrocarboneto [10, 11]

Este processo origina o aparecimento de elevadas temperaturas à superfície da peça, promovendo a fusão e evaporação do material. Estes fenómenos criam as condições de erosão, com a conseqüente remoção do material pelo dieléctrico e solidificação rápida do material não removido da superfície (Figura 4).

Os sucessivos aquecimentos e arrefecimentos geram modificações microestruturais em profundidade com o conseqüente aumento da dureza. As tensões residuais resultantes dos gradientes térmicos produzem microfissurações perpendiculares à superfície maquinada [12, 13].

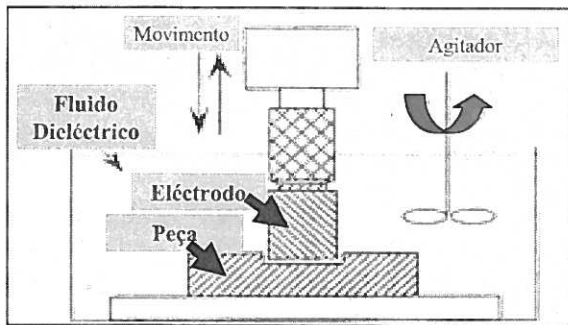


Fig. 3: Processo de EDM.

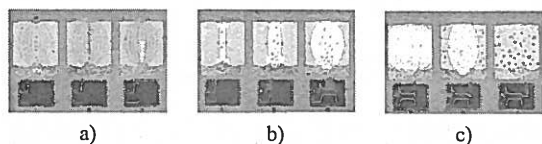


Fig. 4: Esquemas do processo de maquinação por electroerosão: a) ionização e formação do canal de descarga; b) bolhas de vapor em formação; c) colapso das bolhas e formação de crateras [9].

A superfície maquinação é constituída por crateras cuja dimensão e número é tanto maior quanto maior for a energia de descarga utilizada. Estas crateras estão na origem da rugosidade final da peça [10, 12].

Os parâmetros mais importantes do processo EDM são (Figura 5): a) tensão da corrente de descarga ( $V$ ); b) tensão de referência média ( $V_m$ ); c) intensidade da corrente ( $I$ ); d) tempo de ionização ( $t_z$ ); e) tempo de descarga ( $t_d$ ); f) tempo de pausa ( $t_o$ ).

A intensidade da descarga e a frequência da descarga influenciam a taxa de remoção de material e a rugosidade, estando o aumento de rugosidade associado ao aumento de intensidade de corrente e a uma diminuição da frequência.

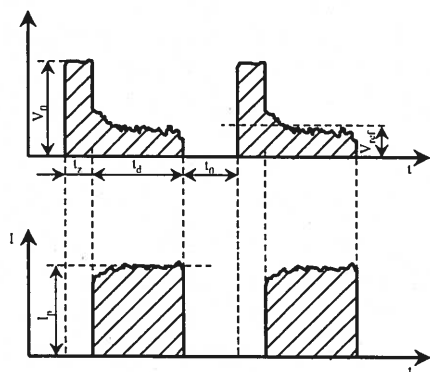


Fig. 5: Diagramas carga / descarga / pausa no EDM em função do tempo.

O desempenho do processo EDM é avaliado em termos da rugosidade ( $R_a$ ) da peça, da taxa de remoção de material (MRR) da peça e da razão de desgaste do eletrodo (TWR).

O que se apresentou acima são os princípios gerais do processo de electroerosão mas, como em todos os processos, os níveis dos parâmetros e os materiais utilizados influenciam os resultados, não havendo uma uniformidade e uma linearidade entre o pressuposto e o resultado quando estão em jogo parâmetros especiais, novos materiais e novos procedimentos.

#### 4.- DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

##### 4.1 - Mistura de Pós Cobre/Bronze

A mistura de pós identificada no trabalho por CB- Cobre/Bronze (Figura 6) é constituída por partículas de Cu, Cu/Sn e de  $Cu_3P$ .

Uma vez que o cobre apresenta um ponto de fusão não muito elevado e elevada condutividade térmica, características importantes para a boa eficiência de um eletrodo, o seu teor na mistura ascendeu a 93.2%.

Os resultados da caracterização da mistura de pós encontram-se na Tabela 1 e Figura 7.

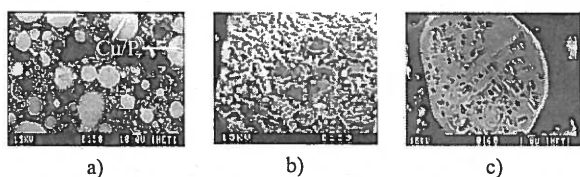


Fig. 6: a) Aspecto da mistura; b) Cu/Sn; c) Cu/P

Tabela 1: Caracterização da mistura de pós CB.

