UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Análise de Alguns Parâmetros Tecnológicos da Usinagem de Aço-Carbono por Eletroerosão

JOÃO TELÉSFORO NÓBREGA DE MEDEIROS

Orientador: João Lirani, PhD

DEDALUS - Acervo - EESC

31100035914

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

SÃO CARLOS, 1981

Aos meus pais,

Moacyr Medeiros

Edi Nóbrega de Medeiros,

duas pérolas que enobrecem a raça humana,
e aos manos

Maria da Conceição,

José Hamurábi,

Expedito,

dedico este trabalho.

Expresso os meus agradecimentos:

- Ao Prof. Vinício Duarte Ferreira, da UFPb, pelo irrestrito apoio e incentivo prestados desde meus tempos de aluno da Escola Técnica Federal da Paraíba;
- Ao Prof. Dr. João Lirani, orientador deste trabalho, pelas valiosas sugestões e colaboração transmitidas durante a sua realização;
- Ao Prof. Dr. Rosalvo Tiago Ruffino e ao Prof. José Roberto Gambarini, pelo incentivo e colaboração prestados;
- Aos colegas Eduardo Vila Gonçalves Filho, João Carlos Reis Rabelo, Alceu Rodrigues da Cruz Júnior, Benedito Di Giacomo e José Maria Campos dos Santos, pela colaboração prestada;
- Aos colegas da UFRN e UFPb que cursam programas de pós-graduação em São Carlos e me ajudaram a minorar a saudade da terra e do povo nordestinos, e me toleraram pacientemente durante todo esse tempo;
- À bibliotecária Neuza T. Celere pelo eficiente trabalho desenvolvido;
- Aos técnicos de laboratório Helvécio Eugênio e Luiz Carlos Bruno, pelos serviços executados;
- Ao Sr. Antonio Gallo, pelo dedicado e primoroso trabalho de datilografia;

- Aos funcionários da Secretaria do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP, pela colaboração prestada;
- A todos os meus professores, colegas e alunos, de ontem e de hoje, pelo estímulo e amizade sempre demonstrados;
- Aos amigos são-carlenses que me dispensaram uma atenção e desvelo imerecidos;
- A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

C O N T E Ú D O

	Página
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 CONCEITOS BÁSICOS DA USINAGEM DE METAIS POR PROCESSOS NÃO-CONVENCIONAIS	
2.1 Generalidades	4
2.2 Natureza de um Processo de Fabricação	5
2.3 Processos Não-Convencionais de Usinagem ...	10
CAPÍTULO 3 FUNDAMENTOS DA USINAGEM DE METAIS POR ELETROEROSÃO	
3.1 Histórico	28
3.2 A Descarga Elétrica	34
3.2.1 A Descarga Elétrica em Meio Gasoso .	34
3.2.2 A Descarga Elétrica em Líquido Dielétrico	37
3.3 Aplicações Industriais do Processo de Usinagem por Descargas Elétricas	42
3.3.1 Usinagem por Eletroerosão	46
3.3.2 Retificação por Eletroerosão	48
3.3.3 Serramento por Eletroerosão	49
3.3.4 Corte com Fio por Eletroerosão	51
CAPÍTULO 4 MÁQUINAS, FERRAMENTAS E ASPECTOS ECONÔMICOS DA USINAGEM DE METAIS POR ELETROEROSÃO	
4.1 Generalidades	54

	Página
4.2 Máquinas UEE	55
4.2.1 Conjunto Mecânico	57
4.2.2 Conjunto Elétrico	58
4.2.3 Conjunto Hidráulico	62
4.3 Ferramentas UEE	63
4.3.1 Cobre Eletrolítico	64
4.3.2 Grafite	65
4.3.3 Cobre ao Telúrio, ao Cromo ou ao Chumbo	66
4.3.4 Cobre-Tungstênio	66
4.3.5 Tungstênio à Prata	66
4.3.6 Liga de Alumínio (Silumin)	67
4.3.7 Latão	67
4.3.8 Tungstênio. Molibdênio	68
4.3.9 Aço	68
4.4 Aspectos Econômicos da Fabricação de u'a Matriz para Forjamento por UEE e Fresamento por Copiamento	69
4.4.1 Generalidades	69
4.4.2 Descrição da Matriz Usinada	70
4.4.3 Análise dos Tempos de Fabricação da Matriz	70
4.4.4 Análise dos Custos de Fabricação da Matriz	72

CAPÍTULO 5 PARÂMETROS TECNOLÓGICOS DO PROCESSO

5.1 Generalidades	77
5.2 Parâmetros Elétricos	78
5.2.1 Energia de Descarga	78
5.2.2 Corrente de Descarga	80
5.2.3 Frequência de Descargas	82
5.2.4 Resistividades dos Elétrodos	83

5.2.5	Polaridade do Circuito	84
5.2.6	Propriedades Dielétricas do Fluido de Serviço	85
5.3	Parâmetros Termodinâmicos	86
5.4	Parâmetros Hidrodinâmicos	88
5.5	Parâmetros Metalúrgicos	92
5.6	Parâmetros Mecânicos	93
5.7	Parâmetros Geométricos	94

CAPÍTULO 6 ANÁLISE EXPERIMENTAL DA USINAGEM DE AÇO-CARBONO POR ELETROEROSÃO. RESULTADOS OBTIDOS

6.1	Generalidades	95
6.2	Descrição do Equipamento Eletroerosivo utilizado	96
6.3	Projeto e Fabricação dos Elétrodos de ensaio	106
6.4	Metodologia	109
6.5	Resultados e Discussões	116

CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1	Conclusões	145
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	146

CAPÍTULO 8 BIBLIOGRAFIA

8.1	Referências Bibliográficas	148
8.2	Bibliografia Consultada	151

APÊNDICE

APÊNDICE A	Glossário de Termos Utilizados no Processo de UEE	I
APÊNDICE B	Dimensionamento de Elétrodos-Ferra- menta e Estimativa do Tempo de Usi- nagem por Eletroerosão	XV

SIMBOLOGIA E UNIDADES

A_f	- área frontal do eletrodo-ferramenta	mm^2
C	- capacidade de carga armazenada	F
C_{ef}	- custo do eletrodo-ferramenta	Cr\$
C_{hi}	- custo horário do investimento	Cr\$
C_{hmo}	- custo horário da mão-de-obra	Cr\$
C_N	- custo para N matrizes	Cr\$
C_{pb}	- custo de preparação do bloco	Cr\$
C_{pe}	- custo de preparação do eletrodo	Cr\$
C_T	- custo total de fabricação da matriz	Cr\$
D	- diâmetro de uma seção circular	mm
E	- energia de descarga	J
FRC	- fator de recuperação de capital	-
$i(t)$	- intensidade de descarga	A
I	- valor eficaz da corrente de descarga (lido no amperímetro)	A
N	- número de matrizes	-
P_{ef}	- peso do eletrodo-ferramenta	Kgf
$(P_{ef})_f$	- peso do eletrodo-ferramenta no final da usinagem	Kgf
$(P_{ef})_i$	- peso do eletrodo-ferramenta no início da usinagem	Kgf
R_a	- rugosidade superficial da peça usinada	μm
RD	- relação de desgaste	%
S	- área da seção transversal de uma superfície condutora	mm^2

S_L	- sobre corte lateral	μm
T_t	- tempo total de usinagem	h
t	- tempo de descarga	s
V	- valor eficaz da tensão de descarga (lido no voltímetro)	V
VRM	- velocidade de remoção de material	mm^3/min
V_{ue}	- vida útil do eletrodo	-
$v(t)$	- tensão instantânea de descarga	V
γ_{ef}	- peso específico do material do eletrodo-fer_ ramenta	Kgf/dm^3
γ_p	- peso específico do material da peça usinada	Kgf/dm^3
δ	- densidade de corrente	A/m^2
θ	- conicidade de cada lado da peça usinada ...	graus

R E S U M O

Analísaram-se os parâmetros tecnológicos mais significativos que influem na Usinagem por Eletroerosão (UEE). Foram desenvolvidos e comentados ensaios de usinagem de aço-carbono com elétrodos de cobre. Apresenta-se também um método de dimensionamento da ferramenta e da avaliação do tempo de usinagem, baseado nos dados obtidos. Foram confrontados os principais processos não-convencionais de usinagem, constatando-se que a UEE é um eficiente processo de fabricação.

A B S T R A C T

The most important EDM technological parameters have been analyzed. Experiments on carbon-steel workpiece machined with copper tool-electrode have been developed and discussed. Based on the obtained data, this work suggests a method for designing the tool-electrode and evaluating the total machining time. Others usual non-traditional machining processes have been compared and it has been observed that EDM is an efficient manufacturing process.

Saber estudar, possuir a arte de
aprender, habilitar-se a navegar seguro
por essas águas e atravê*s* desses
escolhos, já é ser abastado nas pos-
ses, e ter aproveitado o tempo.

Ruy Barbosa

1. INTRODUÇÃO

A segunda metade deste século tem apresentado uma notável evolução na engenharia de projetos, na metalurgia e na engenharia de fabricação. Aquela tradicional descompasso de outros tempos entre a ciência e a tecnologia tem dado lugar, em nossos dias, a um desenvolvimento harmônico e acelerado da maioria dos setores da atividade humana.

Isso é fruto da contínua sofisticação e melhoria de projetos específicos, de vanguarda, em que a busca da otimização da relação resistência/peso, custos, propriedades físicas e químicas e funcionalidade do produto exige mais e mais da ciência dos materiais e dos processos de fabricação para atender de modo mais racional às metas críticas da engenharia.

Exemplos palpáveis são encontrados nos campos da energia nuclear, onde a tecnologia dos reatores exige considerações dos efeitos da radiação sobre os materiais, e dos programas aeroespaciais, através da construção de

mísseis, aviões de alto desempenho e foguetes, que devem enfrentar condições ambientais completamente distintas e, às vezes, desconhecidas.

Os materiais produzidos em resposta a solicitações desse gênero tendem a ser mais quebradiços que dúcteis. Este fato, aliado a outros de igual importância, tais como tolerâncias reduzidas, formas intrincadas, superfícies adelgaçadas, microcavidades etc., têm induzido a complementação dos métodos mecânicos de fabricação por outros que empregam a energia química, ou térmica, ou elétrica, ou combinações destas, envolvendo uma quantidade mínima de deformação mecânica: são os chamados "processos não-convencionais de usinagem", ou ainda "processos de usinagem sem cavaco", gerados nos laboratórios de pesquisa após a Segunda Guerra Mundial e alguns já industrialmente consagrados em todo o mundo.

Para possibilitar uma melhor visualização dos processos não-convencionais de usinagem, avaliaram-se, no capítulo 2, as suas potencialidades e limitações, tanto técnica, quanto economicamente, onde se constata que a usinagem por eletroerosão (UEE) é um eficiente processo em diversas aplicações.

Os capítulos 3, 4 e 5 apresentam os fundamentos tecnológicos da usinagem de metais por eletroerosão, as máquinas e as ferramentas empregadas nesse processo e se comparam aspectos econômicos da fabricação de uma matriz de forjamento pelos processos de fresamento por copiamento e usinagem por eletroerosão. Enfatizam-se, também, os parâmetros tecnológicos que influem na UEE.

Além dos aspectos teóricos da UEE, foram obtidos e avaliados dados experimentais em laboratório. Analisaram-se alguns parâmetros tecnológicos significativos da usinagem de um aço-carbono com eletrodo-ferramenta de cobre: velocidade de remoção de material, desgaste do eletrodo, conicidade, acabamento superficial e influência de

determinadas condições da lavagem sobre o desempenho do processo eletroerosivo (capítulo 6).

Discutem-se, no capítulo 7, os dados obtidos e evidenciam-se a baixa capacidade de remoção de material do circuito de relaxação, o alto desgaste do elétrodo-ferramenta de cobre em operações de desbaste, e o surgimento de forças transmitidas por contato direto entre a ferramenta e a peça, devido às falhas de operação e às limitações inerentes ao servo-sistema eletro-hidráulico de comando do avanço do cabeçote porta-elétrodo.

Ainda no capítulo 7, enumeram-se algumas sugestões para trabalhos futuros e, no apêndice, apresenta-se um glossário de termos técnicos utilizados no processo eletroerosivo e é proposto um método de dimensionamento de elétrodos para esse processo.

A abordagem do processo de usinagem por eletroerosão encetada neste trabalho visa a:

- a) Ressaltar as potencialidades e limitações desse processo;
- b) Analisar os principais parâmetros que influem na UEE;
- c) Descrever alguns mecanismos associados à remoção de material por centelhas elétricas;
- d) Avaliar, para uma combinação de elétrodos cobre/aço-carbono, o desempenho do processo, em termos da velocidade de remoção de material, desgaste da ferramenta, conicidade e acabamento superficial da cavidade executada, temperatura do banho dielétrico e influência das condições de lavagem;
- e) Apresentar um método de dimensionamento do elétrodo-ferramenta utilizado no processo, ou conjunto de elétrodos, que permita ao usuário estimar o tempo de operação, a qualidade final da superfície usinada e as dimensões prováveis do produto acabado.

2. CONCEITOS BÁSICOS DA USINAGEM DE MATERIAIS POR PROCESSOS NÃO-CONVENCIONAIS

2.1. Generalidades

A interface fabricação/projeto de um produto apresenta um dos pontos mais críticos da engenharia, seja mecânica, eletrônica, naval ou aeronáutica. Custos do processo, materiais utilizados, tolerâncias dimensionais, de forma e de posição, dificuldades de fabricação surgidas em decorrência da funcionalidade ou estética do produto etc., caracterizam aquela interface.

Apesar de inúmeras inovações tecnológicas surgidas nos últimos anos, com a introdução de computadores eletrônicos para assistir ao projeto ou à fabricação, a absoluta maioria dos equipamentos em operação industrial, ainda incorpora unidades tradicionais, em que a perícia do operador é tão ou mais importante que as potencialidades da própria máquina-ferramenta.

Os custos de formação e manutenção de mão-de-o-

bra de escol crescem a cada dia; a conjuntura sócio-econômica de uma unidade fabril é diuturnamente afetada pelos condicionantes políticos que se lhe apresentam, além dos aspectos técnicos inerentes às suas atividades rotineiras.

O surgimento dos processos não-convencionais de usinagem decorreu da combinação entre aqueles fatos e a necessidade de se usinarem materiais de baixa usinabilidade pelos métodos convencionais, além da sofisticação e imposições de projetos cada vez mais ousados.

Posiciona-se, neste capítulo, a UEE no universo dos processos de fabricação, comparando-a com os demais processos não-convencionais de usinagem e com o fresamento convencional.

2.2. Natureza de um Processo de Fabricação

A seleção da melhor máquina ou processo para um determinado produto exige sólidos conhecimentos de todos os métodos de produção existentes. O fluxograma apresentado na figura 1 sintetiza as diversas etapas que podem delinear a fabricação de uma peça. Assim como em uma malha PERT/CPM, geralmente há um caminho crítico mais econômico e satisfatório, dentre os possíveis. Fatores a serem considerados são o volume da produção, a qualidade do produto acabado, as vantagens e limitações dos vários tipos de equipamentos capazes de executar a tarefa e os custos de fabricação.

Em um processo de fabricação, o material passa por vários estados, caracterizados pelos seus parâmetros geométricos e físicos bem definidos. Na maioria dos casos, um processo envolve mudanças quer nas dimensões geométricas, quer nas propriedades da peça e pode ser visualizado qualitativamente como uma trajetória, no espaço tridimensional contido no sólido geométrico esboçado na figura 2, desde um estado inicial A até algum estado final F,

Fig. 1 - Principais etapas possíveis na fabricação de uma peça na indústria mecânica.

em um determinado intervalo de tempo e por um custo definido, através de uma sucessão de estados. A qualquer instante de tempo, o estado do sistema é representado por um ponto cujas coordenadas são as dimensões da peça ($\underline{d}$), as propriedades do material ($\underline{p}$) e o tempo de operação ($\underline{t_o}$).

Fig. 2 - Conceituação grafo-abstrata de um processo de fabricação.

Sistema, neste caso, é uma porção da matéria de identidade bem determinada, capaz de interagir com o meio-ambiente em termos de fluxo de massa e energia.

Ora, na apreciação do desempenho dos processos de fabricação, diversos parâmetros devem ser definidos, dependendo da natureza do processo, do sistema considerado e dos fatores políticos, sociais e econômicos envolvidos. Isto, afinal de contas, está intrinsecamente ligado

às premissas fundamentais da tecnologia, pois todo um campo de reações e relações humanas está envolvido nas suas atividades. Há 116 anos, o regulamento de fundação do Massachusetts Institute of Technology (MIT), já salientava ponto-de-vista análogo:

... "intended for those who seek administrative positions in business where a systematic study of political and social relations and familiarity with scientific methods and processes are equally essential".

(...destinado àqueles que buscam posições administrativas nos negócios em que um estudo sistemático das relações políticas e sociais e familiaridade com métodos e processos científicos são igualmente importantes).

Entretanto, em uma abordagem mais compacta, um processo de fabricação pode ser sintetizado pelo esquema da figura 2, envolvendo um sistema com propriedades e dimensões bem definidas, no tempo. Quando esse sistema se move de algum estado inicial para algum estado final, em uma sucessão de estados, há necessariamente uma troca de energia, associada aos microconstituintes do material, entre o sistema e o seu meio-ambiente. O rearranjo desses elementos microscópicos se dá quando variam algumas propriedades e/ou a configuração geométrica do material. Esta, por sua vez, altera-se sempre que o processo envolva remoção, conformação ou deposição de material, ou seja, o sistema percorra um caminho em que haja mudança de estado no eixo dos d (dimensões da peça). Diferentes caminhos entre dois estados constituem processos distintos; o estado final necessariamente se situa à direita do inicial, no sentido positivo do eixo dos tempos de operação, dada a sua característica de irreversibilidade.

Uma operação de conformação mecânica, ou de usinagem, ou de solda, ou de eletrodeposição, por exemplo, po

de ser muito bem representada qualitativamente por um desses caminhos e envolve uma mudança de plano: o estado inicial pertence ao um plano α_i e o final a um plano α_f . Um tratamento térmico, etapa integrante de vários processos de fabricação, pode ser delineado por caminhos situados em um mesmo plano α , desde que ele não envolva mudanças significativas nas dimensões da peça, mas na sua estrutura interna.

Desde o século passado, quando as primeiras máquinas-ferramenta foram acionadas eletricamente, tem havido uma evolução no sentido de se construírem máquinas mais rápidas, de se obterem velocidades cada vez maiores, avanços mais rápidos e acuracidades aumentadas. Buscam-se meios de trabalhar os materiais, sejam metálicos ou não, com um mínimo de processamento a partir do seu estado natural, com um mínimo de perdas e a maiores velocidades de produção. Procura-se, pois, minimizar o caminho $\overline{AF}$, do gráfico da figura 2.

O caminho $\overline{AB}$, ou $\overline{BC}$, ou $\overline{AC}$, pode ser um tratamento térmico, ou um pré-aquecimento dispensável, desde que se utilize um processo que elimine essa etapa, de forma a não majorar os custos nem prejudicar os parâmetros geométricos e físicos do estado final, F. Analogamente, $\overline{DE}$, ou $\overline{EF}$, ou $\overline{DF}$, pode representar um tratamento térmico, ou um jateamento, igualmente dispensável, na condição acima.

A trajetória $\overline{AE}$, ou $\overline{AD}$, ou $\overline{BE}$, ou $\overline{BD}$, pode ser um fresamento ou uma extrusão, ou um torneamento, ou uma usinagem por eletroerosão, por exemplo; por outro lado, $\overline{EC}$, ou $\overline{DC}$, pode representar uma sinterização, ou uma eletrodeposição, ou um recobrimento inorgânico etc.

De acordo com o número de peças a ser produzido, dispondo-se de todas as características dos estados inicial e final do material a ser processado, pode-se produzir econômica e acuradamente pela delineação do caminho crítico entre esses dois estados.

Para isso, é sumamente importante ao engenheiro saber discernir os processos nos quais várias formas de energia podem ser eficientemente fornecidas pelo meio-ambiente ao material, de modo que produzam as propriedades e configuração geométrica final desejadas mediante as melhores condições obteníveis de custo e tempo de operação.

