



MODELO TECNOLÓGICO DE CUSTO PARA MAQUINAGEM POR ELECTRO-EROSÃO

PAULO PEÇAS¹, ANA MOTTA², ELSA HENRIQUES¹

Instituto Superior Técnico

¹ Secção de Tecnologia Mecânica, ² Engenheira Mecânica

Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

(Recibido 23 de marzo de 2004, para publicación 3 de junio de 2004)

Resumo – Os modelos tecnológicos de custo (MTC) são métodos determinísticos de análise que permitem suportar a avaliação económica de cadeias de produção alternativas, evitando os custos proibitivos de introduzir as novas soluções com base em métodos de tentativa e erro. Fundamentando-se numa interacção estruturada de variáveis económicas e tecnológicas relevantes auxiliam a estimativa dos custos potenciais de produção. Neste artigo um MTC é aplicado à fase de acabamento e de polimento de cavidades moldantes, geradas por EDM (maquinagem por electro-erosão) e polimento manual. Através dessa aplicação são delineadas as fronteiras relevantes do desempenho tecnológico e económico das tecnologias não apenas de uma forma isolada, mas considerando também as influências e sinergias entre as tecnologias numa perspectiva de cadeia produtiva.

1. INTRODUÇÃO

A ciência e a tecnologia têm evoluído no sentido de desenvolver novos produtos e processos. A necessidade, cada vez mais evidente, de reduzir em simultâneo o tempo e o custo de produção, como garantia do aumento da competitividade, num contexto em que cada vez mais alternativas se colocam em termos de produção, tem impulsionado novas abordagens no campo da estimativa e análise de custos. Cada etapa do processo de produção incorre em elementos de custo e é conhecido que a única forma de os controlar com eficácia exige que a economia do processo seja desde cedo um critério de selecção para as soluções de concepção. De facto, foi demonstrado que apesar de apenas 10-20% dos custos totais do produto serem originados na sua fase de concepção, 80% dos custos são efectivamente pré-determinados nessa fase [1].

Um elevado nível de robustez e de detalhe na estimativa de custos pode ser muito importante para uma avaliação rigorosa de alternativas tecnológicas e do seu impacto ao nível dos custos de produção. Várias técnicas têm vindo a ser propostas para estimar esses custos. As regras empíricas são baseadas no conhecimento e na sistematização da experiência, podendo originar estimativas do custo de produção de fácil compreensão e, por vezes, muito próximas do custo real dos componentes. Os métodos contabilísticos, muito dirigidos para objectivos de gestão, distribuem os custos totais por todos os produtos e operações recorrendo a algoritmos de imputação mais ou menos arbitrários. No entanto, em ambos os métodos é difícil atribuir os custos aos respectivos elementos que os geram e é quase impossível efectuar uma diferenciação de custos originados por potenciais alterações de engenharia, nomeadamente ao nível dos materiais ou das tecnologias [1].

No método analítico baseado na actividade os custos são orientados para o processo de fabrico permitindo atribuir cada custo à actividade que o gerou e à medida que esta decorre. No entanto, este método assenta ainda na informação histórica, não sendo por isso capaz de determinar o impacto nos custos de alterações na concepção, nos materiais, nas tecnologias e na produção. Na outra variante do método analítico, baseado estritamente no processo, considera-se a existência de uma relação inerente entre o *design* do produto, os custos do processo e os custos do produto. A maior desvantagem é o facto do desenvolvimento destes modelos consumir muito tempo e ser algo dispendioso [2].

Os sistemas CAPP (Computer Aided Process Planning), baseados também no processo, dão origem a um plano detalhado de fabrico, que inclui as actividades necessárias à realização do processo, a sua precedência e os parâmetros nele envolvidos. Conhecendo antecipadamente o processo é possível proceder-se a uma estimativa dos custos de produção e assim obter a contribuição de cada elemento, permitindo actuar sobre os parâmetros no sentido de otimizar o processo, reduzindo os custos. A análise do mesmo processo produtivo, num contexto diferente, só é possível desenvolvendo um novo plano detalhado de fabrico. Desta forma, torna-se complexa a utilização destes sistemas para uma análise com carácter de avaliação e de decisão, especialmente em fases de desenvolvimento do produto onde não há ainda informação detalhada do processo [4].