Área específica ( $m^2g^{-1}$ )	Densidade verdadeira ( $g.cm^{-3}$ )	Densidade batida ( $g.cm^{-3}$ )	Densidade aparente ( $g.cm^{-3}$ )
0.16	8.6	4.5	3.15
Escoabilidade (seg)	Porosidade (%)	Diâmetro médio ( $\mu m$ ) (FSSS)	Diâmetro médio ( $\mu m$ ) (CILAS)
não escoia	50	9.2	12.3

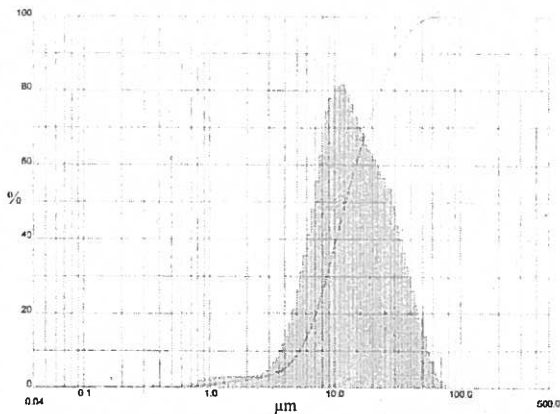


Fig. 7: Distribuição granulométrica do CB.

#### 4.2 - Fabrico dos Eléctrodos por DMLS

A geometria cilíndrica ( $\phi=20\text{mm}$ ;  $L=50\text{mm}$ ) dos eléctrodos foi concebida no formato STL no programa *Magics RP* e posteriormente convertido em ficheiro de camadas SLI de  $50\mu\text{m}$ .

A produção dos eléctrodos a partir do *CB* foi realizada na máquina de prototipagem rápida EOSINT M250 *Xtended*, tendo-se utilizado as combinações de parâmetros indicadas na Tabela 2; a potência do laser manteve-se constante em todos os ensaios (95%).

Tabela 2: Condições de produção dos eléctrodos.

Identificação do eléctrodo	Distância entre linhas de varrimento (mm)	Velocidade de varrimento (mm/s)
CB1.70	0.27	948
CB1.72	0.27	714
CB1.74	0.29	545
CB1.76	0.30	416
CB1.78	0.32	325
CB1.80	0.33	286
CB1.82	0.33	208
CB1.84	0.33	156

#### 4.3 - Material da Peça a Maquinar

O material seleccionado para ser maquinado por EDM foi um aço ferramenta do tipo AISI H13. É um aço ligado, com boa resistência mecânica, boa resistência à corrosão e boa estabilidade dimensional.

Tem um baixo teor em C (0.37%) e alguns elementos de liga preponderantes para a formação de carbonetos do tipo MC, como o Cr (5.3%), o Mo (1.4%) e o V (1%) (Tabela 3).

Tabela 3: Composição química do aço AISI H13.

Material	Composição Química (%)					
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
AISI H 13	0.37	1.00	0.40	5.30	1.40	1.00

O aço maquinado não tinha qualquer tratamento, apresentando por isso uma microestrutura constituída por ferrite e bainite (Figura 8).

#### 4.4 - Maquinagem por EDM

A selecção do regime de maquinagem por EDM aplicado nos ensaios dos eléctrodos de CB, teve como princípio a utilização de parâmetros para desbaste (Tabela 4), idênticos aos utilizados na maquinagem de aço com eléctrodo de cobre electrolítico. Foram ensaiados três eléctrodos por densidade e nas mesmas condições.

A máquina de electroerosão por penetração utilizada nos ensaios foi do tipo *ROBOFORM 2000* da *CHARMILLES TECHNOLOGIES*, com um fluido dieléctrico hidrocarbonetado.

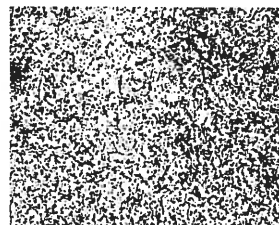


Fig. 8: Microestrutura do aço AISI H 13 formado por ferrite e bainite (Amp. 500X).

Tabela 4: Parâmetros de EDM

$V_0$ (V)	$V_{ref}$ (V)	$I_p$ (A)	$t_d$ ( $\mu\text{s}$ )	$t_0$ ( $\mu\text{s}$ )
200	25	12	50	12.8

### 5. – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores da densidade dos eléctrodos e correspondente condutividade térmica resultantes da aplicação dos parâmetros referidos na Tabela 2 encontram-se representados sob a forma de gráfico na Figura 9.