2.3. Processos Não-Convencionais de Usinagem

Ferraresi¹ define operações de usinagem como sendo "aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões, ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco"; ... "cavaco é a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular". Entretanto, os processos não convencionais de usinagem são apropriadamente chamados "processos de usinagem sem cavaco" porque removem partículas (íons, moléculas, esférulas) do material da peça por fusão, vaporização e/ou reações químicas e dificilmente são visíveis a olho nu.

Operações de usinagem, em um aspecto mais abrangente, poderiam ser definidas como sendo aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões, ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem uma remoção de material sob a forma de cavacos ou partículas, de acordo com o tipo primordial de energia utilizado no mecanismo dessa remoção.

Se a energia operante é a mecânica, necessariamente há um contato físico entre a ferramenta e a peça, ensejando a formação de cavaco, como nas operações de torneamento, fresagem, furação, aplainamento etc.; se a energia operante é do tipo eletrotérmica, por exemplo, não há contato físico entre a ferramenta e a peça, sendo o processo de remoção caracterizado pela formação de partículas, como na usinagem com laser, com feixe eletrônico, por eletroerosão etc.

Para um determinado material, um processo de fabricação pode ser sintetizado através das especificações dos elementos a seguir:

- tipos de energia envolvidos
- meios pelos quais a energia é fornecida ao material, sob controle adequado
- fatores ambientais interagentes
- histórico das mudanças, no tempo, pelas quais passa o material desde o estado inicial até o estado final
- análise de custos.

Micheletti¹ e Springborn² apresentaram uma classificação genérica para os processos de fabricação que utilizam as tecnologias não-convencionais de usinagem na produção de peças. Essa classificação, muito simplificada, baseia-se na forma de energia predominante em cada processo e é apresentada nas Figuras 3, 4, e 5. Saliente-se que, nos processos produtivos, as formas de energia utilizadas constituem um conjunto denso combinado e não há nenhum processo de remoção de material que utilize apenas uma forma de energia, muito embora sempre haja um tipo fundamental empregado, a saber:

- energia mecânica (figura 3)
- energia eletrotérmica (figura 4)
- energia eletroquímica (figura 5.a)
- energia química (figura 5.b).

Os processos não-convencionais de usinagem (PNCU) utilizam a energia de forma diferente daquela adotada normalmente nas usinagens com remoção de cavaco (torneamento, furação, fresamento etc.) ou por deformação plástica (dobra, embutimento, recartilhagem etc.). A usinagem é feita por erosão, ou seja, com remoção de material sob forma de

partículas, cujas dimensões variam em uma larga faixa, pois essas partículas podem ser íons, colóides ou esférulas de algumas dezenas de micra.

Os processos de fabricação tradicionais exigem uma maior dureza da ferramenta em relação à da peça. O contato físico direto entre ambas, a presença de cavacos ou deformação plástica do material, a geometria da zona de corte ativa, o modo de utilização da energia etc., são elementos que bem caracterizam tais processos.

Seja uma usinagem por torneamento, por exemplo. O fornecimento de energia mecânica à peça provocará nesta, via ferramenta de corte, uma remoção de material, alterando o seu estado inicial. O processo se caracteriza por uma geração de calor, transmitido parcialmente para o meio-ambiente, e pelo desenvolvimento de forças de corte que provocam vibração do sistema "estrutura da máquina-ferramenta de corte-peça". A combinação destes dois fatores também pode ensejar problemas de distorção e fixação da peça. O transporte e a reciclagem dos cavacos resultantes da usinagem também envolvem considerável consumo de energia e tempo.

Nos processos não-convencionais de usinagem, ao contrário, não há necessidade de uma maior dureza da ferramenta em relação à peça, nem há forças transmitidas por contato direto entre a ferramenta e a peça². Isso será discutido posteriormente. Além disso, o desgaste da ferramenta, nesses processos, segue leis completamente diversas daquelas que regem o dos métodos convencionais.

O efeito do fornecimento de uma determinada quantidade de energia a um material depende da fonte de energia e do mecanismo pelo qual o material interage com essa fonte. Isso pode ser depreendido pela análise do diagrama apresentado na figura 3, que enfeixa os processos de usinagem que utilizam predominantemente a energia mecânica.

Dentre os processos que utilizam esse tipo de energia, destacam-se, como não-convencionais, aqueles em

Fig. 3 - Processos não-convencionais de usinagem que empregam fundamentalmente a energia mecânica²

que a erosão é o mecanismo principal de remoção do material:

- usinagem com ultra-som, UUS (ultrasonic machining, USM)
- usinagem com jato abrasivo, UJA (abrasive jet machining, AJM)
- usinagem magneto-abrasiva, UMA (magneto-abrasive machining, MAM)
- usinagem com jato líquido, UJL (water jet machining, WJM).

A figura 4 apresenta os processos de usinagem cuja principal modalidade de energia operante é a eletrotérmica, que emprega a vaporização e/ou fusão para remover material da peça. Distinguem-se:

- usinagem por eletroerosão, UEE (electric-discharge machining, EDM)

Fig. 4 - Processos não-convencionais de usinagem que empregam fundamentalmente a energia eletrotérmica²

- usinagem com feixe eletrônico, UFE (electron beam machining, EBM)
- usinagem com laser, ULA (laser beam machining, LBM)
- usinagem com feixe iônico, UFI (ion beam machining, IBM)
- usinagem com plasma, UPL (plasma arc machining, PAM).

Utilizando-se um procedimento inverso àquele do recobrimento eletrolítico, os processos que utilizam a energia eletroquímica são apresentados na figura 5.a. São eles:

- usinagem eletroquímica, UEQ (electro-chemical machining, ECM)
- retificação eletroquímica, REQ (electro-chemical grinding, ECG).

Fig.5.a- Processos não-convencionais de usinagem que empregam fundamentalmente a energia eletroquímica²

Finalmente, na figura 5b esboça-se o processo de remoção do material utilizando a energia química:

- usinagem química, UQU (chemical machining, CHM).

Fig.5.b- Processos não-convencionais de usinagem que empregam fundamentalmente a energia química²

2.4. Aspectos Gerais e Comparativos dos Processos Não-Convencionais de Usinagem

Para melhor ilustrar os últimos desenvolvimentos da tecnologia não-convencional de usinagem, apresentam-se algumas tabelas de dados referentes aos principais processos não-convencionais de usinagem. Alguns dos valores indicados baseiam-se em condições particulares de aplicação, tais como potencialidade do equipamento, operações específicas, classes de materiais, custos médios etc. Isso se faz necessário ao confronto entre esses processos, esboçando-se, dessa maneira, parâmetros de aplicações e limitações relativas, sob prismas semelhantes, para maior clareza de análise.

Tab. 2.1 - Parâmetros físicos de alguns processos não-convencionais de usinagem³

processo	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	POTÊNCIA (W)	"GAP" (mm)	MEIO FLUÍDICO INTERPOSTO
UEQ	10	10 000 cc	100 000	0,20	líquido eletrolítico
UPL	100	500 cc	50 000	7,5	argônio em hidrogênio
UEE	45	60 cc pulsada	2 700	0,025	líquido dielétrico
UUS	220	12 ca	2 400	0,25	abrasivo em água
UQU	-	-	-	-	líquido químico
UJA	110	1,5 ca	250	0,25	abrasivo em gás
ULA	4500	-	2 méd 2 000 máx	150	ar
UFE	10	0,001 cc pulsada	150 méd 2 000 máx	100	vácuo

Definem-se, inicialmente, alguns parâmetros físicos significativos desses processos na Tabela 2.1: tensão, corrente, potência, distância entre a ferramenta e a peça usinada ("gap") e o meio fluídico em que a usinagem se realiza.

Apenas a usinagem química prescinde do uso da energia elétrica, já que remove material por meio de reações químicas devido a um ataque ácido à peça. Os demais processos, ao contrário, utilizam uma fonte seja de corrente contínua, seja de corrente alternada. A usinagem com laser utiliza níveis de tensão da ordem de, pelo menos, 4.500 V; por outro lado, os mais baixos níveis de tensão são utilizados pelos processos de eletroerosão (45 V), eletroquímico (10 V) e por feixe eletrônico (10 V). Tais dados, como também todo o conjunto apresentado na Tabela 2.1, podem flutuar bastante no entorno daqueles valores, que não são fixos, mas dão uma ordem de grandeza representativa dos parâmetros físicos do processo.

Em termos de corrente, tanto a usinagem por feixe eletrônico como por eletroerosão utilizam corrente pulsada, com valores eficazes situados em 0,001 e 60 A, respectivamente; as usinagens com plasma e eletroquímica, corrente contínua com magnitudes médias de 500 e 10.000 A, respectivamente; a usinagem por ultra-som e por jato abrasivo empregam corrente alternada com valores eficazes situando-se em 12 e 1,5 A, respectivamente. A usinagem com laser utiliza uma fonte de tensão para ionizar o plasma do gás, permitindo a emissão de um feixe de luz coerente que, incidindo na peça, provoca erosão - este processo não utiliza, portanto, corrente elétrica no mecanismo de remoção de metal nem na fonte de energia.

No que diz respeito à potência necessária para o processo, salientam-se as usinagens eletroquímica (100.000 W) e com plasma (50.000 W), por um lado, e as usinagens com laser (2 W, em média), por feixe eletrônico (150 W, em média) e por jato abrasivo (250 W). Os processos eletroerosivo e ultra-sônico exigem níveis de potência na faixa de 2.700 e 2.400 W, respectivamente, enquanto o fresamento convencional situa-se nessa faixa (figura 6).

Em uma época em que os custos relacionados à energia são mais e mais ponderáveis, esse é um dado muito importante e que favorece sobremaneira a utilização dos processos não-convencionais, exceto a UEQ e a UPL.

Apenas três processos utilizam normalmente um "gap" relativamente grande: usinagens com laser (150 mm), por feixe eletrônico (100 mm) e com plasma (7,5 mm). O meio fluídico interposto na usinagem por laser é normalmente o ar, podendo ser, no entanto, qualquer tipo de fluido, ao contrário dos processos eletroquímicos e por eletroerosão que necessitam, pela ordem, de um líquido eletrolítico e dielétrico para possibilitar a usinagem.

A Tabela 2.2 apresenta alguns dados tecnológicos da usinagem propriamente dita: velocidade de remoção

de material, controle dimensional, acabamento superficial e profundidade a partir da qual se acentua a possibilidade de alterações superficiais na peça usinada.

Tab. 2.2 - Dados de usinagem de alguns processos não-convencionais³

processo	VELOCIDADE DE REMOÇÃO DE MATERIAL (mm^3/min)	TOLERÂNCIA (μm)	ACABAMENTO SUPERFICIAL (μm CLA)	PROFUNDIDADE DE ALTERAÇÃO SUPERFICIAL (μm)
UEQ	15 000	50	0,1 - 2,5	5
UPL	75 000	125	muito rugoso	500
UEE	800 - 3 000 (*)	15	0,2 - 10 2,5 - 30 (*)	125 - 250 (*)
UUS	300	7,5	0,2 - 0,5	25
UQU	15	50	0,5 - 2,5	5
UJA	10 - 15	50	0,5 - 1,2	2,5
ULA	0,1	25	0,5 - 1,2	125
ULAP	1 - 15	35	0,5 - 1,5	200
UFE	1,6	25	0,5 - 2,5	250
USINAGEM CONVENCIONAL	60 000	50	0,5 - 5,0	25

; (*) desbaste

Assim, a usinagem com plasma caracteriza-se por uma velocidade de remoção de material alta ($75.000 \text{ mm}^3/\text{min}$) – supera até mesmo aquela obtida pelo fresamento convencional ($60.000 \text{ mm}^3/\text{min}$). Ela é cinco vezes maior que a aquela obtida pela usinagem eletroquímica ($15.000 \text{ mm}^3/\text{min}$) e cinco vezes maior que a da usinagem por eletroerosão, no regime de desbaste ($3.000 \text{ mm}^3/\text{min}$) – esta, em regime de semi-acabamento, atinge $800 \text{ mm}^3/\text{min}$. A usinagem por eletroerosão, contudo, propicia um bom acabamento superficial e tolerâncias reduzidas, provocando uma modificação estrutural em uma delgada camada externa do material de espessura próxima a 150 micra. Observem-se as baixas velocidades de remoção de material obtidas pelas usinagens

com laser ($0,1 \text{ mm}^3/\text{min}$) e por feixe eletrônico ($1,6 \text{ mm}^3/\text{min}$), destinadas a aplicações bem específicas, no presente. A usinagem com laser de alta potência (ULAP), por outro lado, atinge níveis mais altos de velocidade de remoção de material ($15 \text{ mm}^3/\text{min}$), mas em detrimento das tolerâncias de fabricação.

A Tabela 2.2 evidencia, dessa maneira, a alta velocidade de remoção de material na usinagem com plasma, a qual supera, nesse aspecto, o fresamento convencional; no entanto, o acabamento superficial da peça usinada por aquele processo é deveras rugoso. Salientam-se, ainda, as usinagens eletroquímica e por eletroerosão, com melhores graus de acabamento superficial e tolerâncias dimensionais, apesar da usinagem ser bem mais demorada que a supracitada.

A Tabela 2.3 indica as possibilidades de usinagem segundo diversas operações: microfuração, furações cega e passante, execução de cavidade e de contorno superficial. Uma vez mais, destacam-se os processos eletroerosivo e eletroquímico, cuja gama de aplicações é muito boa, bastante versátil. Além daquelas listadas na Tabela 2.3, as usinagens eletroerosiva e eletroquímica se prestam a serviços especiais como, por exemplo, fabricação de pás de turbinas, agulhas hipodérmicas, peças de carburadores etc. Os demais processos destinam-se a aplicações mais específicas, muito embora, abranjam também os materiais não-metálicos, aos quais não se aplicam os dois processos acima mencionados, como será mostrado mais adiante.

Na microfuração de peças destacam-se as usinagens com laser, feixe eletrônico, química e por eletroerosão. Na usinagem de furos de pequeno diâmetro e comprimento superior a vinte vezes esse diâmetro, dois processos são os mais indicados: o eletroquímico e o eletroerosivo.

Apenas a usinagem química, devido às suas próprias características de remoção de material, não se pres

Tab. 2.3 - Aplicações de forma de alguns processos não-convencionais de usinagem³

processo	MICRO-FURAÇÃO	FURAÇÃO		EXECUÇÃO DE CAVIDADE		CONTORNO SUPERFICIAL	CORTE PASSANTE	
		L/D ≤ 20	L/D > 20	de precisão	normal		raso	profundo
UEQ	—	BOA	BOA	ACEITÁVEL	BOA	BOM	BOM	BOM
UPL	—	ACEITÁVEL	—	RUIM	RUIM	—	BOM	BOM
UEE	ACEITÁVEL	BOA	ACEITÁVEL	BOA	BOA	ACEITÁVEL	BOM (*)	BOM (*)
UUS	—	BOA	RUIM	BOA	BOA	RUIM	RUIM	—
UQU	ACEITÁVEL	—	—	RUIM	ACEITÁVEL	—	BOM	—
UJA	—	ACEITÁVEL	RUIM	RUIM	ACEITÁVEL	—	BOM	—
ULA	BOA	ACEITÁVEL	RUIM	RUIM	RUIM	—	BOM	ACEITÁVEL
UFE	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL	RUIM	RUIM	RUIM	—	BOM	ACEITÁVEL

(*) quando utilizado o corte com fio por eletro-erosão.

ta à fabricação de furos relativamente profundos. Todos os processos não-convencionais analisados podem ser utilizados na usinagem de cavidades, sendo que os mais indicados são os processos de ultra-som, eletroerosão e eletroquímico. Apenas estes três aplicam-se às operações de contorno superficial.

A aplicabilidade dos processos não-convencionais de usinagem aos diferentes materiais mais utilizados industrialmente, metálicos ou não-metálicos, é objeto de análise na Tabela 2.4. Dentre os materiais e ligas metálicas, selecionaram-se o aço, o alumínio, o titânio, superligas e refratários; dentre os materiais não-metálicos, os de maior uso corrente, ou seja, cerâmica, plásticos e vidro.

Vê-se, pela análise da Tabela 2.4, que a possibilidade de utilização dos processos não-convencionais de

Tab. 2.4 - Aplicabilidade de alguns processos não-convencionais de usinagem aos materiais mais utilizados na indústria mecânica³

PROCESSO	METAIS E LIGAS METÁLICAS					NÃO-METÁLICOS		
	AÇO	ALUMÍNIO	SUPERLIGAS	TITÂNIO	REFRATÁRIOS	CERÂMICAS	PLÁSTICOS	VIDRO
UEQ	BOA	ACEITÁVEL	BOA	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL	INAPLICÁVEL	INAPLICÁVEL	INAPLICÁVEL
UPL	BOA	BOA	BOA	ACEITÁVEL	RUIM	INAPLICÁVEL	RUIM	INAPLICÁVEL
UEE	BOA	ACEITÁVEL	BOA	BOA	BOA	INAPLICÁVEL	INAPLICÁVEL	INAPLICÁVEL
UUS	ACEITÁVEL	RUIM	RUIM	ACEITÁVEL	BOA	BOA	ACEITÁVEL	BOA
UQU	BOA	BOA	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL	RUIM	RUIM	RUIM	ACEITÁVEL
UJA	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL	BOA	ACEITÁVEL	BOA	BOA	ACEITÁVEL	BOA
ULA	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL	RUIM	BOA	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL
UFE	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL	BOA	BOA	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL

usinagem é muito ampla e complementa as alternativas apresentadas pela usinagem convencional. Eles se aplicam a todos os metais e ligas metálicas, uns com melhor propriedades que outros; salientam-se, nesse aspecto, as usinagens por eletroerosão, eletroquímica, com plasma e química. Aos materiais não-metálicos mais empregados, como os cerâmicos, plásticos e vidro, não se aplicam os processos eletroerosivo e eletroquímico; recomendam-se, nesse caso, as usinagens por ultra-som, jato abrasivo, laser e feixe eletrônico.

A compreensão das tabelas apresentadas é de fundamental importância à escolha correta dos equipamentos e processos destinados a certas linhas de produção, bem assim aos materiais a serem processados. Longe de serem com

pletas, elas apenas emolduram o quadro da tecnologia não-convencional de usinagem; o painel completo é pintado com o estudo minucioso de cada um deles, o que foge ao escopo do presente trabalho.

Tab. 2.5 - Efeitos de alguns processos não-convencionais de usinagem sobre o equipamento e a segurança ambiental³

processo	UE	QU	PL	UEE	UUS	UQU	UJA	ULA	UFE
RELAÇÃO DE DESGASTE (1)	0	—	0,01 6,6 (3)	10	—	—	—	—	—
MEIO DE USINAGEM (2)									
-CONTAMINAÇÃO	C	A	B	B	C	B	A	B	
-AQUECIMENTO	C	A	B	A	B	A	A	A	
MÁQUINA E EQUIPAMENTO									
-MANUTENÇÃO	B	B	B	B	B	B	C	B	
-PROTEÇÃO	C	A	B	A	C	B	B	B	
SEGURANÇA	B	A	B	A	B	B	B	B	
TOXICIDADE	A	A	B	A	B	A	A	A	

(1) $\text{RELAÇÃO DE DESGASTE} = \frac{\text{volume de material removido da peça}}{\text{volume de material removido do eletrodo}}$

(2) A - SEM PROBLEMAS; B - PROBLEMAS NORMAIS; C - PROBLEMAS CRÍTICOS.

(3) DEPENDE DAS CONDIÇÕES DE CORRE E DAS COMBINAÇÕES DE MATERIAIS DA PEÇA E DO ELETRODO.

É característica comum a todos os métodos não-convencionais de usinagem um maior consumo de energia em relação aos métodos convencionais. Sobre isso, um confronto econômico, nos dias atuais, posiciona-se a favor dos métodos convencionais na usinagem de materiais de baixa e média resistência mecânica e de formas correntemente utilizadas na indústria, como superfícies cilíndricas, pla-

nas, cônicas etc. Isso é enfatizado na Figura 6, que representa graficamente as velocidades de remoção de material versus as potências necessárias aos processos em análise.