Uma abordagem alternativa de análise de custos, situada entre os métodos analíticos e a análise de custos associada ao planeamento detalhado do processo integrada em sistemas de CAPP, é a metodologia dos Modelos Tecnológicos de Custo (MTC). Através de uma aplicação sistemática de princípios económicos e de engenharia, é possível construir um sistema de equações elementares relacionando parâmetros tecnológicos do processo, variáveis económicas e o custo total. Esta metodologia permite uma análise económica de soluções de engenharia mais sensível à influência das características de concepção e dos parâmetros operatórios globais nos custos. A abordagem tem como objectivo fundamental, do ponto de vista de custo, as decisões de engenharia, sem grande dependência da intuição do projectista, e numa fase de desenvolvimento do produto onde a informação detalhada do processo ainda é rudimentar. Por todos estes motivos, os Modelos Tecnológicos de Custo são alternativas eficientes para a realização de estimativas de custo, uma vez que permitem um estudo mais abrangente, não estando tão dependente dos meios e política da empresa, num contexto de grande flexibilidade [2].

O conceito de MTC foi desenvolvido no M.I.T. (*Massachusetts Institute of Technology*) nos finais dos anos 70 e descreve um método analítico de estimativa de custos complementado com relações e/ou correlações de origem empírica ou mesmo intuitiva [2]. As investigações iniciais que levaram ao desenvolvimento deste modelo destinavam-se a estimar as implicações nos custos originados pela adopção dos materiais alternativos num processo de fabrico particular ou comparar os custos de produção de um dado componente usando diferentes processos. Actualmente, os MCT são utilizados fundamentalmente como um método de análise económica de processos alternativos de produção, assim como na identificação dos vectores limitadores da competitividade de um processo. A parametrização do processo produtivo permite construir um modelo que possa ser adaptado a um conjunto vasto de condições operativas, simplificando e flexibilizando a análise económica das alterações tecnológicas.

A abordagem deste método consiste em identificar todos os passos do processo necessários à produção do componente e estimar para cada passo, isoladamente, os elementos de custo que contribuem para o custo total. Estas estimativas individuais dos elementos derivam de princípios da economia e da engenharia dos processos produtivos. O modelo reduz o problema da complexidade da análise de custos em vários sub-problemas de estimativa mais simples.

2. MTC PARA A MAQUINAGEM POR ELECTRO-EROSÃO

Neste artigo pretende-se demonstrar a aplicabilidade dos MTC como ferramenta de apoio à decisão na engenharia do processo, através da análise e discussão dos resultados obtidos num MTC desenvolvido para a tecnologia de maquinagem por electro-erosão (EDM). A motivação do desenvolvimento do modelo prende-se com o facto da tecnologia de electro-erosão ser caracterizada por desempenhos contraditórios: por um lado, elevada precisão e capacidade de maquinar geometrias complexas e, por outro, tempos e custos de maquinagem consideravelmente elevados [5]. Sendo uma tecnologia com inúmeros factores/parâmetros de controlo, o processo de decisão pode ser extremamente complexo, quer na selecção dos parâmetros internos (tipo de eléctrodo, tipo de dieléctrico, tipo de máquina, etc.) quer na comparação com tecnologias frequentemente alternativas (fresagem convencional e a alta-velocidade) [3]. O processo de decisão torna-se ainda mais complexo no caso particular da indústria dos moldes e matrizes, onde a exigência de um acabamento superficial de elevada qualidade origina a necessidade de mais uma “tecnologia” no processo de decisão: o polimento manual.