A energia fornecida ao material é tanto maior quanto menor é a velocidade de varrimento, uma vez que o tempo de permanência do laser em cada ponto aumenta. Por outro lado, a quantidade de energia disponível diminui quando a distância entre linhas de varrimento aumenta. Analisando os resultados verifica-se que o aumento da densidade resulta da diminuição da velocidade de varrimento, o parâmetro mais influente do processo; a distância entre linhas de varrimento não variou de forma significativa pelo que, a sua influência sobre a densidade não é relevante.

A condutividade térmica aumenta com a densidade (Figura 9); o aumento de 22% na densidade do CB induziu um aumento de 184% na condutividade térmica.

Os valores obtidos são muito inferiores ao do cobre electrolítico (380W/mK), devido não só à elevada porosidade do material (14% min.) mas também à presença de Sn e sobretudo P na composição da mistura de pós.

O aspecto do material sinterizado (densidade mínima e máxima), após preparação metalográfica adequada, permitiu identificar zonas de fusão e solidificação das diversas partículas da mistura e porosidade com forma e dimensões variáveis dependendo da energia fornecida ao material (Figura 10 e 11).

A aplicação dos eléctrodos à maquinagem por EDM permitiu verificar que à medida que a respectiva densidade aumenta, a taxa de remoção de material (MRR) aumenta e o desgaste do eléctrodo diminui (Figura 12).

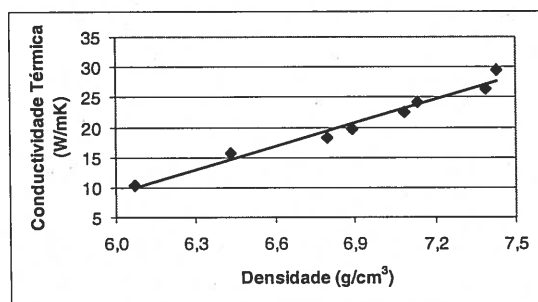


Fig. 9: Variação densidade vs condutividade térmica.

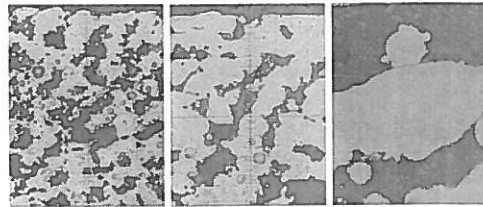


Fig. 10: Eléctrodo CB1.70 observado com diferentes ampliações- 50, 100 e 500X, respectivamente.

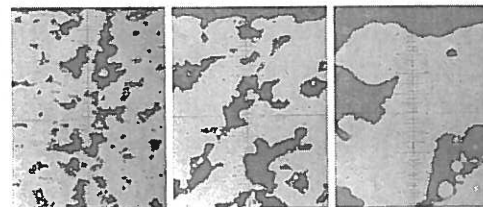


Fig. 11: Eléctrodo CB1.84 observado com diferentes ampliações- 50, 100 e 500X, respectivamente.

A taxa de desgaste dos eléctrodos é elevada, apesar de os valores absolutos serem pequenos, porque é determinada em função da taxa de remoção de material da peça (Fig. 13). O seu valor é tanto maior quanto menor é a densidade.

A evolução destes dois parâmetros com a densidade é a esperada, mas os seus valores são extremamente reduzidos devido à elevada porosidade do material sinterizado, à presença de compostos de baixo ponto de fusão e à baixa condutividade térmica.

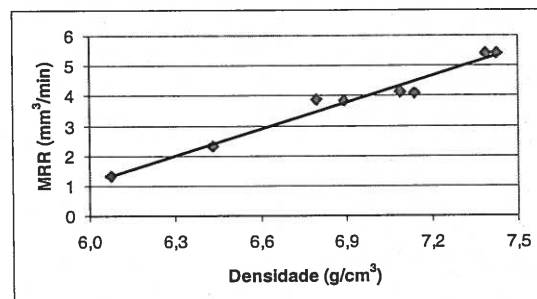


Fig. 12: Taxa de Remoção vs Densidade

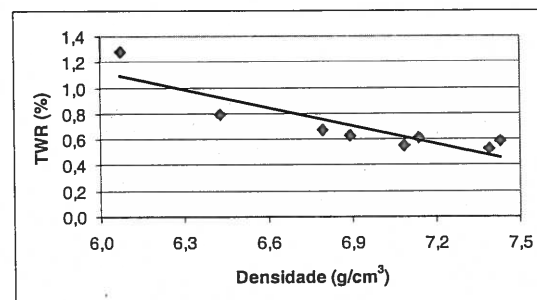


Fig. 13: Desgaste dos eléctrodos vs Densidade.