Fig. 6 - Potência necessária à remoção de material através de alguns processos não-convencionais de usinagem³

Levando-se em conta, por outro lado, materiais de alta resistência, peças com paredes delgadas, matrizes de formas intrincadas, furos de pequeno diâmetro e boa profundidade, e nível de especialização da mão-de-obra utilizada na operação do equipamento, é patente a supremacia dos métodos não-convencionais de usinagem já nos dias de hoje, apesar de serem muito mais novos que os processos tradicionais de usinagem.

Alguns efeitos dos processos em tela sobre o equipamento e a segurança ambiental são apresentados na Tabela 2.5. Pode-se ver no item "relação de desgaste" entre o ferramental utilizado e a peça usinada ser este um problema crucial para os processos por eletroerosão e ultrassom, dependendo das condições de usinagem.

No processo químico, a contaminação do ácido de trabalho afeta a sua concentração, bem como as condições de usinagem; no processo eletroquímico, além disso, o aquecimento do fluido prejudica a acuracidade do processo, exigindo, por isso mesmo, que a temperatura do banho eletrolítico seja bem controlada. Os demais tipos de usinagem não-convencional não apresentam problemas críticos relacionados ao meio fluídico de serviço.

Na usinagem por eletroerosão, o sistema de filtragem do fluido dielétrico de serviço nem sempre é eficiente, mas a experiência tem mostrado que, dentro de certos limites, a contaminação do fluido dielétrico favorece as condições de usinagem, conferindo-lhe uma melhor estabilidade.

A manutenção dos equipamentos não exige cuidados especiais em relação àqueles tomados com as máquinas operatrizes convencionais, exceção feita ao equipamento empregado na usinagem com laser, pela sua sofisticação. Nos processos químico e eletroquímico, as partes em contato com o fluido de trabalho têm que ser protegidas do ataque ácido.

É necessário que se tomem algumas precauções para evitar acidentes ou intoxicações devido à operação dos equipamentos de usinagem não-convencional. Isso inclui as normas relativas à segurança do trabalho para máquinas de uso corrente, salvo nos casos em que o fluido de trabalho é tóxico, como nas usinagens química, eletroquímica e por eletroerosão.

Tomando-se por base as faixas de custos médios correntes no mercado internacional e as peculiaridades de

cada processo, elaborou-se a Tabela 2.6, com a finalidade de apresentar uma ordem de grandeza dos aspectos econômicos de cada um dos processos em apreço.

A usinagem eletroquímica tem custo global mais elevado dentre todos os processos não-convencionais de usinagem, principalmente devido ao alto custo do equipamento. No processo eletroerosivo, contudo, alto é o custo do ferramental e acessórios, sendo investimento de capital relativamente baixo face à versatilidade do processo.

Tab. 2.6 - Custos relativos de alguns processos não-convencionais de usinagem³

processo	INVESTIMENTO DE CAPITAL	FERRAMENTAL E ACESSÓRIOS	CONSUMO DE ENERGIA	DESGASTE DA FERRAMENTA
UEQ	MUITO ALTO	MÉDIO	MÉDIO	MUITO BAIXO
UPL	MUITO BAIXO	BAIXO	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO
UEE	BAIXO	ALTO	BAIXO	MÉDIO
UUS	BAIXO	BAIXO	BAIXO	MÉDIO
UQU	MÉDIO	BAIXO	(custo de deidos) ALTO	MUITO BAIXO
UJA	MUITO BAIXO	BAIXO	BAIXO	BAIXO
ULA	MÉDIO	BAIXO	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO
UFE	ALTO	BAIXO	BAIXO	MUITO BAIXO
USINAGEM CONVENCIONAL	BAIXO	BAIXO	BAIXO	BAIXO

custos médios (1980/81)
- em \$ 1000 -

MUITO BAIXO - 20 ou menos.
BAIXO - 20 e 50.
MÉDIO - 50 e 100.
ALTO - 100 e 200.
MUITO ALTO - 200 e 400.

Na usinagem com laser de alta potência, o equipamento é muito caro, assim como na usinagem por feixe eletrônico. Todos os processos não-convencionais de usina-

gem, como se pode constatar, têm custos mais elevados que os processos de usinagem convencionais. Entretanto, eles são competitivos quando confrontados aos processos de usinagem por copiamento ou por comando numérico, dependendo, logicamente, do volume de peças a ser fabricado e dos materiais utilizados na fabricação dessas peças.

Dentre os vários processos não-convencionais de usinagem desenvolvidos, os mais adotados nas diversas aplicações industriais são os de eletroerosão, ultra-som e eletroquímico, notadamente o primeiro, que se tem constituído em uma alternativa prática, justificável e econômica nos parques industriais contemporâneos, a ponto de ser considerada, desde já, como um processo convencional competitivo.

Nos dias atuais, fundem-se ficção e realidade, calcadas principalmente no desenvolvimento de novas pesquisas aerospaciais, para prever uma evolução acentuada e interagente nos materiais através da pesquisa e fabricação, nos laboratórios espaciais, de novas e importantes ligas, processos, dispositivos — toda uma tecnologia de vanguarda, enfim. A escassez de recursos energéticos, frente ao crescimento da população mundial, está induzindo o homem a otimizar e/ou reprogramar os seus conceitos pré-estabelecidos. Esses dois eventos, em paralelo, tornam fácil admitir, para os próximos anos, a total consagração dos processos de usinagem não-convencionais ou, pelo menos, de alguns deles, como a usinagem por eletroerosão — uma realidade palpável —, a usinagem eletroquímica, a usinagem com laser etc.

3. FUNDAMENTOS DA USINAGEM DE METAIS POR ELETROEROSÃO

3.1. Histórico

A erosão de metais por meio de descargas elétricas é conhecida desde meados do Século XVIII. A primeira constatação do fenômeno foi feita pelo cientista inglês Joseph Priestley, em 1762.

Isso, no entanto, foi um evento isolado e só no início deste século, em 1901, Bredig produziu soluções coloidais por "desintegração elétrica" utilizando um arco submerso em um líquido. Cinco anos mais tarde, Svedberg⁴ também conseguiu soluções coloidais a partir de descargas elétricas entre dois eletrodos convenientemente espaçados entre si e imersos em líquido dielétrico (Figura 7).

O circuito transformador de pulso desenvolvido por Svedberg possuía um capacitor C, responsável pelo armazenamento de energia, permanentemente ligado a um transformador principal, L_1 . O capacitor era periodicamente descarregado através de um "gap" de descarga, G_1 , fazendo as

- C - Capacitor
 G_1, G_2 - "Gaps" de descarga
 L_1 - Transformador
 L_2 - Bobina de alta-tensão, baixa corrente
 RL - Reservatório de líquido dielétrico

Fig. 7 - Centelhamento com transformador secundário - circuito de Svedberg"

vezes de um interruptor na bobina de alta tensão e baixa corrente, L_2 , de modo que o transiente das descargas pulsantes espaçadas no tempo, induziam a descarga no enrolamento de baixa tensão do transformador conectado ao "gap" de descarga G_2 , formado pelo eletrodo de corte e a peça, produzindo dessa maneira metal coloidal e, paralelamente, uma erosão nos eletrodos.

Firmemente imbuído em produzir soluções coloidais a partir de descargas elétricas, Kohlschütter⁵, em 1919, desenvolveu e utilizou com absoluto sucesso o circuito da Figura 8, que se assemelhava bastante a um circuito de relaxação empregado nas máquinas eletroerosivas dos nossos dias. Em suas pesquisas, amplamente difundidas nas revistas científicas especializadas da época, o alemão empregou água destilada como fluido dielétrico e constatou que a utilização de um circuito de descarga de mínima indutância era o que melhor se prestava à remoção de metal dos eletrodos, sendo que o de polaridade positiva "desintegrava-se" bem mais que o de polaridade negativa.

Fig. 8 - Circuito de relaxação desenvolvido por Kohlschütter⁵

Infelizmente, Kohlschütter estava exclusivamente interessado nos colóides produzidos e desprezou as demais potencialidades do circuito por ele desenvolvido.

Há uma patente inglesa de 1931 que descreve o funcionamento de uma serra de fita para o corte de metais que utiliza um arco contínuo. A fita é acionada a alta velocidade, evitando-se dessa maneira o superaquecimento e a fusão do material de que é constituída, pelo arco elétrico. Obviamente, no dispositivo inexistente ação de corte por meio de dentes, como no processo convencional.

Em 1934, Buss e seus colaboradores apresentaram, nos Estados Unidos da América do Norte, um trabalho sobre a utilização de descargas elétricas por meio de arcos interrompidos, originados de contatos vibratórios, para produzir soluções coloidais destinadas ao tratamento

de água para caldeiras a vapor. O seu dispositivo constava de um par de elétrodos que possuíam contato vibratório, sendo um deles um disco rotativo de material ferroso, estando ambos imersos na água de alimentação da caldeira.

A Figura 9 mostra u'a máquina, semelhante a um torno mecânico, desenvolvida e utilizada em 1936 por Holslag⁶. Através dela , são gerados arcos de corrente contínua interrompidos, provenientes de um mau contato entre uma peça rotativa e um elétrodo estacionário, no ar.

Fig. 9 - Máquina de Holslag⁶

Nos seus experimentos, Holslag⁶ observou que para obter uma superfície bem plana, deve-se ajustar a tensão entre o elétrodo e a peça, à metade daquela exigida para manter um arco estacionário entre esse elétrodo e a peça.

Uma serra circular que utiliza um arco elétrico móvel em operações de corte é descrita em uma patente inglesa datada de 1937. O dispositivo prevê alta rotação da serra, permitindo-lhe assim um bom resfriamento, enquanto a peça é aquecida à temperatura de fusão no ponto de corte pelo arco interrompido formado entre a borda da serra e a peça; não há ação de corte por meio de dentes, como no processo convencional.

Em 1942, Burnett propôs a utilização de descargas de arcos interrompidos entre um elétrodo vibratório e uma peça banhada por um fluido estacionário, na remoção de brocas e machos quebrados no interior de peças. Em 1947, essa patente foi registrada na Inglaterra, seguida imediatamente por diversas outras semelhantes.

Warwick projetou, em 1943, um dispositivo similar ao de Burnett, no qual um elétrodo vazado girava e vibrava simultaneamente, enquanto era resfriado por ar comprimido, produzindo assim arcos interrompidos. A partir de então, vários dispositivos chamados "desintegradores" foram desenvolvidos e comercializados.

Quando verificavam o desgaste de contatos interruptores, em 1943, os pesquisadores soviéticos B. R. Lazarenko e N. I. Lazarenko constataram, analisaram e desenvolveram a extraordinária capacidade erosiva das descargas elétricas em um meio fluido, praticamente "redescobrimdo" o trabalho de Kohlschütter, dando-lhe asas e aplicabilidade imediata já na II Guerra Mundial, através da fabricação de artefatos bélicos que utilizavam materiais de alta resistência.

Nascia aí, efetivamente, a usinagem por eletroerosão.

A "Bendix Aviation Corporation" desenvolveu nos Estados Unidos da América do Norte, em 1945, patenteando-o na Inglaterra, um dispositivo que empregava um arco elétrico para o balanceamento automático dos corpos em rotação, tais como os rotores de giroscópios utilizados nos aviões.

Rudorff, em 1950, registrou a primeira patente na Inglaterra e, quiçá, no mundo, descrevendo o moderno processo de corte por eletroerosão com um fluido dielétrico passando através da zona de corte. Cinco anos depois, já surgiam máquinas que utilizavam um servocomando eletro-hidráulico do cabeçote, cujo sistema foi imediatamente adotado pela maioria das máquinas a partir de então.

A utilização de um fio que se move continuamente como um eletrodo no processo de usinagem por eletroerosão foi feita pela primeira vez na Rússia, na metade da década de cinquenta. O processo foi utilizado, alguns anos mais tarde, na Inglaterra e Estados Unidos da América do Norte, na produção de pequenas ranhuras em pulsadores de neutron requeridos pela respectiva indústria atômica, e por outras, na preparação de amostras metalúrgicas.

A franca aceitação do processo eletroerosivo ensejou novos desenvolvimentos, como a introdução, em 1957, do porta-eléctrodo magnético e a apresentação, em 1959, dos geradores de impulsos controlados, totalmente transistorizados; em 1964, surgiu o primeiro gerador de impulsos isoenergéticos, enquanto em 1968, foram incorporados às máquinas de usinagem por eletroerosão mandris guiados por mancais hidrostáticos, propiciando-lhe grande precisão de guia e melhoria do funcionamento do sistema de avanço servocomandado.

Em 1972, surgiu mais uma inovação de destaque, ao ser desenvolvido e apresentado comercialmente um monitor que analisa o desempenho de usinagem, corrige automaticamente alguns parâmetros de regulação e dá diretrizes que permitem ao operador otimizar as condições dessa usinagem.

Em 1973, surgiu a máquina de corte com fio por eletroerosão, acionada por comando numérico. Em 1976, já considerado naquele país um processo convencional de usinagem, foi testada com sucesso absoluto pela Raycon Corporation, nos Estados Unidos, uma linha de transferência automática assíncrona que utiliza máquinas de eletroerosão, em todas as suas estações, para a usinagem de pequenos furos, assegurando-lhe alta repetibilidade e tolerâncias estreitas.

O aperfeiçoamento do processo de usinagem por eletroerosão, através de suas máquinas, equipamentos e sistemas de controle, continua. A cada dia, surgem novas i-

déias e projetos de otimização, o que assegura a utilização em escala crescente do método em todo o mundo.

3.2. A Descarga Elétrica

O fenômeno da descarga elétrica entre dois eletrodos apresenta diferentes características, conforme a natureza e condições do meio no qual estes se encontram. Distinguem-se, assim:

- descarga no vácuo
- descarga em gás muito rarefeito
- descarga em ar ou gás, à temperatura e pressão normais
- descarga em líquido dielétrico
- descarga em líquido eletrolítico.

Ao processo eletroerosivo dizem respeito os tipos de descarga acima sublinhados

3.2.1. A Descarga Elétrica em um Meio Gasoso

A descarga elétrica em um meio gasoso tem sido objeto de diversas pesquisas viabilizadas devido ao grande interesse que o assunto desperta no desenvolvimento da técnica moderna; ela é utilizada para produzir plasma sob condições de laboratório, bem assim para excitar a maioria dos "lasers" a gás, dentre outras aplicações.

A Figura 10 apresenta um diagrama INTENSIDADE DE CORRENTE x TENSÃO ELÉTRICA que auxilia a descrição das características fundamentais da descarga em um meio gasoso. Ao se aumentar paulatinamente a tensão entre os dois eletrodos, constata-se que a corrente também aumenta, segundo a Lei de Ohm (trecho OA do diagrama). Em seguida, quando os íons deslocados sob o efeito da tensão tornam-se iguais, em número, àqueles que se formam nesse espaço,

a corrente se estabiliza (trecho AB do diagrama). O valor da corrente depende, aqui, do fator ionizador do gás. Em condições normais, esse fator, sendo pequeno, ensejará um valor insignificante à corrente.

Quando a tensão atinge um determinado valor, a velocidade de deslocamento dos íons torna-se tão grande que seus choques com as moléculas neutras arrancam os elétrons destas, provocando assim uma ionização complementar que, por sua vez, aumenta a intensidade de corrente entre os elétrodos (trecho BC do diagrama). Dá-se, aqui, uma verdadeira descarga, acompanhada de um fenômeno de luminescência do gás, entre os elétrodos.

Fig. 10 - Diagrama INTENSIDADE DE CORRENTE x TENSÃO caracterizando as diferentes formas de descarga entre dois elétrodos imóveis no ar, à pressão normal.

Até o ponto C do diagrama da Figura 10, há uma característica positiva da curva, ou seja, um aumento na tensão é sempre seguido por um aumento na corrente. A partir de uma certa tensão-limite, porém, a resistência do meio é vencida, caracterizando-se uma nova forma de descarga, espontânea - é a descarga por centelha (trecho CD do diagrama) - que se distingue por uma declividade negativa, no diagrama.

Com efeito, nesse caso, um aumento na corrente provoca uma queda de tensão, permitindo uma passagem maciça da carga contida no circuito de alimentação em um tempo extremamente curto, da ordem de 10^{-4} segundo, ou menor. Aqui, a descarga é inteiramente independente da natureza do circuito de alimentação e todo o fenômeno depende unicamente da quantidade de energia acumulada nessa alimentação.

Se a potência da fonte de alimentação não for suficiente para manter o processo de descarga de forma contínua, a tensão entre os eletrodos, após a descarga, cai a um valor mínimo, fazendo com que a descarga cesse, devido à resistência imposta pelo meio situado entre os dois eletrodos. Se, ao contrário, a potência da fonte de alimentação for suficiente para manter as condições de descarga, o processo se estabiliza sob a forma de um arco elétrico (trecho DE do diagrama).

A seção OA do diagrama é caracterizada por uma série de fenômenos que é utilizada principalmente pela eletrônica; as descargas da seção BC são frequentemente empregadas na purificação de gases, coloração superficial de relevos complicados etc.; a zona CD, das descargas bruscas e espontâneas, caracteriza as centelhas elétricas e, finalmente, a seção DE tem um largo campo de aplicação na soldagem de metais e ligas metálicas.

As descargas por centelhas elétricas que se formam no ar ou em um gás qualquer não produzem efeitos suficientes sobre os eletrodos para serem utilizadas como um

meio significativo de arrancamento de material. O fenômeno assume um aspecto totalmente diferente tão logo se mergulham os elétrodos em um meio dielétrico líquido. O processo físico da descarga torna-se extremamente mais complexo e surgem novos fatores importantes:

- uma grande concentração espacial da descarga, provocando uma destruição localizada nas superfícies dos elétrodos, cuja magnitude corresponde à energia da descarga;
- um efeito de polaridade, segundo o qual a erosão dos dois elétrodos dá-se de forma distinta, ou seja, a remoção de material do ânodo é, normalmente, maior que a do cátodo.

3.2.2. A Descarga Elétrica em Líquido Dielétrico

A descarga elétrica em um meio dielétrico líquido se produz em consequência de uma ruptura da resistência imposta pelo meio à passagem da corrente elétrica. Diversos experimentos têm mostrado que se podem distinguir três fases essenciais dessa descarga:

- FASE PREPARATÓRIA - sob a influência de um potente campo elétrico, durante um tempo da ordem de 10^{-7} a 10^{-8} segundo, o meio dielétrico ioniza-se entre os dois pontos mais próximos entre os elétrodos, ou seja, os picos mais salientes, que ultrapassam sensivelmente o plano médio teórico das superfícies que separam cátodo e ânodo. Tais picos, insignificantes sob o ponto de vista mecânico, têm variações de aproximação de 20 a 40% em relação à pequena distância que separa os elétrodos ("gap"). Uma ionização particularmente forte tem lugar, portanto, entre esses dois pontos,

favorecendo a formação da descarga nesse lugar preciso, pontiforme, de modo que a formação simultânea de várias descargas torna-se praticamente impossível.

Fig. 11 - Corte longitudinal de dois eletrodos, aproximados à distância média eletroerosiva

A Figura 11 representa, a título de exemplo, em uma escala de 1 : 1000, guardadas as devidas proporções, as superfícies de dois eletrodos posicionados à distância média de eletroerosão. Aqui, a rugosidade superficial média quadrática, R_q (RMS), caracteriza a qualidade mecânica da superfície, E indica o desvio médio das duas superfícies de resistência teórica; E_{min} é a distância entre os dois pontos mais próximos entre os eletrodos; R_{max} é o desvio entre as asperidades e os vales de uma mesma superfície; a flecha indicativa de "descarga" ressalta o local mais favorável para que haja uma descarga elétrica entre os eletrodos, sob condições normais do "gap".

- FASE DE DESCARGA PROPRIAMENTE DITA - passagem maciça de corrente devido à carga armazenada pelo circuito de alimentação e à formação de uma zona de plasma com temperatura entre 8.000 e 12.000 °C, na região ionizada. Quando a descarga eletroerosiva tem lugar, a temperatura do plasma atinge picos de até 50.000 °C⁹.
- FASE DE EXPULSÃO DO METAL REMOVIDO - tem início durante a fase anterior e continua após o fim da descarga. Os esquemas apresentados pela Figura 12, representam, de um modo sumário, as diversas etapas da descarga.