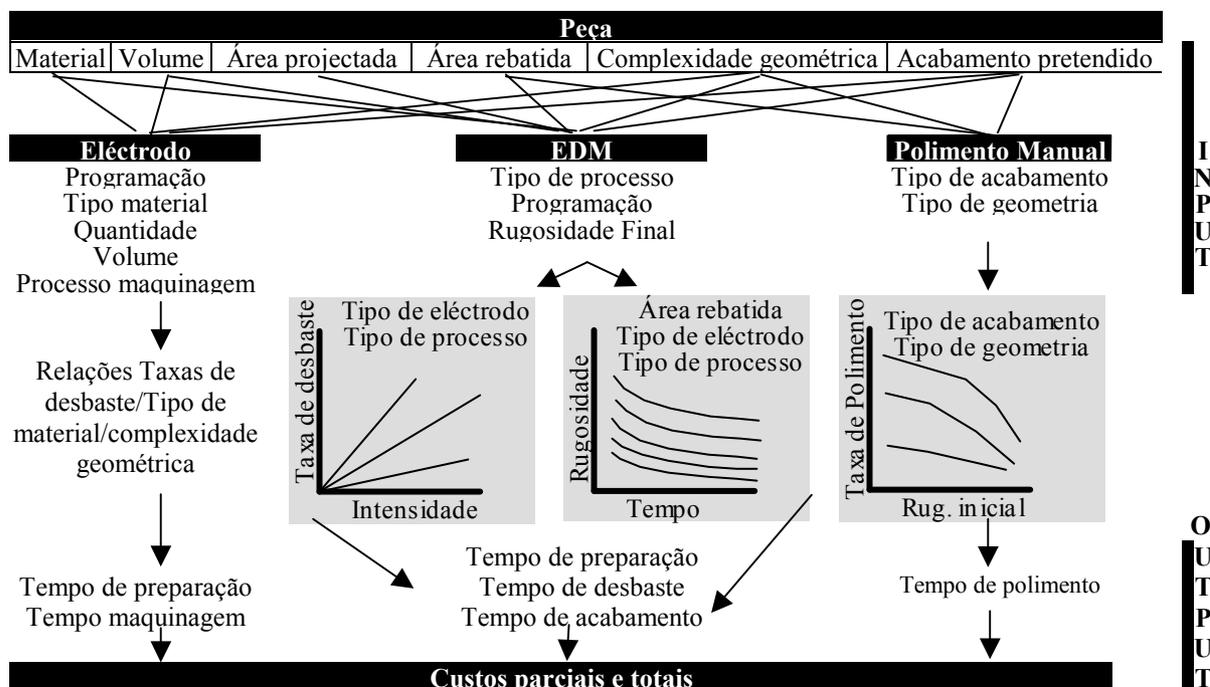


Fig. 1. Componentes do modelo tecnológico de custo desenvolvido.

Para facilitar o processo de decisão sobre as tecnologias de maquinagem de moldes e matrizes têm sido desenvolvidos sistemas CAPP, com resultados bastante positivos [4]. Estes sistemas, embora indicados para comparar custos e tempos do processo de um dado componente num dado enquadramento produtivo não permitem análises mais abrangentes ou universais. Resulta que o MTC desenvolvido para a EDM permite preencher esta lacuna efectuando análises de sensibilidade do impacto de diversos factores e/ou parâmetros do processo, através da utilização de correlações tecnológicas e económicas entre tempo, custo e qualidade.

Na Fig. 1 estão ilustrados os vários componentes do modelo desenvolvido. Os diversos módulos funcionam de forma independente podendo ser alterados à medida que os processos evoluem ou que se tem acesso a dados mais pertinentes. As correlações paramétricas foram obtidas através de experimentação, quer ao nível do processo de EDM [5] quer ao nível do polimento manual [6]. O módulo de custos é constituído por algoritmos de cálculo de diferentes parcelas de custo, desde o custo dos eléctrodos e da erosão propriamente dita ao custo do polimento manual, indexados a características do componente (dimensão, complexidade, acabamento,...), aos equipamentos necessários (dimensão, potência, consumíveis, ...), à necessidade de mão-de-obra e ainda ao número de horas anuais de produção. Todos estes parâmetros podem funcionar como variáveis de estudo.

As diversas correlações existentes no modelo foram validadas individualmente, tendo por base três diferentes origens de informação: casos de estudo presentes em publicações científicas, casos de estudo de projectos de investigação e dados recolhidos em trabalho de campo junto de empresas de moldes. A validação do modelo integral também foi efectuada do mesmo modo, apresentando-se na Fig. 2 três dos casos utilizados, onde se verifica um bom desempenho do modelo.