Quanto maior é a densidade do material sinterizado melhor é o acabamento do aço AISI H13. O efeito sobre o Rz é mais sensível do que no caso do Ra, como se pode observar no gráfico da Fig. 14.

À exceção da rugosidade (Ra), particularmente para as densidades mais elevadas, o desempenho destes eléctrodos revela-se bastante inferior ao dos eléctrodos convencionais de cobre electrolítico (MRR  $\approx 20\text{mm}^3/\text{min}$ ; TWR  $\approx 2\%$ ; Ra  $\approx 7\mu\text{m}$ ) para os mesmos parâmetros de maquinação [8].

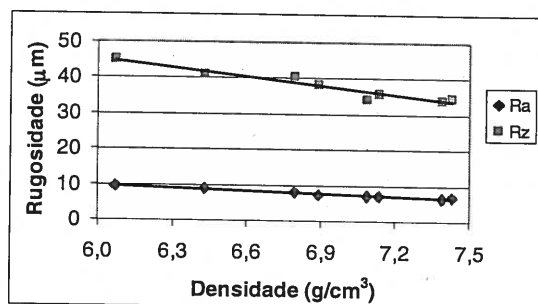


Fig. 14: Rugosidade das peças vs Densidade.

## 6. - CONCLUSÕES

As propriedades da mistura de pós Cobre/Bronze e os parâmetros utilizados no respectivo processamento pela tecnologia DMLS, deram origem a uma densidade relativa máxima de 86% e uma condutividade térmica máxima de 29.5W/mK. Estes resultados não permitiram um desempenho adequado dos eléctrodos produzidos a partir do referido material, face ao dos eléctrodos convencionais de cobre electrolítico ensaiados nas mesmas condições.

Apesar do seu elevado teor em cobre, a mistura de pós Cobre/Bronze não se revela adequada ao fabrico de eléctrodos para EDM pela tecnologia DMLS.

O aumento do desempenho de eléctrodos produzidos por DMLS a partir de misturas de pós baseadas em cobre passaria pela eliminação da porosidade e pela ausência de elementos que prejudicam a condutividade térmica.

## 7. - AGRADECIMENTOS

Os autores do trabalho agradecem a colaboração prestada pela EOS GmbH no que se refere ao fornecimento da mistura de pós e à AGILTEC no respeitante à execução dos ensaios de electroerosão.

## 8. - REFERÊNCIAS

- [1] Killander L., Holmer B., "EDM Electrodes Made by Rapid Prototyping", EARP Newsletter, nº 8 (1996) p. 3-5.
- [2] Albert M., "On the horizon: electrodes in a hurry", Modern Machine Shop, 1998.
- [3] Prasad, Y. [et al.], "Feasibility studies on the production of electro-discharge machining electrodes with rapid prototyping and the electroforming process", Jnl of Materials Processing Technology, Vol. 89-90 (1999) p. 231-237.
- [4] Arthur, A., Dickens, P. M., "Material Removal & Tool Wear Rates in EDM with Stereolithography Electrodes", Proc. 5<sup>th</sup> European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Finland, June, 1996, p. 157-169.
- [5] STUCKER, Brent E. [et al.], "A New Electrode Material Resistant to Spark Erosion", 12<sup>th</sup> International Symposium for Electromachining, Aachen, 1998, p. 279-288
- [6] Durr, H., [et al.] "Rapid tooling of EDM electrodes by means of selective laser sintering", Computers in industry, Elsevier, nº 39 (1999), p. 35-45.
- [7] Esperto L, [et al.], "SLS Electrode Tested in Electro Discharge Machining (EDM)", Technical Report, INETI, 1998.
- [8] Vassalo P., Esperto L., Osório A., "Development of EDM electrodes by the DMLS process", 2<sup>nd</sup> Progress Technical Report, September 1999
- [9] EOS GmbH, "Operating Manual EOSINT M250 Xtended", 2000.
- [10] Sémon G., "A Practical Guide to Electro-discharge Machining", EDM Charmilles, 2<sup>nd</sup> edition, Ateliers des Charmilles, Geneve, Chapter 9, pp. 63-76, 1975.
- [11] Technical staff of the Machining Data Center, "Machining Data Handbook", 3<sup>rd</sup> ed., Vol 2, Cincinnati, 1980.
- [12] Guitrau E. B., "The EDM Handbook", Hanser Gardner Publications, 1997.
- [13] Sanders M., "A Practical Guide to the Assessment of Surface Texture", FEINPRÜF Perthen GmbH, 1<sup>st</sup> Pub. 1989.