Fig. 12 - Representação esquemática do fenômeno da descarga em um meio dielétrico líquido⁸

- . Esquema a - uma intensificação do campo elétrico entre as asperidades mais próximas, entre os dois eletrodos polariza e orienta as moléculas e os íons do fluido dielétrico, bem como as

partículas sólidas que se encontram em suspensão no líquido de serviço.

- . Esquema b - uma vez que a ionização do meio atinge um nível suficiente, formam-se canais de elevada condutibilidade (os chamados "streamers"), facilitando a passagem da corrente de descarga e determinando o seu caráter de espontaneidade.
- . Esquema c - como a resistência do meio, nesse lugar, cai bruscamente a um valor próximo de zero, a intensidade de corrente pode atingir valores da ordem de milhares de Ampêres, com um incremento da ordem de 10^6 a 10^8 A/s. O exame espectrográfico da zona de descarga tem mostrado que o canal é constituído pelo plasma, pelo vapor dos metais de que são feitos os elétrodo e pelo gás resultante da decomposição química do dielétrico sob a ação da centelha elétrica.
- . Esquema d - a passagem maciça da corrente ioniza ainda o canal e cria um campo magnético potente que atrai os íons para o eixo da descarga (efeito "pinça"); estes, por sua vez, comprimem novamente o feixe de corrente, exercendo sobre ele uma pressão importante, impelindo a temperatura a atingir os valores necessários à formação do plasma. Ao mesmo tempo, dada a extrema rapidez da formação da bolha gasosa, esta exerce uma pressão considerável sobre o líquido do "gap". A quantidade de calor desenvolvida pela descarga e concentrada nas asperidades dos dois elétrodo é suficiente para fundir uma parte e vaporizar outra do metal desses elétrodo. As linhas de temperaturas-limite,

2.600 e 1.100 °C, representadas na figura, correspondem aproximadamente à quantidade de metal removida por vaporização e fusão, respectivamente.

- . Esquema e - simultaneamente com os efeitos térmicos da descarga, esta última se manifesta sob a forma de um choque mecânico dos elétrons e do plasma "arrastado" por eles, em uma forma comparável ao choque de um projétil a uma velocidade extremamente elevada, cujo resultado se manifesta pela expulsão do metal fundido e vaporizado, descobrindo nesse lugar a cratera típica da descarga erosiva. O choque dos íons positivos contra a superfície do cátodo, que sofre igualmente o efeito térmico da descarga, faz ejetar também um certo volume de metal, provocando um certo desgaste no cátodo. No fim da descarga, devido à interrupção da fonte de energia, a pressão no interior da bolha de gás formada em redor do canal de descarga cai bruscamente até um valor negativo, acontecendo um fenômeno similar à cavitação. O metal fundido e vaporizado pela descarga é então varrido por um violento contrachoque hidráulico que intervém favoravelmente no processo de erosão, facilitando a limpeza dos resíduos da zona de descarga.
- . Esquema f - vê-se, aí, a cratera característica de uma descarga erosiva sobre o ânodo, de maiores proporções que aquela verificada sobre o cátodo. O material ejettato encontra-se sob a forma de esférulas, no "gap".

Como visto, o efeito de uma descarga eletroerosiva pode ser comparado ao de uma explosão que, por sua e

nergia concentrada, ultrapassa — guardadas as proporções — aquelas produzidas pelos mais possantes explosivos...

O metal fundido e/ou vaporizado, ejetado da zona de descarga, recondensa-se em seguida no banho dielétrico do reservatório de serviço e assume a forma de colóides, cujas dimensões dependem dos parâmetros elétricos da descarga, das propriedades físico-químicas dos metais dos eletrodos e do líquido dielétrico.

Imediatamente após ser utilizada a energia de uma centelha erosiva, o canal de contubilidade elétrica se refaz e o mesmo ciclo pode recomeçar para dar lugar à descarga seguinte, na região de asperidades mais próximas entre os eletrodos.

A teoria eletrotérmica descrita é atualmente a mais aceita nos meios científicos que estudam o fenômeno da UEE. As teorias eletromecânica e termomecânica² apresentam discordâncias frontais com resultados experimentais obtidos e são, hoje, consideradas como obsoletas.

3.3. Aplicações Industriais do Processo de Usinagem por Descargas Elétricas

Há mais de trinta anos que o processo de usinagem por eletroerosão — UEE (EDM) foi "apresentado" oficialmente como um método de fabricação. Nos seus primeiros anos, a UEE foi referendada como a última palavra no campo da usinagem dos metais, e alguns pesquisadores mais otimistas predisseram que o processo tornaria, em pouco tempo, todos os demais métodos de usinagem obsoletos.

Essa primeira etapa, quando se extrapolava o futuro do novo processo com base na sua versatilidade, fruto inequívoco do entusiasmo vigente na época de pós-guerra, fez com que se esquecessem a sua principal limitação: a velocidade de corte.

As velocidades de remoção de metal, em todos os processos de usinagem por descargas elétricas, são limita

das por fatores inerentes ao próprio processo, como pode ser inferido pela análise acurada do fenômeno da descarga, na seção anterior.

Apesar da verdadeira bateria de ensaios encetados pelos fabricantes de máquinas eletroerosivas e dos sofisticados circuitos eletrônicos desenvolvidos até o presente, houve muito pouca evolução na velocidade de remoção de metal, dentro dos parâmetros de tolerância exigidos pela engenharia de fabricação. Esse fato pode ser facilmente averiguado confrontando-se os valores obtidos pelas máquinas modernas com aquelas de trinta anos atrás.

A experiência tem mostrado que se constata progressos no processo de usinagem por descargas elétricas sempre que alguma idéia nova demove os vínculos impostos pela errônea suposição de que esse processo substituirá — quando, na verdade, ele complementar — com evidentes vantagens — todos aqueles desenvolvidos nas máquinas-ferramenta convencionais.

O processo eletroerosivo, contudo, tem aplicabilidade muito boa no campo da usinagem de metais, particularmente na fabricação de ferramentas, matrizes, peças delgadas e execuções de forma complicada, onde se firma cada vez mais. Também tem tido boa aceitação na produção de furos, em sistemas de alimentação de combustível de motores de automóveis e aviões, peças de relógio e de computador etc.

Os métodos atualmente aplicados são os seguintes:

- 3.3.1 - USINAGEM POR ELETROEROSÃO - UEE
(Electrical-Discharge Machining - EDM)
- 3.3.2 - RETIFICAÇÃO POR ELETROEROSÃO - REE
(Electrical-Discharge Grinding - EDG)
- 3.3.3 - SERRAMENTO POR ELETROEROSÃO - SEE
(Electrical-Discharge Sawing - EDS)

3.3.4 - CORTE COM FIO POR ELETROEROSÃO - CFEE
(Electrical-Discharge Wire Cutting - EDWC).

As Figuras de 13 a 24 ilustram as possibilidades do processo, empregadas atualmente⁹.

Fig. 13 - Furação passante por eletroerosão

Fig. 14 - Roscamento por eletroerosão

Fig. 15 - Furação cega por eletroerosão

Fig. 16 - Furação cega, com orifício de lava

Fig. 17 - Corte com uma lâmi
na por eletroerosão

Fig. 18 - Corte com um fio
por eletroerosão

Fig. 19 - Corte com uma fita
por eletroerosão

Fig. 20 - Corte com um dis
co rotativo por
eletroerosão

Fig. 21 - Retificação externa por eletroerosão

Fig. 22 - Retificação interna por eletroerosão

Fig. 23 - Retificação plana por eletroerosão

Fig. 24 - Retificação de perfil por eletroerosão

3.3.1. Usinagem por Eletroerosão - UEE

A usinagem por eletroerosão (UEE) é um método de produção de furos, ranhuras ou outras cavidades em materiais eletricamente condutores, por meio da remoção controlada de material através da fusão e vaporização provo-

cada por centelhas elétricas a alta frequência (160 a 500 mil centelhas por segundo).

A descarga elétrica é produzida por pulsação controlada de corrente contínua entre a peça a ser usinada — geralmente, o ânodo — e o eletrodo-ferramenta — na maioria das vezes, o cátodo. A extremidade do eletrodo e a peça são separadas por uma distância que normalmente varia entre 10 e 510 μm ("gap"), dependendo da tensão de descarga, necessariamente superior a 20 V, e são imersas ou banhadas por um fluido dielétrico, Figura 25.

Fig. 25 - Esquema de funcionamento de u'a maquina de usinagem por eletroerosão

O arrancamento de material é obtido, pois, por uma sucessão de descargas não-estacionárias, separadas umas das outras no tempo, ou seja, o fenômeno é unitário e periódico. Cada descarga produz bastante calor para fundir e/ou vaporizar uma micro-região da peça, deixando uma pequena cavidade ou cratera na sua superfície.

A principal vantagem desse processo é que ele permite a usinagem de geometrias irrealizáveis pelos métodos clássicos de usinagem de metais e que exigiriam sistemas de copiamento e/ou comando numérico complexos e onerosos, além de pessoal altamente especializado. Tal vantagem é amplificada enormemente se a peça a ser trabalhada

for constituída de um material de média ou alta resistência mecânica.

A UEE abrange um vasto campo de aplicabilidade industrial na usinagem de metais. Entretanto, a preços competitivos, a UEE é utilizada na fabricação de ferramentas, matrizes para forjamento e estampagem, moldes, matrizes de corte e micro-usinagens em equipamentos de motores, instrumentos científicos etc.

3.3.2. Retificação por Eletroerosão - REE

A retificação por eletroerosão (REE) é um método de remoção de metal por meio de descargas elétricas a alta frequência entre uma ferramenta giratória e uma peça a ser usinada, as quais são separadas entre si e banhadas por um fluido dielétrico - normalmente óleo hidrocarboneto filtrado -. A Figura 26 mostra esquematicamente o processo.

Fig. 26 - Componentes básicos de uma retificadora eletroerosiva¹⁰

Nas máquina REE, o "gap" é servocomandado, com um ajuste normalmente compreendido entre 8 e 12 μm ; os geradores utilizados cobrem uma faixa de 30 a 100 V, 0,5 a 200 A e 2 a 500 KHz. O eletrodo-ferramenta giratório, nor

malmente de grafite, tem uma velocidade tangencial variando em uma faixa de 0,5 a 3,0 m/s.

Máquinas de retificação por eletroerosão ainda não são fabricadas no Brasil, mas são disponíveis nos parques industriais dos Estados Unidos, Rússia, Hungria, Suíça, dentre outros. Uma fresadora horizontal ou uma retífica plana convencional pode ser adaptada para o processo, desde que se acople à mesa da máquina um reservatório apropriado para encerrar o líquido dielétrico, bem como um gerador conveniente. O método também é possível ser executado em u'a máquina UEE, após se montar a roda-ferramenta no eixo vertical do cabeçote e transferir o sistema de servoavanco deste para a mesa da máquina.

Pode-se obter, com a REE, maior precisão na retificação de materiais duros, tais como ferramentas conformadoras ou carbonetos metálicos engastados em barras, muito embora sua velocidade de remoção de material seja baixa. Com rodas-ferramenta acuradas, a REE assegura tolerâncias de até $2,5 \mu\text{m}$, sendo comum se obter $\pm 5 \mu\text{m}$; acabamento superficial da ordem de $0,2 \mu\text{m RMS}$ é o melhor que se consegue ao se utilizar rodas de grafite. Ferramenta de latão também é indicada ao processo, principalmente na usinagem de peças de seções delgadas; no entanto, além de ser mais difícil usiná-la com acuracidade elevada, é mais dispendiosa que a de grafite.

A REE, afora as aplicações citadas, é indicada na retificação de metais quebradiços e formas frágeis, devido à ausência de forças de corte significativas no processo.

3.3.3. Serramento por Eletroerosão - SEE

O serramento por eletroerosão (SEE) é uma variação da UEE que combina o movimento da serra de fita com a erosão elétrica da peça, como indica a Figura 27. Movendo-se rapidamente (25 a 30 m/s) a aresta de corte da fita

de aço especial com espessura nominal de 0,635 mm é guiada na peça por insertos de carbonetos metálicos. Um corte de 0,794 mm é realizado no material usinado e, diferentemente da UEE, o "gap" não é controlado, nem se utiliza um dielétrico fluídico no processo, mas um fluxo de água res_fria a peça, não evitando a contínua formação de arco elétrico, sob condições de alta amperagem e baixa voltagem (6 a 24 V).

Fig. 27 - Esquema de funcionamento de u'a máquina de serrar por eletroerosão¹⁰

Como nos demais processos eletroerosivos, nem a ferramenta nem a peça são sujeitas a maiores esforços de corte. Durante a usinagem, é necessário fazer-se uma ajustagem precisa entre a velocidade de avanço da mesa de trabalho e a velocidade de erosão do arco elétrico, evitando assim o contato físico entre ferramenta e peça, descaracterizando e prejudicando o processo.

Estruturas celulares frágeis podem ser cortadas pela SEE, sejam elas de alumínio, aço inoxidável, titânio etc. Outro campo de utilização vantajosa da SEE é o corte de tubulações de trocadores de calor de paredes finas, bem como peças similares. O processo não deixa rebarba, nem tampouco produz achatamento das bordas da peça usinada.

3.3.4. Corte com Fio por Eletroerosão - CFEE

O corte com fio por eletroerosão (CFEE) é uma forma especial de usinagem por eletroerosão na qual o elé trodo-ferramenta é um fio condutor que se move continua-mente. O fio tensionado de cobre, latão, tungstênio ou molibdênio, tem pequeno diâmetro, da ordem de 50 a 300 μ m, ou menor, e é guiado para produzir um corte estreito e reto. Geralmente, um movimento programado, ou numericamente comandado, guia o corte, enquanto a sua largura é ditada pelo controle de energia de descarga. A figura 28 apresenta o processo básico de corte com fio por eletroerosão, numericamente comandado.

As duas maiores limitações do CFEE dizem respeito ao fato do processo não executar cavidades cegas e ao custo do equipamento, avaliados entre cem e trezentos mil dólares, dependendo do tamanho, versatilidade, acuracida-de e sofisticação do sistema. Em contra-partida, enquanto na UEE elétrodos complexos representam cerca de 40 a 60% do preço total da peça usinada, os custos relacionados com o fio de corte, no CFEE, utilizado uma única vez, são baixos.

A velocidade de corte do processo é muito bai-xa, também. Na usinagem de carbonetos de 25 mm de espessura obtém-se uma velocidade de, apenas, 15 mm/hora; peças de aço temperado são cortadas a uma velocidade duas vezes maior que essa, para igual espessura. Trabalhando-se a essa "rapidez", consegue-se um acabamento superficial de cerca de 40 μ m RMS, muito rugoso, portanto. Um acabamento refinado sacrifica a velocidade de corte, sendo a recíproca, verdadeira.

Há dois tipos básicos de máquinas CFEE: o pri-meiro, mais antigo, apresenta o sistema-guia do fio, estacionário, enquanto a peça se move; na outra configuração, há uma inversão no movimento relativo entre a peça usina-da e o sistema-guia da ferramenta. Enquanto no primeiro ti

Fig.28 - Sistema de corte com fio por eletroerosão que utiliza comando numérico¹⁰

po o sistema-guia do fio é mais robusto e fornece uma melhor acuracidade, no segundo, há uma compensação relaciona-

da à massa da peça, cuja seção transversal seja variável, além desse sistema simplificar o carregamento e descarregamento do material na mesa de serviço.

O dielétrico utilizado no processo é água filtrada e desionizada e, em menor escala, óleo hidrocarbônico. A peça pode ser usinada totalmente submersa nesse líquido, como na UEE, ou apenas sob um banho de um a três jatos dielétricos concentrados na zona de corte.

A utilização do CFEE permite a usinagem de formas complexas, quais sejam, engrenagens, polias, catracas, gabaritos, lapidação de monocristais, cantos quadrados internos etc., em materiais condutores de eletricidade. Matrizes para conformação mecânica e execução de perfis complexos são também aplicações correntes do CFEE.

4. MÁQUINAS, FERRAMENTAS E ASPECTOS ECONÔMICOS DA USINAGEM DE METAIS POR ELETROEROSÃO

4.1. Generalidades

Uma vez discutidos os fundamentos da UEE, analisam-se, neste capítulo, os equipamentos e as ferramentas utilizadas nesse processo. Devido às características inerentes à UEE, cujos fundamentos diferem completamente daqueles pertinentes à usinagem convencional, as máquinas e as ferramentas empregadas no processo eletroerosivo, distinguem-se daquelas usadas tradicionalmente na usinagem de materiais, como será visto a seguir.

O capítulo é complementado por uma análise comparativa dos custos de fabricação de uma matriz para forjamento, executada por fresamento por copiamento e por UEE. Este método mostra-se competitivo e, em algumas aplicações nesse campo, é absolutamente imprescindível às modernas ferramentarias.

4.2. Máquinas UEE

A usinagem por eletroerosão, mais que um processo de usinagem, é uma técnica na qual a forma trabalhada é reproduzida pelo perfil da ferramenta. A partir do momento em que essa reprodução é fiel, o interesse pelo processo aumenta, pois ele oferece a possibilidade de executar impressões ou furações de quaisquer formas em todos os materiais condutores de eletricidade.

A "fidelidade de reprodução" será tanto melhor à medida que o posicionamento, a orientação e a trajetória do eletrodo-ferramenta, em relação à peça, forem perfeitamente determinados. Tais necessidades exigem u'a máquina que, além de um posicionamento preciso, possa assegurar, no tempo, a perpendicularidade, a linearidade e a estabilidade do eixo de deslocamento da ferramenta.

Na máquina, esses imperativos geométricos exprimem-se pela necessidade de se ter u'a máquina rígida, estável, com guias precisas e um sistema de resfriamento do dielétrico que minimize o surgimento de deformações térmicas, condições básicas para a obtenção dos resultados almejados.

Sendo numerosas as aplicações da usinagem por eletroerosão em nossos dias, é lógico que deve haver um casamento entre a reprodução fiel, o posicionamento preciso e o emprego econômico do processo, na prática. Isso acarretou o surgimento de três famílias de máquinas-ferramenta eletroerosivas, a saber:

- pequenas máquinas para operações de superacabamento e alta precisão: destinam-se à indústria eletrônica, laboratórios de pesquisa (na separação de monocristais, por exemplo), tecnologia de reatores atômicos e outras aplicações que envolvem problemas de produção.

- máquinas universais médias: têm largo emprego na fabricação geral de ferramentas e moldes, bem como na execução de furos afilados de extrema precisão.
- grandes máquinas e máquinas especiais: são utilizadas na fabricação de matrizes e moldes de grandes dimensões, ferramentas para carrocerias na indústria automobilística etc.

Em todos os tipos de máquinas de usinagem por eletroerosão comercializados, distinguem-se três conjuntos principais:

- 4.2.1 - um mecânico, composto de uma base e sua respectiva coluna, um cabeçote de usinagem, uma mesa de serviço e um sistema de fixação para a peça e para o elétrodo-ferramenta.
- 4.2.2 - um elétrico, composto de um gerador eletroerosivo, um sistema regulador do avanço do cabeçote (normalmente híbrido), um termo-resistor para monitoração da temperatura do dielétrico e demais mecanismos e órgãos elétricos componentes dos diversos tipos de máquinas-ferramenta eletroerosivas.
- 4.2.3 - um hidráulico, composto pelo sistema de bombeamento e filtragem do fluido dielétrico, um reservatório de usinagem e todo o circuito que assegura a circulação do líquido de serviço. Em grande parte das máquinas de usinagem por eletroerosão, notadamente naquelas construídas nos últimos quinze anos, há outros órgãos hidráulicos, tais como o comando e o mecanismo de avanço do elétrodo-ferra

menta (nas primeiras máquinas, este sistema era eletromecânico; hoje, passou a ser eletro-hidráulico).

4.2.1. Conjunto Mecânico

Para assegurar uma boa usinagem, o conjunto mecânico de u'a máquina UEE deve possuir boa rigidez e seus elementos móveis devem ter movimentos bastante precisos.

Devido às características diferentes de trabalho, a estrutura das máquinas-ferramenta eletroerosivas tem uma construção mais leve que a das máquinas-ferramenta tradicionais.