Com o objectivo de exemplificar as potencialidades do modelo desenvolvido considere-se o Caso 2. Este componente, de acordo com a Fig. 2, foi efectuado por maquinagem por EDM até a um regime de 5 A, resultando uma superfície com uma rugosidade média (Ra) de 2 μm . De seguida efectuou-se um polimento manual com acabamento super-fino, o que conduziu a uma superfície com 0,034 μm de Ra. Este procedimento pretende modelar a prática industrial corrente. O facto da EDM apresentar desempenhos muito reduzidos para intensidades de corrente inferiores a 4-5 A, determina industrialmente o recurso ao polimento manual para rugosidades inferiores a 2 μm [7].

		Caso 1 – ref ^a [4]	Caso 2 – ref ^a [5]	Caso 3 – ref ^a [6]			
I n p u t	Comp. Larg. Prof. [mm]	118 28 5	60 40 10	200 10 5			
	Projecto dos Eléctrodos [min]	180	90	120			
	Tipo de Eléctrodo	Cobre	Cobre	Grafite Super – Fina			
	Fresagem Eléctr. Desb. Acab. [min]	58.5 69.5	140 140	130 130			
	Intens. Desbaste Max. Min [A]	48 8	96 8	96 12			
	Intens. Acabam. Max. Min [A]	8 5	8 5	12 6			
	Rugosidade Final de EDM [µm]	0.75	2	2.1			
	Set-up EDM [min]	85	30	30			
O u t P u t	Tempos [minutos]	Ref^a [4]	MTC	Ref^a [5]	MTC	Ref^a [6]	MTC
	Desbaste por EDM	182.00	144.39	128.00	121.10	45.00	39.96
	Acabamento por EDM	210.00	243.54	140.00	133.33	25.00	22.31
	Polimento Manual – Fino	-	-	-	-	45.00	60.00
	Polimento Manual – Super-Fino	-	-	120.00	146.00	-	-
	TOTAL	392.00	387.93	388.00	400.43	115.00	122.27

Fig. 2. Validação do modelo em três casos de estudo: Caso 1 presente numa publicação científica; Caso 2 efectuada num projecto de investigação; Caso 3 molde para a indústria automóvel efectuada numa empresa portuguesa de moldes.