A base da máquina, geralmente fundida ou soldada, comporta uma coluna que, por sua vez, suporta um cabeçote porta-elétrodo, mostrados na Figura 29. A coluna também é fundida ou soldada e deve ser bem dimensionada e nervurada, pois os esforços desenvolvidos pelo gás e pelo calor durante a usinagem não são desprezíveis, principalmente para níveis de corrente superiores a 100 A. Não há de se esquecer que a sua deformação, em função da temperatura, deve ser muito pequena.

A mesa de serviço, montada sobre a base, pode se deslocar horizontalmente segundo os dois eixos de coordenadas retangulares, facilitando assim o posicionamento preciso da peça em relação ao eletrodo.

O cabeçote porta-elétrodo deve possuir precisão de movimento elevada, porque é ele quem assegura o deslocamento do eletrodo em relação à peça. Esse movimento vertical é servocomandado, baseando-se o sinal de referência do sistema de controle na diferença de potencial entre a peça e o eletrodo. Há cabeçotes de acionamento eletromecânico e eletro-hidráulico, além dos manuais, nas máquinas surgidas e comercializadas durante as últimas três décadas.

Fig. 29 - Equipamento utilizado no processo de usinagem por eletroerosão

4.2.2. Conjunto Elétrico

O elemento-chave do conjunto elétrico de u'a máquina UEE é o gerador elétrico. Ele é, por assim dizer, o "coração" do processo eletroerosivo, responsável que é pelo fornecimento de energia à máquina-ferramenta.

A Figura 30 apresenta vários tipos básicos de circuitos elétricos utilizados pelos fabricantes de máquinas UEE para fornecer pulsos de corrente contínua às máquinas eletroerosivas. Nenhum tipo particular, no entanto, é adequado a todas as condições de usinagem.

Os diversos circuitos apresentados representam, na ordem cronológica em que foram sendo utilizados, as principais etapas no desenvolvimento do projeto de geradores elétricos.

A maioria das máquinas pioneiras utilizava versões sofisticadas do circuito da Figura 30-a. Conhecido tecnicamente como um "circuito RC", ele também é chamado

Fig. 30 - Seis tipos básicos de geradores elétricos para UEE¹¹

de "circuito Lazarenko" e "circuito de relaxação", pois e le armazena uma carga por um período de tempo e então se "relaxa", ao descarregá-la através de uma resistência. Neste caso, a carga é armazenada por um capacitor e liberada através da baixa resistência do "gap" de descarga ionizado.

O elétrodo-ferramenta e a peça formam, na verdade, um outro capacitor, conectado em paralelo com o capacitor do circuito, que é escolhido de modo que a capacitância elétrodo-peça possibilite a descarga através do "gap". Essa capacitância do "gap" varia de 0,01 a 100 μ F, durante o uso normal.

O valor da resistência, que determina a velocidade de carregamento do capacitor, e a capacitância em paralelo, devido ao "gap", determinam a frequência de descargas do circuito de relaxação que, apesar de simples e robusto, é extremamente limitado na sua capacidade de remoção de metal. O circuito RC presta-se muito bem para operações de acabamento.

O circuito básico apresentado na Figura 30-b é o de um gerador rotativo de impulsos. Concebido para proporcionar maiores velocidades de remoção de metal que os circuitos de relaxação, este circuito permite que um gerador de corrente contínua de alta frequência, padrão, seja usado para produzir pulsos unidirecionais.

No gerador rotativo, o capacitor é carregado através de um díodo, em meio ciclo; no meio ciclo seguinte, a soma da tensão elétrica do gerador com a do capacitor carregado é aplicada ao "gap", através de pulsos longos e, conseqüentemente, à baixa frequência de operação, não-ajustável. Isso permite uma remoção de metal a velocidades bastante elevadas e um acabamento superficial extremamente rugoso.

Introduziram-se, então, os geradores valvulados - Figura 30-c - consistindo na substituição do resistor do circuito básico de relaxação mostrado na Figura 30-a por um conjunto de válvulas conectadas em paralelo (mostrada esquematicamente como uma única, na Figura 30.c). Convenientemente controlado, o banco de válvulas torna-se, com efeito, um resistor variável, funcionando no circuito como o dispositivo interruptor, responsável pela frequência de descarga no "gap" e pela magnitude energética de cada descarga. Isso é assegurado pelo oscilador de frequência fixa, através da interrupção periódica da corrente do "gap".

Há uma grave restrição para esse tipo de circuito, contudo, as características elétricas das válvulas (alta tensão, baixa amperagem) não são diretamente compa-

tíveis com as condições elétricas exigidas pelo "gap" em regime de desbaste (alta amperagem e tensão relativamente baixa). A Figura 30-d ilustra esquematicamente o uso de transístores substituindo as válvulas. Neste circuito, o interruptor é acionado por um oscilador de frequência ajustável e não requer o uso de capacitores em paralelo com o "gap".

Tais geradores deram um novo alento ao processo eletroerosivo, uma vez que os transístores permitem altas amperagens e baixas voltagens e funciona como um eficiente dispositivo interruptor. Nos circuitos transistorizados, o sinal do oscilador controla não apenas o fim do pulso, mas também o tempo durante o qual o pulso é liberado entre o elétrodo e a peça, permitindo que o pulso gerado seja totalmente controlado.

Entretanto, o tempo de ionização do "gap" varia de descarga para descarga, exigindo um circuito com retroação, Figura 30-e. Esse circuito mantém o tempo de duração do pulso e a corrente de pico, adequando, contudo, a frequência de descarga, com as variações do tempo de ionização do "gap".

A Figura 30-f apresenta a mais nova concepção de geradores elétricos empregados no processo de usinagem por eletroerosão. Um dos parâmetros monitorados é o avanço do elétrodo, diferentemente dos outros geradores. A interação entre o gerador e o servomecanismo de avanço do elétrodo é feita por meio de controle adaptativo.

O "gerador ideal", capaz de controlar todas as variáveis que afetam o processo de corte, está longe, ainda, de ser desenvolvido. Afinal de contas, corte consistente, velocidade de remoção de metal elevada, acabamento superficial refinado, e baixo desgaste do elétrodo, parecem se contrapor. E, embora um gerador possa ser ajustado para fornecer um compromisso satisfatório para uma combinação particular elétrodo/peça, dificilmente a sua eficiência será a mesma para todas as combinações imaginá-

veis de materiais metálicos, sejam os seus elementos eletrônicos ativos, válvulas, transístores ou circuitos integrados digitais.

Isso só será exequível quando o conhecimento e o controle dos parâmetros de corte para quaisquer combinações de materiais possibilitarem a formulação de relações quantitativas bem definidas e eficientes.

4.2.3. Conjunto Hidráulico

A maioria das máquinas UEE mais recentes possui duas unidades distintas de circulação fluídica: o circuito hidráulico que alimenta o servo-sistema de acionamento do cabeçote eletroerosivo e o circuito hidráulico do sistema dielétrico, mostrados esquematicamente na Figura 29.

O servo-sistema de acionamento do cabeçote porta-ferramenta é geralmente constituído por um cilindro hidráulico operado por uma válvula eletro-hidráulica. Suas características dinâmicas asseguram uma boa resposta do sistema aos sinais de perturbação provenientes da variação no espaçamento eletrodo-ferramenta/peça e consequentes flutuações na tensão no "gap".

As máquinas-ferramenta eletroerosivas incluem também um sistema dielétrico para enchimento do reservatório de serviço em que a peça a ser usinada é imersa. Há dois métodos básicos de enchimento desse reservatório de serviço: aplicação de ar sob pressão ao fluido contido no tanque de dielétrico, ou bombeamento do fluido dielétrico desde esse tanque até o reservatório de serviço por meio de bomba centrífuga. Em ambos os métodos, atingindo o nível desejado de dielétrico no reservatório de serviço, o fluido retorna, por gravidade, para o tanque de dielétrico e é aí resfriado e decantado. O sistema de resfriamento é constituído por alguns tubos aletados, por onde circula água da própria instalação fabril.

O circuito hidráulico de dielétrico é complementado por um sistema que inclui unidades de lavagem do "gap" por injeção ou sucção do fluido dielétrico, e por unidade de filtragem do dielétrico, de cuja eficiência depende muito a qualidade do acabamento da superfície usinada. Sob condições severas de desbaste, utilizam-se as máquinas mais modernas de uma unidade de filtragem de farinha diatomácea, que tem capacidade de remover grande quantidade de cavacos do fluido dielétrico sem os problemas de manutenção que envolvem os filtros de cartucho normalmente utilizados.

4.3. Ferramentas UEE

As brocas, na furação; as serras, no serramento; as fresas, no fresamento; as ferramentas de barras, no torneamento, são substituídas, na usinagem por eletroerosão, por um elétrodo-ferramenta cuja seção frontal tem o mesmo contorno da superfície a ser usinada.

Se, por um lado, a fabricação dessa ferramenta é mais demorada e mais cara que a da ferramenta convencional, por outro, assegura a reprodução fiel da gravura dessa ferramenta na peça usinada. Ela pode ser utilizada por diversas vezes, dependendo da deterioração da forma provocada pelo desgaste em serviço e da precisão geométrica exigida para a peça usinada.

A seleção do material e do processo de fabricação do elétrodo-ferramenta é uma tarefa decisiva não somente sob o ponto de vista tecnológico, como também econômico. Em algumas aplicações, o custo do elétrodo pode representar mais que a metade do custo total da peça usinada por UEE.

Todos os materiais condutores de eletricidade podem se prestar à fabricação da ferramenta eletroerosiva. Teoricamente, os materiais que possuem os mais elevados

pontos de fusão e sublimação e as menores resistividades elétricas constituir-se-ão nas melhores ferramentas.

Os materiais consagrados pela prática na confecção de elétrodos são os seguintes:

- 4.3.1 - Cobre eletrolítico
- 4.3.2 - Grafite
- 4.3.3 - Cobre ao telúrio, ao cromo, ou ao chumbo
- 4.3.4 - Cobre ao tungstênio
- 4.3.5 - Tungstênio à prata
- 4.3.6 - Liga de alumínio (Silumin)
- 4.3.7 - Latão
- 4.3.8 - Tungstênio. Molibdênio
- 4.3.9 - Aço.

4.3.1. Cobre Eletrolítico

É largamente utilizado em UEE. De baixo custo, pode ser fabricado por deformação a frio ou a quente; por extrusão; por trefilação; por estiramento; por galvanoplastia e pelos métodos tradicionais de usinagem.

As propriedades físicas desse material, mais importantes à UEE, são as seguintes:

- massa específica: $8,9 \text{ Kg/dm}^3$ (a 20°C)
- ponto de fusão: 1.083°C
- resistividade elétrica: $0,017 \mu\Omega\text{m}$ (a 20°C).

O cobre retificado produz um acabamento superficial extremamente preciso na peça usinada; o desgaste da ferramenta fabricada com esse material é maior que aquele obtido com grafite.

Em máquinas UEE com geradores de relaxação, o cobre eletrolítico apresenta um desempenho de usinagem ex

celente; em geradores de pulso controlado, contudo, seu desempenho cai um pouco.

4.3.2. Grafite

Muito utilizado em UEE. De baixo custo, a ferramenta de grafite é fabricada pelos processos convencionais de usinagem.

A anisotropia do grafite exerce uma influência muito grande sobre as suas propriedades elétricas e térmicas, que variam sensivelmente segundo as diversas direções predeterminadas.

Suas propriedades físicas mais significativas à UEE são as seguintes:

- massa específica: 1,6 a 1,85 Kg/dm³ (a 20 °C)
- temperatura de sublimação: 3.600 °C
- resistividade elétrica: 8 a 15 $\mu\Omega$ m (a 20 °C).

O tamanho do grão de grafite é decisivo à obtenção de uma boa qualidade superficial da peça usinada. Grãos finos asseguram um ótimo acabamento, enquanto grãos maiores propiciam uma rugosidade superficial de baixa qualidade.

O grafite presta-se melhor à usinagem com equipamento que utiliza gerador de pulso controlado do que com aquele do tipo relaxação.

A ferramenta de grafite é praticamente insensível aos choques térmicos e sua deformação é desprezível. Entretanto, as partículas desprendidas da ferramenta, devido ao seu desgaste, têm características abrasivas e podem danificar as guias da máquina-ferramenta eletroerosiva.

4.3.3. Cobre ao Telúrio, ao Cromo ou ao Chumbo

A adição de 1 a 3% de telúrio, cromo ou chumbo, no cobre eletrolítico, melhora a usinabilidade do cobre, na fase de fabricação do eletrodo.

Essa prática é comum apenas em ferramentas de geometrias complexas. O desempenho da UEE, com esses eletrodos, é pior do que o obtido com ferramentas de cobre eletrolítico: o desgaste dos eletrodos é 15 a 25% maior e a velocidade de remoção de material é cerca de 10% menor.

4.3.4. Cobre-Tungstênio

O cobre-tungstênio é um composto de pós de tungstênio (50 a 80%) e de pós de cobre (50 a 20%). À medida que se aumenta o teor de tungstênio no composto, é dificultada a fabricação da ferramenta, melhora o seu desgaste em operação eletroerosiva e decresce a velocidade de remoção de material.

Os principais parâmetros físicos desse composto são os seguintes:

- massa específica: 15 a 18 Kg/dm³ (a 20 °C)
- resistividade elétrica: 0,045 a 0,055 $\mu\Omega$ m (a 20 °C).

O custo do cobre-tungstênio é maior que o dos materiais citados anteriormente. Ele tem um excelente desempenho em qualquer gerador eletroerosivo e é particularmente indicado na fabricação de ferramentas que possuem detalhes finos.

4.3.5. Tungstênio à Prata

Apresenta características um pouco melhores que o cobre tungstênio. Devido ao seu elevado custo, torna-se praticamente proibitiva a sua utilização em operações ordi

nárias de eletroerosão. Para cortes rasos, o elétrodo de tungstênio à prata dispensa um sistema auxiliar de lavagem.

Suas propriedades físicas relevantes à UEE, são as seguintes:

- massa específica: 12,1 a 17,0 Kg/dm³ (a 20 °C)
- resistividade elétrica: 0,021 a 0,041 μΩm (a 20 °C).

4.3.6. Liga de Alumínio (Silumin)

A composição nominal dessa liga é a seguinte: 85% Al, 11% Si, 0,4 a 0,6% Mg, 1% Zn, 1% Mn, Fe, Cu.

Essa liga tem um custo relativamente baixo e é utilizada na fabricação de ferramentas destinadas à usinagem de aço e metais nobres, cujas cavidades são de grandes dimensões (superiores a 50 cm²). Seu desempenho com circuito RC deixa muito a desejar.

O silumin é facilmente usinável pelos métodos convencionais; ferramentas de silumin podem ser fundidas sem maiores problemas.

Utilizando-se ferramenta desse material, o valor da corrente de descarga pode alcançar até 270 A, permitindo uma velocidade de remoção de material de cerca de 290 mm³/mín; o desgaste da ferramenta é maior do que o obtido com o cobre eletrolítico.

4.3.7 - Latão

Apesar de poder ser empregado na usinagem por eletroerosão de quase todos os metais, ser disponível comercialmente sob diversas formas e ter um custo muito acessível, a ferramenta UEE de latão apresenta um desgaste muito elevado.

Com geradores de relaxação, seu desempenho é

muito ruim, melhorando com a utilização de geradores de pulso controlado.

4.3.8. Tungstênio. Molibdênio

São indicados na usinagem de micro-orifícios, devido ao pequeno desgaste da ferramenta.

Encontram-se no mercado sob a forma de fios, barras e tubos. Os elétrodos de tungstênio têm um desempenho muito bom junto aos geradores de relaxação. Esse desempenho cai um pouco quando se utiliza um gerador de pulso controlado.

As principais propriedades físicas do tungstênio (W) e molibdênio (Mo) são as seguintes:

- massa específica: $19,3 \text{ Kg/dm}^3$ (W) e $10,2$ (Mo)
(a 20°C)
- temperatura de fusão: 3.380°C (W) e 2.620°C (Mo)
- resistividade elétrica: $0,055 \mu\Omega\text{m}$ (W) e $0,057 \mu\Omega\text{m}$ (Mo) (a 20°C).

4.3.9. Aço

Apesar de ser facilmente fabricada, a ferramenta eletroerosiva de aço proporciona uma usinagem muito mais lenta que aquelas obtidas com ferramentas de cobre ou grafite; o desgaste é satisfatório apenas quando se usinam peças de determinados tipos de aço.

4.4. Aspectos Econômicos da Fabricação de u'a Matriz para Forjamento por UEE e Fresamento por Copiamento

4.4.1. Generalidades

A fabricação de matrizes para processos de conformação pode ser realizada, na atualidade, por quatro processos básicos: fresamento por copiamento, usinagem por eletroerosão, usinagem por comando numérico (CN) e comando numérico assistido por computador (CNC).

A necessidade de se fabricarem matrizes de boa qualidade a preços competitivos exige para cada aplicação uma análise criteriosa dos processos mais indicados a essa aplicação. Geralmente há um processo ótimo para a usinagem de uma peça ou de um lote de N peças.

Os fatores mais importantes a serem levados em conta na seleção do processo de fabricação são a geometria da cavidade da matriz a ser usinada, o material que a constitui, o tamanho dessa matriz e as potencialidades e limitações dos equipamentos disponíveis na ferramentaria que executará o serviço de usinagem.

No fresamento por copiamento, deve-se desenvolver um modelo completamente detalhado da configuração a ser usinada e fazer a traçagem da forma da cavidade.

Na UEE, há necessidade de se fabricarem um ou mais elétrodos que reproduzam a cavidade da peça a ser usinada.

Na usinagem por comando numérico (CN) ou comando numérico assistido por computador (CNC), a configuração a ser usinada deve ser inteiramente programada e introduzida na unidade de comando. No Brasil, as máquinas CN e CNC são ainda escassas ou simplesmente inexistem nas ferramentarias. A fabricação de matrizes resume-se, pois, ao fresamento por copiamento e usinagem por eletroerosão.

Respaldado pelo trabalho de Rodrigues et alii¹²,

far-se-á uma análise comparativa dos custos de fabricação de uma matriz para forjamento fabricada por fresamento por copiamento e UEE.

A Tabela 4.1 mostra a sequência normal de operações da fabricação de uma matriz para forjamento. Em ambos os processos, fresamento por copiamento e UEE, utilizaram-se seis etapas principais na execução de uma matriz para forjamento de um garfo de engate empregado em uma caixa de velocidades para veículos de carga.

4.4.2. Descrição da Matriz Usinada

Os blocos de cada matriz, de aço temperado, mediam 381 x 407 x 305 mm. O projeto da matriz previa três cavidades, a saber:

- uma "estação roladora", na qual o material bruto do garfo sofre uma conformação inicial para adequar a sua distribuição de volume à estação seguinte;
- uma gravura de pré-forma, em que a geometria da peça obtida é uma configuração grotesca do garfo de engate, com acentuada presença de rebarba;
- uma gravura final ou de acabamento, na qual a peça acabada é obtida com as tolerâncias especificadas no projeto.

Essa matriz é utilizada em um martelo eletro-hidráulico de 2.500 lbf (11.000 N); as configurações das duas partes são idênticas.

4.4.3. Análise dos Tempos de Fabricação da Matriz

A Tabela 4.2 indica os tempos globais das operações para ambos os processos; considerando-se que a "estação roladora" pode ser feita economicamente por usinagem

Tab. 4.1 - Principais etapas da fabricação de matriz para forjamento feita por UEE ou fresamento por copiamento

OP. nº	Operação	FRESAMENTO POR COPIAMENTO		USINAGEM POR ELETROEROSÃO	
		Meio para realização da operação	Descrição	Meio para realização da operação	Descrição
1	Traçagem	Bancada	Localização dos pontos principais para guia da fresa-copiadora	Bancada	Determinação das referências para posicionamento do elétrodo e do bloco
2	Montagem	Fresa copiadora	Posicionamento da peça na mesa. Ajuste das condições de usinagem da máquina	Máquina de eletroerosão	Posicionamento da peça na mesa. Ajuste das condições de usinagem da máquina
3	Desbaste	Fresa copiadora	Definição do contorno, deixando sobremetal para operação de acabamento	Máquina de eletroerosão	Usinagem do bloco no regime de desbaste
4	Acabamento	Fresa copiadora	Ajuste da máquina para acabamento. Operação cuidadosa	Máquina de eletroerosão	Fixação do elétrodo de acabamento para usinagem nesse regime
5	Abrasão superficial	-	-	Bancada + ferramenta abrasiva	Acerto de raios. Diminuição da camada superficial endurecida
6	Abertura do alojamento de excesso de material na matriz	Fresa copiadora	Abertura do rasgo para alojar o excesso de material	Fresa copiadora	Abertura do rasgo para alojar o excesso de material
7	Ajustagem	Bancada	Acerto de raios. Retirada das rebarbas. Ajuste de dimensões finais	-	-

convencional e está presente em ambos os blocos, seja naquele fabricado por UEE, seja naquele fabricado por fresamento por copiamento; seus tempos de fabricação e custo não foram computados nesta análise.

Tab. 4.2 - Tempos de fabricação da matriz para cada processo utilizado

FRESAMENTO POR COPIAMENTO		USINAGEM POR ELETROEROSÃO	
Operação	Tempo (h)	Operação	Tempo (h)
Traçagem e Montagem	16	Traçagem e Montagem	5
Fresamento de desbaste, acabamento e abertura de alojamento de excesso de material	68	Usinagem de desbaste, troca de eletrodo e usinagem de acabamento	15
Ajustagem	14	Abrasão superficial	18
-	-	Abertura do alojamento de excesso de material	10
Tempo total (T_t)	98	(T_t)	48

Depreende-se, da Tabela 4.2, que o tempo de fabricação da matriz por UEE é praticamente igual à metade do tempo gasto pelo fresamento, considerando-se que os eletrodos de desbaste e acabamento foram comprados prontos.

4.4.4. Análise dos Custos de Fabricação da Matriz

Os investimentos de capital (C_i) do fresamento por copiamento (FC) e da usinagem por eletroerosão (UEE) é descrito a seguir:

- FC : Fresa copiadora pesada.. Cr\$10.850.000,00
- UEE: Máquina eletroerosiva... Cr\$ 4.700.000,00
- : Fresa copiadora leve.... Cr\$ 3.550.000,00

Considerando-se um período de dez anos para amortização do equipamento e uma capitalização periódica trimestral, à taxa de 2% ao trimestre, o fator de recuperação do capital, $FRC = 0,03656$. Convém ressaltar que a correção monetária dos equipamentos será suposta igual para todos e les e, portanto, não será levada em conta nesta análise comparativa.

O custo horário do investimento é obtido empregando-se a fórmula 4.1

$$C_{hi} = \frac{C_i \cdot FRC}{900} \quad (4.1)$$

desde que os equipamentos trabalhem 900 horas por trimestre, cada um. Assim, vem:

$$FC : C_{hi} = \frac{10.850.000,00 \times 0,03656}{900}$$

ou seja:

$$C_{hi} = \text{Cr\$}440,75/\text{hora}$$

$$UEE : C_{hi} = \frac{8.250.000,00 \times 0,03656}{900}$$

ou seja:

$$C_{hi} = \text{Cr\$}335,13/\text{hora}.$$

Considerando ainda um custo de mão-de-obra(C_{hmo}) de Cr\$500,00/hora, incluídas as obrigações sociais e demais despesas com o pessoal; um custo de preparação do bloco e aquisição do material (C_{pb}) da ordem de Cr\$ 120.000,00; um custo de cada um dos dois dispositivos porta-elétrodo(C_{pe}) igual a Cr\$5.500,00 e um custo de Cr\$26.000,00 para cada e létrodo de grafite, de desgaste ou de acabamento (C_{ef}), cuja vida útil (V_{ue}) é de doze gravações e, portanto, seis

matrizes, cada par de elétrodos, calcula-se o custo total de fabricação para cada matriz (C_T):

$$\underline{FC} : C_T = (C_{hi} + C_{hmo}) \cdot T_t + C_{pb} \quad (4.2)$$

Assim, o custo de fabricação por matriz, pelo processo de fresamento por copiamento, C_T , de acordo com a fórmula 4.2, vale:

$$\begin{aligned} C_T &= (440,75 + 500,00) \times 98 + 120.000,00 = \\ &= 212.193,50 \end{aligned}$$

$$C_T = \text{Cr\$}212.193,50 \text{ por matriz.}$$

$$\underline{UEE} : C_T = (C_{hi} + C_{hmo}) \cdot T_t + C_{pb} + C_N \quad (4.3)$$

onde C_N é um custo variável dos elétrodos e dos n dispositivos de fixação dos n tipos distintos de elétrodos, que depende do número (N) de matrizes a ser fabricado:

$$C_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (j \cdot C_{ef} + C_{pe})_i \quad (4.4)$$

onde j é um número inteiro positivo que satisfaz às seguintes condições:

$$\frac{N}{V_{ue} + 1} < j \leq \frac{N}{V_{ue} + 1} + 1 \quad (4.5)$$

Para o caso em análise,

$$C_T = (335,13 + 500,00) \times 48 + 120.000,00 + C_n$$

ou seja, a parcela do custo total C_T , de Cr\$160.086,24, quando se utiliza a UEE, independe do número de matrizes fabricadas.

Se se pretende fabricar uma única matriz ($N = 1$), o custo variável C_n será determinado utilizando-se as expressões 4.4 e 4.5, levando-se em conta que:

- . Vida útil de cada jogo de elétrodos : $V_{ue} = 6$ matrizes
- . Tipos diferentes de elétrodos : $n = 2$ (um de desbaste ($i = 1$) e outro de acabamento ($i = 2$) com seus respectivos dispositivos de fixação).

Assim, de acordo com a expressão 4.4, $1/7 < j < 8/7$, ou seja, $j = 1$ e a expressão 4.5 fica

$$C_N = (C_{ef} + C_{pe})_1 + (C_{ef} + C_{pe})_2$$

ou seja,

$$C_N = (26.000,00 + 5.500,00) + (26.000,00 + 5.500,00)$$

$$C_N = \text{Cr\$}63.000,00, \text{ para a primeira matriz.}$$

O custo total da primeira matriz fabricada nessas condições por UEE é de $C_T = \text{Cr\$}223.086,24$, superior portanto àquele obtido pelo fresamento; contudo, a segunda matriz fabricada por UEE custará a importância no valor de $\text{Cr\$}191.586,24$, pois utiliza as mesmas ferramentas e dispositivos empregados na usinagem da primeira matriz.

Apresenta-se na Figura 31 um gráfico comparativo do custo total de fabricação de u'a matriz para forjamento por UEE e por fresamento por copiamento.

Percebe-se claramente, pela análise do gráfico esboçado na Figura 31, que o ponto de nivelamento, ou seja, o ponto em que ambos os processos se equivalem, em termos do custo total de fabricação, situa-se entre $1 < N < 2$.

Se se deseja fabricar uma única matriz, é preferível fazê-la através de fresamento por copiamento; de duas matrizes em diante, torna-se mais econômica a fabricação por UEE.

As descontinuidades da curva de custos do processo eletroerosivo apresentam-se sempre que se introduz, na produção seriada de matrizes, um novo jogo de elétrodos; o dispositivo de fixação de cada elétrodo-ferramenta não sofre desgaste e seu custo é amortizado paulatinamente à medida em que N aumenta.

CUSTO TOTAL DE
FABRICAÇÃO POR MATRIZ
(Cr\$ 1.000,00)

Fig. 31 - Gráfico comparativo do custo total de fabricação de u'a matriz para forjamento por UEE e por fresamento por cópiamento

A análise comparativa aqui efetuada mostra claramente que o processo de usinagem por eletroerosão é economicamente viável na fabricação de matrizes, o que o credencia como um processo de fabricação não-convencional realmente competitivo, em termos industriais.

5. PARÂMETROS TECNOLÓGICOS DO PROCESSO

5.1. Generalidades

A produção de uma determinada configuração através da usinagem por eletroerosão exige inúmeras considerações no projeto do elétrodo-ferramenta. A maioria das aplicações industriais do processo utiliza principalmente o método da tentativa-e-erro nesse projeto. Isso decorre do grande número de variáveis e alternativas possíveis de operação, diferentes para cada combinação de materiais constituintes dos elétrodos.

Considerar-se-ão, aqui, os principais parâmetros característicos da operação e/ou cuja influência tem sido constatada através de dados e conhecimentos empíricos obtidos por pesquisadores e usuários do processo nas três últimas décadas, como Lazarenko, Opitz, Livschitz, Zolotich, Crookall, Mironoff, Yamagutti, Karafuji, Lascoe, Marty, Ryabov e Sosenko, dentre outros.

Para maior clareza de análise, os parâmetros do processo foram agrupados segundo as seguintes classes:

- . 5.2 - PARÂMETROS ELÉTRICOS
- . 5.3 - PARÂMETROS TERMODINÂMICOS
- . 5.4 - PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS
- . 5.5 - PARÂMETROS METALÚRGICOS
- . 5.6 - PARÂMETROS MECÂNICOS
- . 5.7 - PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.

De acordo com a aplicação e as condições de usinagem empregadas, cada uma das classes acima assume uma maior ou menor relevância no contexto global do processo e letroerosivo.

5.2. Parâmetros Elétricos

Em todas as operações de usinagem por eletroerosão, a seleção dos parâmetros elétricos dos circuitos de carga e descarga depende literalmente do tipo e possibilidades do gerador elétrico utilizado, como foi salientado no capítulo anterior.

Dentre as grandezas mais importantes dessa classe, destacam-se as seguintes:

- . 5.2.1 - Energia da Descarga
- . 5.2.2 - Corrente da Descarga
- . 5.2.3 - Frequência de Descargas
- . 5.2.4 - Resistividade dos Elétrodo
- . 5.2.5 - Polaridade do Circuito
- . 5.2.6 - Propriedades Dielétricas do Fluido de Serviço.

5.2.1. Energia da Descarga

As magnitudes da erosão da peça e do desgaste do eletrodo-ferramenta dependem da distribuição de energia su prida pela corrente elétrica, ou seja, como essa energia é

distribuída entre os diversos componentes do sistema (peça, eletrodo-ferramenta e fluido dielétrico) e entre várias modalidades de energia (térmica, elétrica, química etc.)

No início do processo, a energia é distribuída principalmente ao longo do canal de descarga e às micro-regiões superficiais dos eletrodos. À medida que a profundidade de corte aumenta paulatinamente, durante a usinagem, a distribuição de energia da descarga varia continuamente em termos da energia conduzida, energia armazenada e energia utilizada na erosão da peça e no desgaste indesejável do eletrodo.

Apenas a energia armazenada e a energia diretamente conduzida são distinguidas no fluido dielétrico. A parcela remanescente da energia da descarga, que não pode ser transferida para nenhum elemento particular do sistema como um todo, assume diversas formas de energia, seja como radiação térmica ou ionização, seja ainda como luz ou som.

A forma e duração dos impulsos comandados pelo gerador eletroerosivo devem ser concebidas de modo a adequar a energia da descarga às condições exigidas por cada usinagem específica. Nisso reside a principal limitação dos geradores de relaxação, pois, nesses geradores, a energia da descarga é uma função direta da carga armazenada por capacitores,

$$E = C \cdot V^2/2 \quad (5.1)$$

e não há como variar a forma dos pulsos ali gerados. Além do mais, para uma tensão de descarga constante, a variação da energia da descarga implica inevitavelmente na variação da frequência de descargas, também dependente do valor da capacitância do circuito de descarga e do espaçamento entre a peça e o eletrodo-ferramenta, nos geradores de relaxação. Nos geradores modernos tais parâmetros podem ser regulados isoladamente.

De u'a maneira geral, a energia da descarga é matematicamente definida pela equação:

$$E = \int_0^{t_d} v(t) \cdot i(t) dt \quad (5.2)$$

isto é, o produto da tensão pela corrente, integrado em um intervalo de tempo igual ao da duração da descarga.

A velocidade de remoção de material, sendo uma função da energia de descarga, depende por conseguinte da tensão, corrente e duração da descarga. Se, por um lado, a majoração desses parâmetros é altamente desejável para permitir uma redução significativa do tempo total de usinagem, por outro enseja uma sensível redução da qualidade de acabamento, bem como um aumento substancial nos custos de investimento.

5.2.2. Corrente de Descarga

Pode-se controlar o consumo de energia do processo eletroerosivo com o auxílio de um amperímetro, desde que se conheçam as relações empíricas entre a energia média fornecida à zona de serviço e a corrente média de um pulso (em um período de tempo T), as dimensões da área usinada e a densidade de corrente utilizada, para uma velocidade de remoção de material obtida a bandas de frequência de descargas conhecidas.

A relação entre a corrente de descarga, I, e a área da seção transversal de uma superfície condutora, S, é conhecida como densidade de corrente, δ :

$$\delta = I/S \quad (5.3)$$

Quando a corrente começa a fluir no "gap", no início de um pulso, o canal de condutibilidade é muito esbelto e a densidade de corrente é correspondentemente alta, produzindo temperaturas muito elevadas. À proporção

que a carga continua, o canal de condutibilidade dilata-se gradualmente e a densidade de corrente diminui. Entre esses dois limites, há a máxima erosão da peça, em um pulso.

A Figura 32 ilustra a variação da corrente da descarga, no tempo, para um pulso curto e um pulso longo. Deduz-se, in loco, que as operações de desbaste e acabamento exigem pulsos longo e curto, respectivamente, para valores próximo do pico de corrente. O valor da corrente de descarga pode ser controlado pelo operador da máquina, para que se obtenham as condições mais apropriadas para cada usinagem específica.

Fig. 32 - Variação da corrente de descarga, no tempo

Para baixos valores da densidade de corrente, a capacidade erosiva é pequena, enquanto para valores mais elevados, a estabilidade do processo é comprometida e a energia utilizada na erosão é uma pequena parcela da energia da descarga.

A corrente da descarga é determinada pelas possibilidades e limitações do gerador eletroerosivo. A sua magnitude exprime a potencialidade de um gerador eletroerosi-

vo. Atualmente, as máquinas UEE de maior porte utilizam geradores de até 600 A.

5.2.3. Frequência de Descargas

A Figura 33 mostra a variação da tensão, no tempo, através do "gap" de usinagem. Uma vez completada a descarga, a tensão no "gap" mantém-se em um valor inferior à tensão de descarga até que a desionização se complete. O tempo necessário à desionização do "gap" depende de forma direta do valor da energia da descarga anterior. A soma dos tempos de duração da descarga e de desionização do "gap" resulta no tempo total do ciclo e, pois, determina a frequência de descargas de uma magnitude particular.

Fig. 33 - Variação da tensão no "gap" de serviço, no tempo³

A frequência de descargas influi no volume de material erodido e nas características estruturais de uma pequena região vicinal à cratera usinada.

A experiência tem mostrado que há dificuldades em se manter constante a frequência de descargas em consequência das interrupções momentâneas do processo de usinagem devido às flutuações de posicionamento do cabeçote porta-ferramenta, servo-comandado. Além do mais, a maioria

dos circuitos de usinagem que equipam as máquinas UEE não permite conservar estritamente constantes os parâmetros energéticos da descarga durante toda uma usinagem.

Sob certos limites, duplicando-se a corrente da descarga e a frequência de descargas, a velocidade de remoção de material também duplica, sem alterações significativas no acabamento superficial. A altas frequências, a corrente da descarga é reduzida devido à indutância, diminuindo consequentemente a velocidade de remoção de material. Como altas frequências ensejam melhores acabamentos superficiais, há um limite prático, de cunho econômico, na seleção adequada da corrente e da frequência de descargas para cada aplicação.

5.2.4. Resistividade dos Elétrodos

As exigências fundamentais de projeto, na concepção de um produto, incluem a especificação do material ou materiais de que deverá ser constituído. À engenharia de fabricação, reserva-se o critério da seleção do material ou materiais de cada eletrodo-ferramenta.

Assim, não há como alterar a resistividade da peça, uma característica intrínseca de cada material.

O critério da seleção do material do eletrodo-ferramenta deve levar em conta a sua resistividade, bem como o comportamento dessa resistividade ante às variações de temperatura desenvolvidas no processo eletroerosivo.

A energia da descarga, para um determinado nível de tensão elétrica, é transmitida pelo eletrodo-ferramenta à peça usinada pela corrente da descarga, de acordo com as peculiaridades do líquido dielétrico e da estrutura interna de cada um dos eletrodos em serviço; uma destas, a resistividade, deve ser tão baixa quanto possível, para ensejar uma melhor condução elétrica e uma distribuição eficiente da corrente.

Os metais puros possuem as mais baixas resistividades. Entretanto, qualquer impureza, seja metálica ou não-metálica, aumenta a resistividade de um metal, independentemente da resistividade dessa impureza ser maior ou menor que aquela do metal puro em questão.

Os valores da resistividade dos metais, à temperatura de 20 °C, variam desde 0,016 $\mu\Omega\text{m}$ (prata) até aproximadamente 10 $\mu\Omega\text{m}$ (ligas ferro-cromo-alumínio); a resistividade do cobre é de 0,017 $\mu\Omega\text{m}$. Outros tipos de materiais, como o cobre-grafite, possui resistividade mínima de 0,030 $\mu\Omega\text{m}$, enquanto a do grafite é de 8 $\mu\Omega\text{m}$. O seu uso como eletrodo-ferramenta é justificado por possuir um ponto de fusão muito elevado (cerca de 3.900 °C).

5.2.5. Polaridade do Circuito

É outra variável importante na UEE. A polaridade normal, ou positiva, do circuito de descarga, é definida pela aplicação de uma diferença de potencial elétrico ao sistema, criando um campo elétrico em que o eletrodo-ferramenta é o cátodo e a peça, o ânodo.

A polaridade positiva é utilizada quando o parâmetro de maior interesse é a velocidade de remoção de material, ainda que seja em detrimento do desgaste do eletrodo-ferramenta.

A polaridade invertida, como o próprio nome o sugere, é definida pela inversão do sentido normal de fluxo de corrente elétrica; neste caso, o eletrodo-ferramenta é o ânodo e a peça, o cátodo. Sob essas condições, a velocidade de remoção de material diminui, mas o desgaste do eletrodo-ferramenta é muito pequeno devido ao fenômeno de "crescimento" do eletrodo-ferramenta, em que algumas partículas removidas da peça "soldam-se" desordenadamente à superfície da ferramenta.

5.2.6. Propriedades Dielétricas do Fluido de Serviço

A propriedade mais importante de um fluido dielétrico é a sua baixa condutibilidade elétrica (alta resistividade). Na UEE, o fluido dielétrico de serviço isola a ferramenta e a peça, que estão a diferentes potenciais elétricos, formando com eles um capacitor: o "gap" de usinagem.

Além de isolar o eletrodo-ferramenta e a peça, o fluido dielétrico refrigera a zona de usinagem e os eletrodos, exercendo simultaneamente uma ação de remoção das partículas erodidas dessa zona de usinagem.

Um bom líquido dielétrico, em UEE, deve apresentar as seguintes características:

- resistência dielétrica suficiente para isolar o eletrodo e a peça; deve deixar passar corrente apenas sob a forma de descargas (baixas perdas dielétricas);
- baixa inflamabilidade;
- mínima variação das suas propriedades em todas as condições de usinagem, temperatura, contaminação do dielétrico etc.;
- propriedades quimicamente neutras, para não atacar a peça, a ferramenta, o equipamento, nem tampouco o operador;
- viscosidade baixa, para melhor executar as suas funções na zona de usinagem;
- ausência de formação de vapores ou com odor desagradável.

Basicamente, se utilizam hidrocarbonetos e água desionizada como fluido de serviço. Dentre todos os fluidos dielétricos, contudo, o querosene tem sido o mais lar-

gamente utilizado nos equipamentos de usinagem por eletroerosão, pelas suas características em serviço.

A composição do querosene é a seguinte: 86,3% C, 13,6% H e 0,08% S. A 20 °C, ele possui u'a massa específica de 793 kg/m³ e uma viscosidade cinemática de 0,0160 St; seu calor específico médio, entre 0 e 100 °C, é de 500 cal/g °C.

Um fator negativo da utilização do querosene como fluido dielétrico é o seu odor desagradável em serviço, exigindo uma exaustão eficiente do ar ambiental e uma circulação de ar fresco no recinto de trabalho.