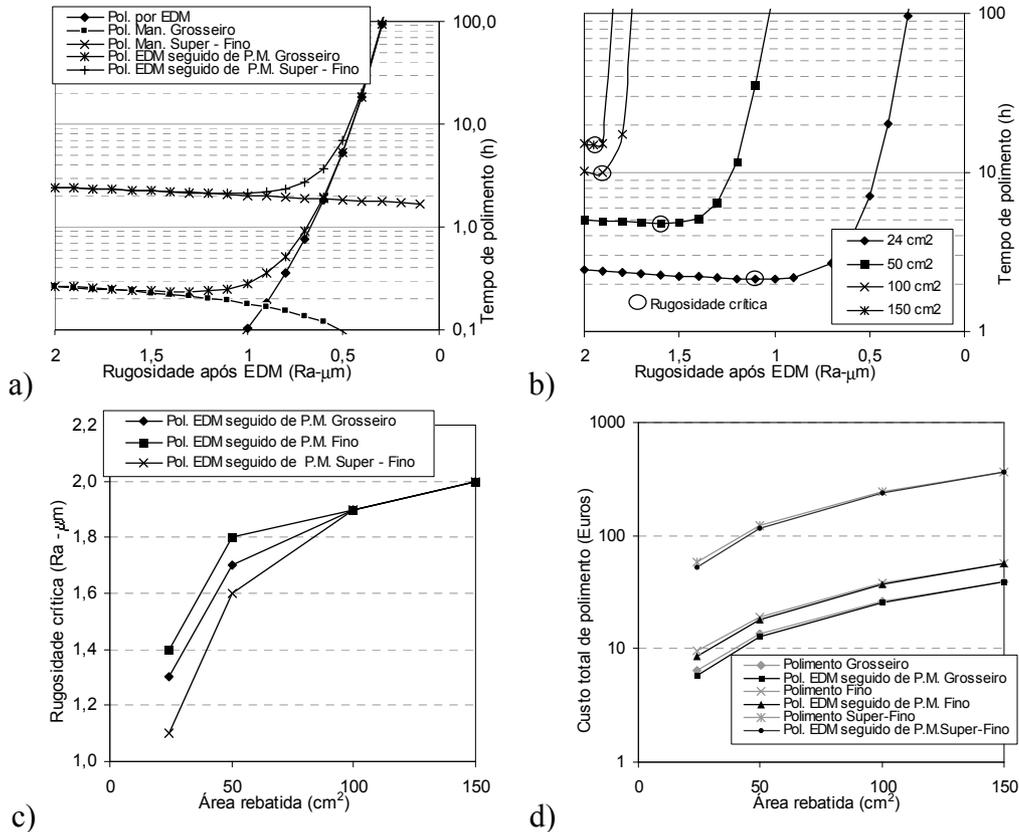


Fig. 3. Resultados do MTC para o Caso 2 (24 cm² de área rebatida; eléctrodo de cobre; geometria simples). a) Variação do tempo manual de polimento grosseiro e super-fino com a rugosidade final de EDM; b) Variação do tempo manual de polimento super-fino com a rugosidade final de EDM para áreas crescentes; c) Variação da rugosidade crítica com a área para os três tipos de polimento manual; d) Variação do custo dos três tipos de polimento para EDM até 2 µm e para EDM até à rugosidade crítica.

Através do MTC desenvolvido é possível analisar a variação do tempo de polimento com a rugosidade final de EDM. Na Fig. 3a) está ilustrada essa variação para dois tipos de polimento manual após EDM, o polimento super-fino e o polimento grosseiro (Ra final de 0,324 μm). Verifica-se que o tempo de polimento por EDM para rugosidades progressivamente inferiores aumenta exponencialmente. É visível que se justifica prolongar a EDM até um valor de Ra de cerca de 1,3 μm , valor para o qual se atinge o tempo de polimento mínimo. A aplicação do MTC permite determinar uma rugosidade limite, doravante designada por rugosidade crítica, para o polimento por EDM e para os vários tipos de polimento manual subsequentes. Neste caso, a determinação da rugosidade crítica foi efectuada tendo por base os tempos de polimento, mas o mesmo raciocínio pode ser efectuada tendo por base os custos associados, gerando, neste caso, uma nova rugosidade crítica. O valor da rugosidade crítica depende das condições específicas do componente e do processo em causa, nomeadamente geometria, tipo de eléctrodo, tipo de acabamento manual, etc.

O modelo de análise desenvolvido permite ainda avaliar a influência da geometria do componente no tempo de polimento e na rugosidade crítica. Na Fig. 3b) ilustra-se a variação do tempo de polimento super-fino com a rugosidade final do polimento de EDM, tendo por base o Caso 2 e admitindo áreas crescentes do componente (as áreas consideradas são áreas rebatidas). Verifica-se que o aumento das dimensões do componente origina o aumento da rugosidade crítica, devido essencialmente ao aumento exponencial do tempo de polimento por EDM com a área. Na Fig. 3c) ilustra-se a variação da rugosidade crítica com a área para os três tipos de polimento manual e na Fig. 3d) apresenta-se a variação do custo total de polimento com a área para duas situações: polimento manual após EDM até 2 μm de Ra e após EDM até à rugosidade crítica. Desta forma, demonstra-se que o MTC permitiu encontrar níveis otimizados de desempenho, em tempo e/ou em custo, tendo em conta a especificidade do componente.

Com base no Caso 3, podem ilustrar-se as potencialidades do MTC desenvolvido através da análise da influência do material do eléctrodo. Na Fig. 4a) estão indicados os tempos de acabamento e desbaste para diversos materiais do eléctrodo, assim como a rugosidade final após EDM a 6 A. Tendo como partida a rugosidade superficial final atingida por EDM para cada material do eléctrodo, o MTC permite estimar os tempos dos três tipos de polimento manual, que aumentam com a rugosidade final de EDM (Fig 4b). De modo idêntico ao caso anterior, a influência da área rebatida nos tempos e custos do processo pode ser analisada evidenciando o aumento significativo dos custos totais da maquinação com grafite ultra-fina e grafite angstrom-fina, devido essencialmente ao elevado custo destes materiais. Mais uma vez o MTC apoiou o processo de decisão, permitindo a optimização do tempo e do custo, como ilustrado nas Fig. 5 a) e b).