5.3. Parâmetros Termodinâmicos

A remoção de material por eletroerosão deve-se, em grande parte, à fusão e/ou vaporização do metal pelo calor gerado próximo à superfície dos elétrodos. Isso tem motivado diversas pesquisas nessa área, destacando-se os trabalhos de Van Dijck¹³, Van Dijck e Snoeys¹⁴ e Marty¹⁵, que concluíram que o suprimento de vapor metálico no canal de plasma é assegurado durante todo um pulso de descarga, devido às pequenas flutuações na tensão de descarga.

É, pois, importante, familiarizar-se com os parâmetros termodinâmicos mais significativos do processo eletroerosivo, para uma melhor compreensão da sua influência sobre o desempenho da usinagem.

Dentre os parâmetros concernentes aos elétrodos, destacam-se os seguintes:

- pontos de fusão e de ebulição
- condutibilidade térmica
- difusividade térmica.

A cada material associa-se uma dessas grandezas. É desejável que a relação entre os pontos de fusão e de ebulição da peça e do eletrodo-ferramenta seja sempre menor

que a unidade; isso reduz significativamente o desgaste da ferramenta. Baixos pontos de fusão e ebulição da peça induzem a altas velocidades de remoção de material, enquanto altos pontos de fusão e ebulição do eletrodo-ferramenta asseguram um menor desgaste desse componente.

A condutibilidade térmica dos eletrodos exprime a sua capacidade de conduzir calor; a difusividade é a medida da sua inércia térmica e, portanto, é um parâmetro importante nos processos transientes de transmissão de calor, como na UEE, por exemplo.

A condutibilidade térmica de metais puros diminui sensivelmente com a presença de impurezas e com a elevação da temperatura; nas ligas metálicas, a condutibilidade de térmica aumenta com a elevação da temperatura.

O eletrodo-ferramenta ideal deve possuir ótimas características de transmissibilidade, térmica e elétrica. É essencial, para isso, possuir um elevado coeficiente de condutibilidade térmica e de difusividade.

O fluido dielétrico, por sua vez, devido às necessidades de um elemento refrigerante na UEE, deve assegurar a manutenção da temperatura de serviço em uma faixa compatível com os níveis energéticos da descarga, com a inflamabilidade do dielétrico e com a acuracidade da usinagem executada.

Lascoe¹⁶, analisando a influência da temperatura do dielétrico sobre o processo de usinagem, observou que maiores velocidades de remoção de material são obtidas a baixas temperaturas do banho dielétrico (10 °C), assim como o avanço linear da ferramenta é mais uniforme; em contrapartida, melhores relações de desgaste conseguem-se a temperaturas mais altas do dielétrico (30 °C). De acordo com o parâmetro mais importante para cada aplicação, seleciona-se a faixa de temperatura mais conveniente. Para isso, é preciso que o fluido dielétrico assegure uma refrigeração eficiente da zona de usinagem, mantendo simultaneamente as suas características operacionais confiáveis.

5.4. Parâmetros Hidrodinâmicos

A usinagem por eletroerosão é, por excelência, um processo de fabricação de colóides. Em muitos aspectos, a ciência dos colóides é de notável complexidade e o assunto não pode, diversas vezes, ser tratado com a exatidão as sociada a determinados ramos da físico-química, até porque o emprego de materiais de composição até certo ponto duvidosa introduz considerável incerteza na reprodutibilidade e interpretação final dos resultados.

Um fato, porém, é certo: deve haver, durante a u sinagem eletroerosiva, uma remoção incontinenti das partículas coloidais do "gap" de serviço. Diversos experimentos têm mostrado que a natureza e a concentração de partículas sólidas no "gap" influenciam significativamente a velocida de de remoção de material e o desgaste do elétrodo-ferra-- menta.

Vajta et alii¹⁷, Hockenbury¹⁸, De Bruyn¹⁹, Lascoe¹⁶, Karafuji e Suda²⁰ e Crookall²¹, dentre outros, analisaram aspectos relacionados com o fluido dielétrico e sua influência sobre as condições de usinagem, a peça e o elé trodo-ferramenta utilizado, constatando que deve haver uma circulação eficiente do fluido dielétrico entre a ferramenta e a peça, para que se obtenham os melhores rendimentos nos diversos regimes de usinagem.

A lavagem é a circulação forçada do fluido dielétrico no "gap" entre os elétro dos, de modo a remover as partículas de material erodido. Diferentes tipos de lavagem podem ser empregados conforme os problemas a tratar:

- por injeção
- por aspiração ou sucção
- por injeção lateral
- combinada
- por injeção pulsada sincronizada.

A lavagem por injeção do fluido dielétrico se efetua via uma "câmara de lavagem" (um copo metálico posicionado sob a peça usinada) ou via um furo central executado no próprio eletrodo. No primeiro caso, Figura 34-a, a peça é pré-furada e montada sobre a câmara de lavagem, acoplada às tubulações. No segundo caso, Figura 34-b, o eletrodo-ferramenta é furado e o dielétrico jorra através desse duto.

A lavagem por injeção permite obter lavagens ligeiramente cônicas por meio de eletrodos de perfil constante. Esse efeito de conicidade é provocado pelas partículas que se elevam ao longo das laterais do eletrodo-ferramenta, favorecendo assim as descargas laterais.

Fig. 34 - Lavagem por injeção do fluido dielétrico

A lavagem por aspiração ou sucção consiste em aspirar o líquido dielétrico da zona de usinagem por meio de uma câmara de lavagem (Figura 35-a) ou pelo orifício central do eletrodo (Figura 35-b).

Reduzindo o movimento de partículas erodidas do "gap" lateral, a lavagem por aspiração permite que se obtenham usinagens com uma conicidade baixíssima. O acúmulo

de gases na câmara de lavagem, provenientes da usinagem, pode ser eliminado assegurando-se um fluxo dielétrico contínuo pela câmara de lavagem, através da determinação criteriosa da pressão vacuométrica de sucção e da vazão do líquido aspirado.

Fig. 35 - Lavagem por aspiração do fluido dielétrico

Os gases provenientes da usinagem e acumulados na câmara de lavagem exercem um efeito de martelamento sobre a peça usinada, podendo inclusive deslocá-la da sua posição predeterminada.

Quando se apresenta a impossibilidade de se executar furos de lavagem no eletrodo-ferramenta ou na peça, recorre-se à lavagem por injeção lateral do dielétrico (Figura 36). Essa técnica pode ser empregada utilizando-se uma pulsação sincronizada do cabeçote; periodicamente, o cabeçote é servoafastado da zona de usinagem e um ou mais jatos de fluido são dirigidos à peça, removendo as partículas erodidas; após um tempo regulável, o cabeçote retorna à posição de trabalho, reiniciando o processo de usinagem e, assim, sucessivamente.

Fig. 36 - Lavagem por injeção lateral do fluido dielétrico

Finalmente, pode-se combinar a injeção e a aspiração do dielétrico para executar uma lavagem eficiente em peças de formato complicado. Ela permite a evacuação do gás e das partículas erodidas através de uma circulação do fluido dielétrico, mais regular.

Os aspectos hidrodinâmicos da circulação forçada do dielétrico na zona de usinagem assumem uma relevância capital à estabilidade do processo eletroerosivo, ao desgaste da ferramenta, ao sobrecorte, à conicidade e ao acabamento superficial da peça usinada.

Os principais parâmetros hidrodinâmicos que devem ser analisados em UEE são os seguintes:

- massa específica do fluido dielétrico
- viscosidade do fluido dielétrico
- pressão de recalque do fluido dielétrico para o reservatório de serviço
- vazão de entrada do fluido dielétrico no reservatório de serviço
- vazão de entrada do fluido dielétrico injetado diretamente na zona de usinagem

- vazão de saída do fluido dielétrico aspirado da zona de usinagem
- pressão manométrica de injeção do dielétrico na zona de usinagem
- pressão vacuométrica de sucção do dielétrico na zona de usinagem
- distribuição da temperatura do banho dielétrico
- perdas de carga devido às geometrias dos elétrodos, à contaminação do dielétrico no "gap" de serviço e aos tipos de furos de lavagem executados nos elétrodos.

O equacionamento das leis que regem as variações desses parâmetros listados é extremamente complicado e moroso; contudo, minimizam-se estas dificuldades através de hipóteses simplificadoras.

5.5. Parâmetros Metalúrgicos

A homogeneidade é um estado ideal que assegura a um determinado material as mesmas propriedades em toda a sua configuração geométrica. Os materiais correntemente utilizados, entretanto, não são homogêneos. A veracidade dessa assertiva, na prática, é constatada pela variação das propriedades de um mesmo material segundo diferentes planos, tomados em relação a um sistema referencial de coordenadas.

Elétrodos metálicos fabricados a partir de materiais trabalhados a frio são um exemplo clássico da ocorrência desse fenômeno. Propriedades relevantes à UEE, como as condutibilidades elétrica e térmica, assumem valores muito distintos entre si segundo dois planos ortogonais. Nos grafites, as dispersões entre esses valores são ainda maiores.

Durante a fabricação dos elétrodos, deve-se le-

var em conta a orientação correta a ser adotada, para que haja uma compatibilidade entre o plano de mínima resistividade elétrica e a direção do fluxo da corrente de descarga. Com isso, obtêm-se maiores velocidades de remoção de material e minoração do efeito das descargas laterais.

O tamanho do grão dos elétrodo também influi no processo UEE. Porto e Cupini²², usinando alumínio de diferentes tamanhos de grãos com elétrodo de grafite, constataram que existe uma melhoria de usinabilidade quando se trabalha com estrutura de grãos finos.

O desenvolvimento de calor na zona de usinagem altera as propriedades de uma camada superficial delgada da peça usinada. Parte da energia da descarga é convertida em calor e isso provoca um tratamento térmico no material; a zona afetada pelo calor tem uma profundidade compatível com o regime de usinagem utilizado.

A experiência tem mostrado que a resistência à fadiga de peças eletroerodidas é menor que a das peças usinadas por processos convencionais. Isso se deve às modificações estruturais que ocorrem na superfície da peça durante a UEE.

5.6. Parâmetros Mecânicos

O servo-sistema de comando do avanço do cabeçote porta-elétrodo é o elemento responsável pela manutenção do "gap" entre o elétrodo e a peça, de modo a permitir que a descarga se efetue a um nível de tensão predeterminado pois, durante a usinagem, tanto a peça, como a ferramenta, são erodidas.

A velocidade de avanço do cabeçote é um parâmetro mecânico decisivo no desempenho eficiente da usinagem. De acordo com a área usinada, o dielétrico usado, os materiais dos elétrodo, a energia e a frequência de descargas, a velocidade de avanço do cabeçote determina a velocidade de remoção de material e a estabilidade do processo.

Qualquer defasagem entre a velocidade de avanço do cabeçote e a velocidade com que as partículas são erodidas induz a um baixo aproveitamento da energia de descarga.

A rigidez do conjunto mecânico da máquina-ferramenta UEE é igualmente importante à precisão de movimento do cabeçote porta-ferramenta em relação à peça.

5.7. Parâmetros Geométricos

A seleção das condições mais propícias ao desenvolvimento da UEE deve levar em conta, finalmente, os parâmetros geométricos do processo:

- área a ser usinada
- profundidade de usinagem
- geometria da cavidade
- conicidade
- rugosidade superficial da peça usinada
- sobrecorte
- desgaste do eletrodo-ferramenta.

Cada um dos parâmetros acima assume uma importância correlata com o regime de usinagem utilizado, com a acuracidade e com os custos do processo, variáveis para cada aplicação.

A quantificação da influência dos parâmetros tecnológicos sobre a UEE é um tema ainda em aberto e que exige uma abordagem dinâmica de todo o conjunto de variáveis envolvidas, o que não deixa de ser um desafio aos pesquisadores da área.

6. ANÁLISE EXPERIMENTAL DA USINAGEM DE AÇO-CARBONO POR ELE TROEROSÃO. RESULTADOS OBTIDOS

6.1. Generalidades

A maioria dos fatores que influem no desempenho do processo UEE foi analisada nos capítulos iniciais deste trabalho. Salientou-se a importância dos diversos parâmetros tecnológicos sobre as características do processo, bem como os principais tipos de máquinas e geradores UEE desenvolvidos em escala industrial.

Restringe-se, este capítulo, à análise experimental da usinagem de aço-carbono com elétrodos-ferramentas de cobre em u'a máquina UEE de relaxação que utiliza querosene como fluido dielétrico.

Em u'a máquina dessas, a tarefa do usuário fica restrita à seleção do regime de usinagem, configurado pelas características elétricas do circuito escolhido - resistência, capacitância, indutância, polaridade e tensão de ajuste determinada. Feito isso, adequa-se à aplicação o ti

po mais conveniente e exequível de lavagem e a pressão manométrica (ou vacuométrica) de injeção (ou sucção) do fluido dielétrico deve ser a mínima capaz de ensejar a remoção das partículas dispersas na zona de usinagem porque, aumentando-se o seu valor, verifica-se um maior desgaste do eletrodo-ferramenta metálico.

6.2. Descrição do Equipamento Eletroerosivo Utilizado

A Figura 37 mostra uma vista parcial da máquina UEE, utilizada na fase experimental deste trabalho. Ela possui gerador do tipo relaxação, 20 A, é fabricada pela Hiteka, de procedência húngara, sendo do tipo Erosimat D-01/A; caracteriza-se por uma potência de 10 KVA e um servo-sistema de comando eletro-hidráulico do avanço do cabeçote porta-elétrodo.

Fig. 37 - Vista da máquina-ferramenta eletro-siva Erosimat D-01/A, da Hiteka

A Figura 38 apresenta o cabeçote porta-elétrodo, energizado via o cabo de conexão elétrica mostrado pela figura. O dispositivo de fixação do eletrodo-ferramenta situado na parte inferior do cabeçote foi projetado e construído para possibilitar desvios de perpendicularismo da ordem de, no máximo, $0,02/100$ mm, entre o movimento do eletrodo-ferramenta (eixo dos "z", no sistema de coordenadas cartesianas) e a mesa de coordenadas, em operação.

Fig. 38 - Cabeçote porta-elétrodo e dispositivo de fixação do eletrodo-ferramenta

A mesa de coordenadas utilizada nos ensaios caracteriza-se pelos seguintes desvios:

- Desvios de planicidade (eixos "x" e "y"):
 $0,03/1000$ mm
- Desvios de paralelismo entre a superfície ativa do eletrodo-ferramenta e a mesa de coordenadas: $0,02/200$ mm

- Desvios de perpendicularismo entre os eixos "x" e "y" da mesa de coordenadas: 0,01/100 mm
- Deflexão do cabeçote durante o movimento: 0,04/300 mm.

A precisão final da peça usinada por eletroerosão depende intrinsecamente dos valores acima especificados para os desvios de forma e posição. A análise detalhada dos mesmos revela a alta acuracidade do conjunto mecânico da máquina-ferramenta eletroerosiva empregada nos ensaios, comparável às máquinas-ferramenta mais precisas no âmbito da usinagem convencional.

O gerador elétrico, por sua vez, é construído na forma de blocos de montagem normalizados (Figura 39), que é de concepção moderna e garante fácil acesso e troca de componentes danificados ou curto-circuitados. Ele compreende os circuitos de operação das demais unidades (máquina-ferramenta eletroerosiva, unidade de alimentação do dielétrico e unidade de alimentação do circuito hidráulico de comando e acionamento do cabeçote porta-elétrodo) e os circuitos de relaxação, exigidos para a usinagem propriamente dita.

Fig. 39 - Bloco de montagem normalizado do gerador elétrico

Nas Figuras 40 e 41, apresentam-se, respectivamente, o painel de comando dos circuitos de relaxação, situado no gerador elétrico e o painel de comando do cabeçote, situado na máquina-ferramenta eletroerosiva; ambos se distinguem pela sua simplicidade de operação e fácil acesso.

Fig. 40 - Painel de comando dos circuitos de relaxação, situados no gerador elétrico

Uma vez posicionados os elétrodos de serviço, a seleção dos ajustes elétricos é feita em alguns segundos. Apenas a compensação do peso do elétrodo (e da temperatura do óleo do circuito hidráulico de comando e acionamento do cabeçote eletroerosivo), feita por intermédio da alavanca mostrada na Figura 41, pode levar alguns minutos; é uma tarefa que exige acuidade e paciência por parte do operador, já que o cabeçote deve ficar parado no meio do curso, ao longo do eixo dos "z", com os pulsadores de comando "ascendente" e "descendente" do movimento do cabeçote, soltos. Essa compensação, quando bem feita, é fundamental para um bom funcionamento do servo-sistema eletro-hidráulico. Isso é necessário porque o peso do elétrodo-ferramenta pode ser de até 200 N.

Fig. 41 - Painel de comando do cabeçote, situado na máquina-ferramenta eletroerosiva

O regulador eletro-hidráulico é um dos principais elementos que compõem o servo-sistema de comando do avanço do cabeçote eletroerosivo (Figura 42-a). Compõe-se de um sistema bico-palhetas e um transdutor de indutância diferencial, apresentado esquematicamente na Figura 42-b. Sua função é manter o "gap" entre os eletrodos durante a usinagem, evitando assim o contato metálico entre eles, com a consequente formação de curto-circuito. Esse sistema alia a rapidez de resposta do transdutor elétrico ao elevado ganho do transdutor hidráulico e é largamente utilizado em máquinas e dispositivos que empregam níveis moderados e altos de energia; seu uso tem sido uma constante na maioria das máquinas UEE em operação, ainda que, sob condições de altas frequências de descarga, esse sistema deixe muito a desejar.

Fig. 42 - Regulador eletro-hidráulico do avanço do cabeçote eletroerosivo

A unidade de alimentação hidráulica do comando e acionamento do cabeçote é apresentada na Figura 43. Ela é constituída de um reservatório de óleo, com capacidade de 18 litros, uma bomba acionada a 1.420 rpm por um motor 380 V e 2,2 Kw. O óleo, durante o processo da usinagem, assume uma faixa de temperatura de serviço de 30 a 60 °C, uma viscosidade de 20 a 25 cSt a 50 °C. A pressão de serviço do óleo, recomendada pelo fabricante, é de 3 MPa.

A unidade de bombeamento do fluido dielétrico (Figura 44) é responsável pelo fornecimento desse líquido ao reservatório de serviço a uma vazão de, até, $1,66 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (100 l/min). O motor elétrico de acionamento dessa bomba centrífuga é energizado a 380 V, 0,75 Kw, 2.880 rpm. A pressão máxima do fluido bombeado é de 0,2 MPa.

Fig. 43 - Unidade de alimentação hidráulica do cabeçote eletroerosivo

Fig. 44 - Unidade de bombeamento do circuito de distribuição do fluido dielétrico

Em usinagem de desbaste, o rotor da bomba é altamente solicitado pelo líquido contaminado. Apesar do sistema de pré-filtragem e decantação reter uma quantidade considerável de partículas metálicas (Figura 45), essas bandejas são impotentes para reter as partículas coloidais, que são aspiradas pela bomba, juntamente com o líquido, e recalçadas para o reservatório de serviço, alterando as condições de usinagem. Saliente-se que, durante o serviço de desbaste, não se utiliza o sistema de filtragem do dielétrico, para evitar danos nos cartuchos tubulares e consequente inutilização dos mesmos.

Fig. 45 - Sistema de pré-filtragem e decantação do fluido dielétrico

A unidade de filtragem do fluido dielétrico é mostrada na Figura 46-a. Compõe-se de três filtros, com dois cartuchos tubulares cada um (Figura 46-b). Tais filtros asseguram a retenção de partículas cujas dimensões são superiores a $5\ \mu\text{m}$ e a desobstrução dos seus poros deve ser periodicamente providenciada através de imersão em líquido dielétrico limpo. Essa operação assegura a eficiência do sistema e reduz a queda de pressão do fluido de serviço nessa unidade.

Fig. 46 - Unidade de filtragem do fluido dielétrico

Fig. 47 - Válvulas de regulação manual dos sistemas de lavagem por injeção (acima) e aspiração (abaixo)

As válvulas de regulação manual de pressão manométrica e vacuométrica de lavagem por injeção e aspiração, respectivamente, do fluido dielétrico, são apresentadas na Figura 47. No plano de fundo, situa-se a válvula magnética de comando da lavagem pulsante por injeção do dielétrico.