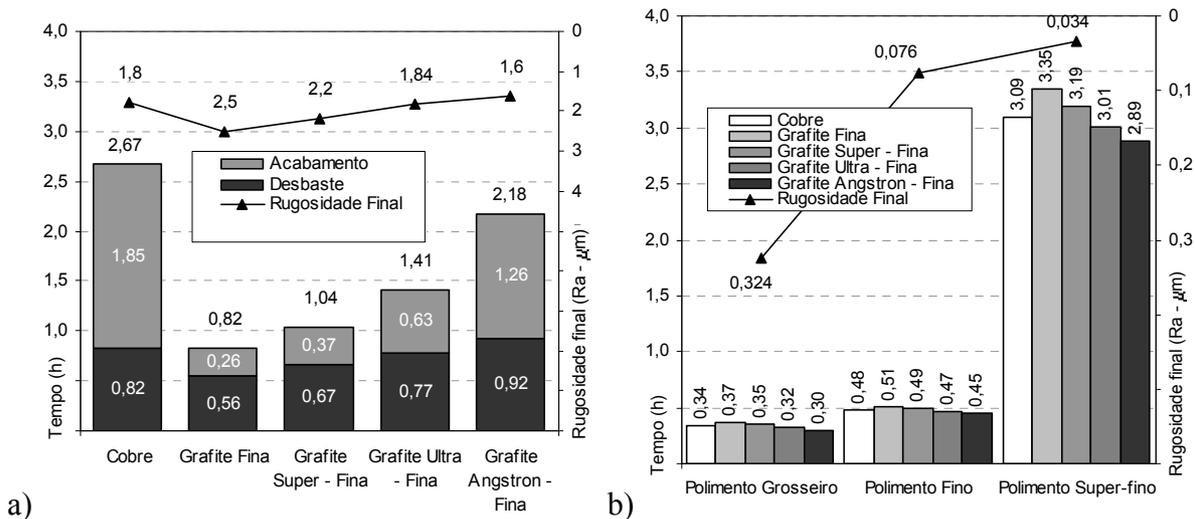


Fig. 4. Resultados do MTC para o Caso 3 (40 cm^2 de área rebatida; geometria complexa). a) Variação do tempo de maquinação com o tipo de eléctrodos (Cobre; Grafite Fina – grão $\approx 15 \mu\text{m}$; Grafite Super-Fina – grão $\approx 10 \mu\text{m}$; Grafite Ultra-Fina – grão $\approx 5 \mu\text{m}$; Grafite Angstrom-Fina – grão $\approx 1 \mu\text{m}$); b) Variação do tempo de polimento para os três tipos de polimento manual, tendo como partida a rugosidade final da maquinação por EDM.

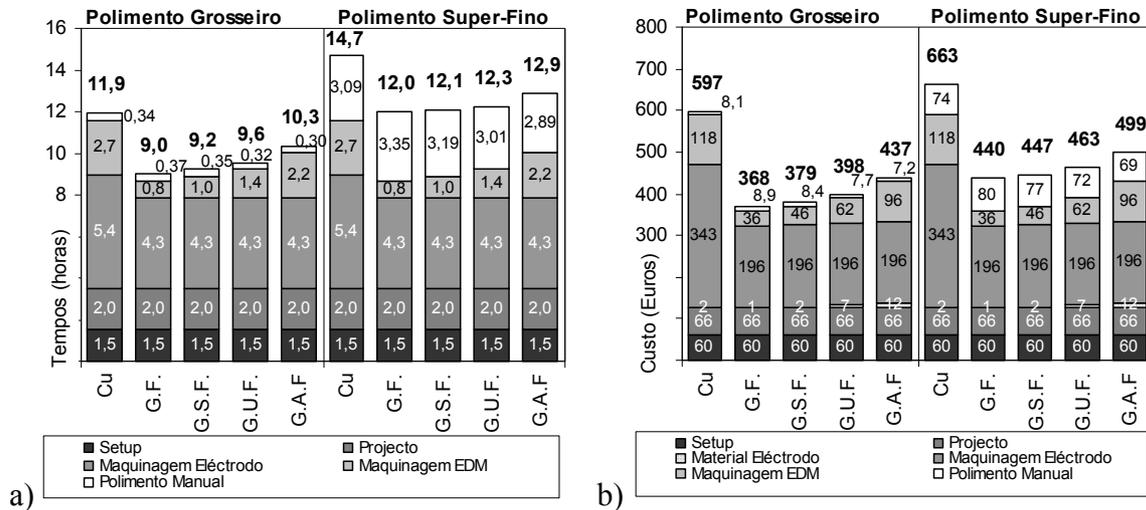


Fig. 5. Resultados do MTC para o Caso 3 (40 cm² de área rebatida; geometria complexa). a) Tempos parciais e totais para os diversos de eléctrodos, para dois tipos de polimento manual; EDM; b) Custos parciais e totais para os diversos tipos de eléctrodos, para dois tipos de polimento manual.

3. CONCLUSÕES

O MTC desenvolvido permite a análise dos diversos factores de controlo do tempo e do custo do processo de electro-erosão integrando também ainda os efeitos na operação subsequente de acabamento manual, particularmente utilizada no fabrico de cavidades moldantes para injeção de plásticos. A validação do modelo foi efectuada com base em diversos casos de estudo utilizados como suporte para análise da influência de diversas variáveis tecnológicas.

Através do MTC desenvolvido para a maquinagem por electro-erosão, ilustraram-se as potencialidades deste tipo de abordagem à análise da competitividade das tecnologias com base nos custos. Tendo em consideração a especificação dos componentes, a sua utilização permite avaliar a influência dos diversos factores económicos e tecnológicos que controlam o processo e determinar limites melhorados de desempenho. Os MTC são portanto ferramentas poderosas de apoio à decisão, visto integrarem conhecimento científico com correlações empíricas ao que acresce a grande facilidade de alteração dos modelos quando um novo conhecimento é adquirido.

REFERÊNCIAS

- [1] Y.J.Tseng e B. C. Jiang, "Evaluating Multiple Feature-Based Machining Methods Using an Activity-Based Cost Analysis Model", *Int. J. Adv. Man. Tech.*, vol.16, pp 617-623 (2000).
- [2] J. V. Busch e F. R. Field, "Technical Cost Modeling", *Blow Molding Handbook*, Capítulo 24, Hanser Publishers, Nova Iorque, pp 839-871 (1989).
- [3] C.L. Lin, J.L. Lin, T.C. Ko, "Optimisation of the EDM process based on the orthogonal array with fuzzy logic and grey relational analysis method". *Int. J. of Advanced Manufacturing Technologies*, vol.19, nº4, pp 271-277 (2002).
- [4] M.R. Alam et al., "Decision algorithm for injection moulds", *Int. J. Production Research*, Vol.40 nº4, Taylor & Francis Group, pp 845-872 (2002).
- [5] Projecto TAVAC, "Projecto Mobilizador – Tecnologias Avançadas de Acabamento de Moldes e Ferramentas", Agiltec (1999).
- [6] P. Peças, R. Casimiro, "Plastic Injection Moulds Finishing and Polishing: Comparative Analysis of Alternative Technologies", S.T.M.-I.S.T., Universidade Técnica de Lisboa, (2002).

- [7] P. Peças, E. Henriques, “Influence of silicon powder-mixed dielectric on conventional electrical discharge machining”, *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, vol.43, pp 1465-1471 (2003).

TECHNOLOGICAL COST MODEL FOR THE ELECTRIC-DISCHARGE MACHINING

Abstract – The technological cost modelling (MTC) is a deterministic analysis method to evaluate the economical impact of alternative manufacturing process chains without the prohibitive economic burden involved in the introduction of new alternative solutions based on trial and error methods. Based on a structured interaction between economical and technological relevant variables it allows the preview of potential manufacturing costs. In this paper a MTC model is applied to the finishing and polishing phase of moulds cavities involving EDM (electric-discharge machining) and manual polishing. Some relevant technological and economical performance limits are delineated, considering the influences and synergies between the technologies involved in the process in a chain perspective.