A temperatura do fluido dielétrico no reservatório de serviço é monitorada por um termo-resistor, montado nesse reservatório, acoplado a um termo-interruptor (Figura 48), que protege o equipamento contra possíveis aquecimentos críticos (superiores a 40 °C), desconectando automaticamente a tensão elétrica do gerador necessária à realização da operação de usinagem.

Fig. 48 - Termo-interruptor de proteção contra eventuais superaquecimentos do fluido dielétrico em serviço

Como se depreende, apesar de possuir um gerador considerado ultrapassado, a máquina-ferramenta eletroerosiva utilizada apresenta uma boa acuracidade dimensional e segurança de funcionamento, o que é muito importante no pro

cesso, pelos riscos de vida inerentes à utilização de equipamentos que trabalham a alta tensão elétrica e lidam, simultaneamente, com líquido inflamável.

A operação do equipamento pode ser feita com muita facilidade, sem a necessidade de um operador de alto grau de especialização. Posta em funcionamento, a máquina opera sozinha até a profundidade de corte predeterminada pelo limitador automático de curso, liberando assim o operador para executar outras tarefas.

6.3. Projeto e Fabricação dos Elétrodos de Ensaio

A filosofia do projeto adotada no dimensionamento dos eletrodos a serem empregados nos ensaios assumiu, como premissa, a característica básica de utilização de uma máquina-ferramenta eletroerosiva com gerador do tipo relaxação: prioridade para os ensaios de acabamento. Procurou-se, dessa maneira, determinar um ponto de equilíbrio entre o tempo de operação, a área frontal e o custo do eletrodo-ferramenta.

A área frontal do eletrodo-ferramenta influi decisivamente na velocidade de remoção de material e no desgaste do eletrodo-ferramenta, conforme já foi salientado anteriormente. De acordo com o gráfico da Figura 49, a usinagem eletroerosiva de uma peça com eletrodo de área frontal $A_f = 1000 \text{ mm}^2$ — o que equivale a uma barra de seção circular de diâmetro 35,68 mm — deve ser efetuada, com o melhor rendimento, a uma velocidade de remoção de material (VRM) de $200 \text{ mm}^3/\text{min}$; analogamente, para um eletrodo com $A_f = 45 \text{ mm}^2$, deve ser associada uma VRM = $20 \text{ mm}^3/\text{min}$; para $A_f = 7 \text{ mm}^2$, VRM = $5 \text{ mm}^3/\text{min}$.

Sob essa égide, foram selecionados os valores apresentados na Tabela 6.1 para as áreas frontais dos eletrodos. Os eletrodos de seção vazada tinham um furo de diâmetro $2,38 \pm 0,14 \text{ mm}$. Optou-se pelo uso de eletrodos-ferramen

ta de seção quadrada, para possibilitar uma análise qualitativa do arredondamento dos cantos em função da profundidade de penetração desses elétrodos.

Fig. 49 -- Correlação entre a VRM e a área frontal ótima do eletrodo^{2,3}

Assim, a determinação daqueles valores de A_f proporcionou uma economia significativa no custo dos ensaios, maior acuracidade dos resultados obtidos nos ensaios de acabamento e um tempo total de usinagem relativamente curto.

O material usado na fabricação dos elétrodos-ferramentas foi o cobre eletrolítico; o eletrodo da peça era de aço ABNT 1010, com a seguinte composição: 0,10% C, 0,049% S, 0,4 % Mn, 0,006 % Si e 0,018 % P.

A fabricação dos elétrodos-ferramentas foi executada utilizando-se os processos convencionais de usinagem. As dificuldades surgidas, nessa etapa, disseram respeito à não-fixação desses elétrodos na mesa magnética da retífica, face às propriedades diamagnéticas do cobre; tornou-se

Tab. 6.1 - Características dimensionais dos elétrodos-ferramentas durante os ensaios

Seção Frontal		Diâmetro do furo central (mm)	Área frontal (mm ²)	Seções Laterais	
Dimensão (mm)	Tolerância dimensional (µm)			Comprimento (mm)	Estado final
6,0	+ 0 - 10	2,38	31,55	28	Retificado
6,0		-	36,00		Aplainado
6,4		2,38	36,51		Retificado
6,4		-	40,96		Aplainado
7,0		2,38	44,55		Retificado
7,0		-	49,00		Aplainado
7,5		2,38	51,80		Retificado
7,5		-	56,25		Aplainado

mister a adaptação de um sistema de fixação dos elétrodos de cobre que possibilitasse a retificação das faces laterais dos elétrodos. Isso foi contornado pela execução de dois furos cegos de diâmetro $2,38 \pm 0,14$ mm e profundidade 6,0 mm nas duas superfícies frontais dos elétrodos, que permitiam o acoplamento dos dois dispositivos de aço mostrados na Figura 50. As superfícies frontais dos elétrodos foram faceadas e polidas com lixa número 120, proporcionando-lhes uma rugosidade superficial de 1,12 µm (VDI 21).

Fig. 50 - Dispositivos usados para a fixação dos elétrodos-ferramenta na mesa de trabalho da retífica plana

As peças usinadas de aço-carbono tinham, em média, 170 x 50 x 11 mm e algumas possuíam uma carreira de furos para lavagem, cujo diâmetro era de $2,38 \pm 0,14$ mm. Uma parte dos ensaios foi efetuada centrando-se o elétrodo-ferramenta sobre um desses furos e procedendo-se a usinagem; a outra parte consistiu em usinar os furos sem orifício de lavagem (Figura 51).

Fig. 51 - Par de elétrodos usados em cada ensaio. O elétrodo-ferramenta (nº de referência 28, na figura) era utilizado uma única vez

6.4. Metodologia

Uma vez projetados e fabricados os elétrodos e o dispositivo de fixação do elétrodo-ferramenta, passou-se à fase seguinte, de realização dos ensaios.

Inicialmente, os elétrodos eram convenientemente posicionados com o auxílio de um relógio comparador. Registravam-se os valores medidos da temperatura ambiente e umidade relativa do ar.

A maior parte dos ensaios foi executada empregando-se lavagem por injeção lateral do fluido dielétrico, por ser a mais facilmente adaptável à maioria das aplicações industriais. Utilizou-se, ainda, lavagem por aspiração do fluido dielétrico na zona de lavagem.

Nas usinagens que empregaram lavagem por injeção lateral do fluido dielétrico, o tubo de injeção tinha a sua extremidade distando 15 mm de uma das faces do eletrodo e era posicionado na direção da zona de usinagem, para ensejar uma lavagem eficiente das partículas naquela região e melhorar, portanto, as condições de usinagem. Durante os ensaios cuja lavagem era efetuada por aspiração do líquido contaminado na zona de usinagem, empregou-se uma "câmara de lavagem" tipo copo, à qual se acoplava uma tubulação de sucção; essa câmara posicionava-se sob a peça usinada e as partículas erodidas dispersas no fluido alojavam-se ali, ou eram aspiradas, juntamente com o líquido, para o tanque de dielétrico.

As leituras da pressão manométrica de injeção e vacuométrica de aspiração foram efetuadas nos manômetros e vacuômetros incorporados à máquina-ferramenta eletroerosiva utilizada (Figura 47).

Os valores eficazes da tensão elétrica de ajuste e da corrente de descarga foram medidas por meio de um voltímetro e um amperímetro, respectivamente, localizados no painel de comando do gerador elétrico (Figura 40). Essa tensão permaneceu constante em uma faixa de ± 5 V. A corrente de descarga, por seu turno, permaneceu constante dentro de $\pm 0,1$ A, nos ensaios de acabamento, e de $\pm 0,3$ A, nos ensaios de desbaste.

A Tabela 6.2 apresenta as diversas variáveis do processo UEE controladas ou monitoradas durante a experimentação, os instrumentos empregados na medição dessas variáveis, seu fabricante, procedência, faixa de leitura e acuracidade de cada um.

Tab. 6.2 - Instrumentação utilizada durante os ensaios

VARIÁVEL MEDIDA		INSTRUMENTO E MEDIDA UTILIZADO				
Variável/parâmetro		DESCRIÇÃO	FABRICAÇÃO E PRECISÃO	FAIXA DE LEITURA	UNIDADE DE MEDIDA ADOPTADA	ACURACIA NA FAIXA DE MED. USADA
Condições atmosféricas	Temperatura ambiente (bulbo seco)	Termômetro bimetalico	Reis Graf Suíça	-10 a 50	°C	± 1 °C
	Umidade relativa do ar	Higrômetro de fio de cabelo	Reis Graf Suíça	5 a 10	%	± 2 %
Fluido dielétrico	Pressão manométrica de recalque do fluido para o reservatório de dielétrico	Indicador manométrico de esfera	M M G Hungria	0 a 1,6	kgf/cm ²	$\pm 7 \times 10^{-2}$ kgf/cm ² ($\pm 7 \times 10^3$ Pa)
	Pressão manométrica de injeção do dielétrico na zona de usinagem	Indicador manométrico de esfera	M M G Hungria	0 a 1,6	kgf/cm ²	$\pm 7 \times 10^{-2}$ kgf/cm ² ($\pm 7 \times 10^3$ Pa)
	Pressão vacuométrica de sucção do dielétrico na zona de usinagem	Indicador vacuométrico de esfera	M M G Hungria	0 a 760	mm Hg	± 53 mm Hg ($\pm 7 \times 10^3$ Pa)
	Temperatura do banho dielétrico	Termômetro de mercúrio em vidro	JUNO Alemanha	-10 a 150	°C	$\pm 0,5$ °C
Óleo do sistema hidráulico	Pressão manométrica de recalque do óleo do circuito de comando e acionamento do cabeçote	Indicador manométrico de esfera	M S Z Hungria	0 a 100	kgf/cm ²	± 4 kgf/cm ² ($\pm 4 \times 10^5$ Pa)
Ajustes elétricos	Tensão de ajuste	Voltímetro	GANZ 101 DV Hungria	0 a 600	V	± 2 V
	Corrente de descarga	Amperímetro (com duas escalas)	GANZ 101 DA Hungria	0 a 5 0 a 25	A	$\pm 5 \times 10^{-2}$ A $\pm 2,5 \times 10^{-1}$ A
Avanço do cabeçote eletroerosivo	Avanço parcial do cabeçote	Relógio comparador	SCMET Tcheco-Eslôvaquia	0 a 100	µm	± 1 µm
	Avanço do cabeçote para realtização do fim de curso e desligamento automático do sistema	Micrômetro para medidas de profundidade	MITSUBISHI Japão	0 a 25,60	mm	$\pm 10^{-2}$ mm
Tempo de usinagem	Tempo total da usinagem	Cronômetro digital	CASIO fx-58 Japão	0 a 100 h	h-min-s	10^{-2} s
	Tempo parcial de usinagem	Cronômetro	HANAUET Alemanha	0 a 30 min	min-s	10^{-2} s
Peso dos eletrodos	Peso dos eletrodos	Balança de precisão	CERILHIN TP 20 Inglaterra	0 a 1600	gf	$\pm 2,5 \times 10^{-2}$ gf ($\pm 2,5 \times 10^{-4}$ N)
Qualidade superficial	Rugosidade superficial da peça usinada	Poltrão de rugosidade superficial	ERIGIMAT - HITEKA Hungria	18 a 61 (0,8 a 32)	VDI (µm)	± 1 VDI ($\pm 20 \log 10$ ka)

A velocidade de avanço do cabeçote porta-elétrodo foi determinada segundo o esquema da Figura 52: cronometrou-se o tempo de avanço do cabeçote entre dois ou mais pontos situados ao longo do eixo dos "z", monitorando-se esse avanço com um relógio comparador micrométrico, solidário ao cabeçote eletroerosivo. Isso foi feito apenas em alguns ensaios, porque exigia a atenção constante de alguém para medir tais grandezas, além de ser uma tarefa muito exaustiva. A cada leitura, o operador sentia "in loco" toda a toxicidade do processo, através da inalação dos gases expelidos durante a usinagem, com o seu odor peculiar.

Fig. 52 - Método de determinação da velocidade de avanço do eletrodo-ferramenta

A determinação da velocidade de remoção de material (VRM) foi feita através das medidas do tempo de usina

gem e do peso do material removido da peça durante a usinagem, segundo a equação 6.1:

$$VRM = \frac{\Delta P}{T_t} P \cdot \gamma \quad (6.1)$$

Analogamente, a relação de desgaste (RD) foi determinada a partir das pesagens do elétrodo-ferramenta e da peça, no início e no fim de cada ensaio, com o auxílio da seguinte equação:

$$RD = \frac{\Delta P_{ef}}{\Delta P_p} \cdot \frac{\gamma_p}{\gamma_{ef}} \quad (6.2)$$

ou seja,

$$RD = \frac{(P_{ef})_i - (P_{ef})_f}{(P_p)_i - (P_p)_f} \cdot \frac{\gamma_p}{\gamma_{ef}} \quad (6.3)$$

Os valores do peso específico dos materiais da peça (aço ABNT 1010) e do elétrodo-ferramenta (cobre eletrolítico) são de, respectivamente, $\gamma_p = 7,8 \text{ Kg/dm}^3$ ($7,651 \times 10^4 \text{ N/m}^3$) e $\gamma_{ef} = 8,9 \text{ Kg/dm}^3$ ($8,731 \times 10^4 \text{ N/m}^3$).

A rugosidade da superfície usinada foi determinada por análise visual comparativa entre esta e um padrão de rugosidade superficial fornecido pelo fabricante do equipamento eletroerosivo, auxiliada por uma lupa que amplia 5X. O mencionado padrão foi devidamente aferido, utilizando-se para isso um rugosímetro de procedência inglesa, marca Surtronic 3, fabricando pela Rank Taylor Hobson, com faixa de leitura de rugosidade $R_a = 0$ a $25 \mu\text{m}$ e uma acuracidade de $\pm 2\%$.

A escolha do método visual de comparação da rugosidade superficial da peça usinada e do padrão apresentado na Figura 53 deveu-se à constatação de que os parâmetros tecnológicos influem muito na qualidade final da superfície usinada e, dessa forma, a acuracidade da leitura obtida por esse método ($\pm 1,5 \text{ VDI}$) coaduna-se com a acuracidade da superfície obtida ($\pm 3,0 \text{ VDI}$) em função dos parâme-

tros selecionados, sejam elétricos, hidrodinâmicos, geométricos etc.

Fig. 53 - Padrão de rugosidade superficial fornecido pelo fabricante do equipamento UEE empregado

Além disso, procurou-se, nesse trabalho, reproduzir todos os procedimentos experimentais utilizados em condições operacionais na indústria, para uma maior aplicabilidade dessa pesquisa.

A conicidade de cada furo foi determinada com o auxílio de um paquímetro. Traçaram-se, em cada uma das quatro faces da ferramenta, duas linhas de referência, equidistantes 4,0 mm, uma da outra, e 23,0 mm da superfície frontal não-usinada, no sentido longitudinal do eletrodo; nesses locais, mediram-se as espessuras do eletrodo-ferramenta e determinou-se um par de valores para a conicidade de cada furo (θ), em graus, determinando-se a média. Não houve variações significativas entre as duas conicidades, nem tampouco entre a conicidade do eletrodo-ferramenta e a da peça usinada. A conicidade foi calculada segundo a expressão 6.4:

$$\theta = \text{arc tg} \frac{(e_1 - e_2)/2}{\Delta l} \quad (6.4)$$

utilizando-se $\Delta l = 4,0$ mm. A Figura 54 explicita cada uma das variáveis da equação 6.4, enquanto a Figura 55 apresenta um conjunto de eletrodos com diferentes conicidades e desgaste. A numeração dos eletrodos serviu para identificá-los nas medidas finais.

Fig. 54 - Dimensões do eletrodo-ferramenta empregadas no cálculo da conicidade do furo usinado na peça

Fig. 55 - Eletrodos utilizados nos diversos regimes de ensaio

O sobre corte foi determinado pela diferença entre as dimensões do furo executado, à altura da superfície mais externa desse furo, e as dimensões do eletrodo-ferramenta, medida antes do ensaio, diferença essa dividida por dois. Os valores tabelados são uma média de cada par de valores medidos, para um mesmo ensaio; não se registraram variações substanciais entre os dois sobre cortes lidos para um mesmo ensaio.

6.5. Resultados e Discussões

Apresentam-se, a seguir, os resultados obtidos a través da realização dos ensaios. As Figuras 56 a 75 trazem, em forma de gráficos, os valores da relação de desgaste, velocidade de remoção de material, sobrecorte e rugosidade superficial em função da corrente de descarga. Cada um desses gráficos encerra um conjunto de variáveis que influem no desempenho do processo, como já foi discutido anteriormente; assim, apresentam-se, sob a forma tabular, todas as condições impostas e/ou obtidas em cada ensaio (Tabela 6.3).

As figuras 56 a 59 dizem respeito ao regime de desbaste da máquina UEE utilizada. Como fora previsto na fase de projeto dos elétrodos-ferramenta, a partir de um determinado nível de corrente de descarga, o que equivale dizer, a partir de um certo nível de energia, o rendimento da usinagem (energia fornecida/energia utilizada na erosão da peça) cai abruptamente, para uma mesma área frontal desse eletrodo. No caso em análise, para as condições utilizadas, a partir de uma intensidade de corrente igual a 5 A observou-se uma elevada instabilidade operacional do cabeçote, acompanhada por um aumento apreciável do nível de ruído do processo.

Esse estágio pode ser visualizado pela sensível redução e aleatoriedade dos valores da velocidade de remoção de material, a partir de 5 A. Poder-se-ia dizer que o processo atingiu um estágio de "saturação energética" para as condições de usinagem selecionadas.

Fazendo uma analogia com a irrigação de um solo, aquele fenômeno pode ser comparado ao caso em que, atingido o teor ótimo de água nesse solo, continua-se a injetar mais e mais água, até encharcá-lo completamente; por outro lado, uma vez determinada a área a ser irrigada e conhecendo-se a qualidade do solo e o sistema radicular a ele vin-

Tab. 6.3 - Resultados obtidos durante os ensaios

Número do Ensaio	Regime de Usinagem	Tensão de Ajuste (V)	Corrente de Descarga (A)		Capacitância Nominal do Circuito de Carga (μF)	Temperatura Ambiente (°C)		Temperatura Média do Banho Dielétrico (°C)		Umidade Relativa do Ar (%)		Pressão de Recalque do Dielétrico (kgf/cm ²)	Pressão de Lavagem		Velocidade de Remoção de Material (mm ³ /min)		Relação de Desgaste (%)		Conicidade (graus)		Sobrecorte Lateral (μm)		Área Frontal do Eletrodo (mm ²)		Rugosidade Superficial da Peça Usinada (μm)	
			INJ.	ASP.		INJ.	ASP.	INJ.	ASP.	INJ.	ASP.		INJ.	ASP.	INJ.	ASP.	INJ.	ASP.	INJ.	ASP.	INJ.	ASP.	INJ.	ASP.	INJ.	ASP.
01/02	DESGASTE	185	1,0	1,0	6,0	28	27	28,5	28,0	64	68	1,2	0,25	-190	11,7	12	82,0	69,0	5,9	2,6	100	85	44,55	44,55	6,3	5,8
03/04		185	2,0	2,0	6,0	25	27	27,0	28,0	60	68	1,2	0,25	-190	24,8	16,5	58,0	60,0	2,0	3,9	120	95	44,55	44,55	7,0	6,3
05/06		185	3,5	3,0	6,0	27	27	28,0	28,5	60	68	1,2	0,25	-190	49,2	36,2	48,1	44,8	2,3	2,8	135	110	49,00	44,55	8,0	7,0
07/08		185	5,2	5,0	6,0	27	27	27,5	28,5	60	68	1,2	0,25	-190	63,5	54,2	35,3	31,1	1,7	2,0	185	145	51,80	51,80	9,0	9,0
09/10		185	8,0	8,0	6,0	27	27	26,0	30,0	60	68	1,2	0,25	-190	29,0	27,7	22,2	22,0	1,5	1,1	300	240	56,25	51,80	12,6	12,6
11/12		185	1,0	1,0	11,0	26	27	27,5	29,0	58	68	1,2	0,25	-190	11,5	11,2	69,7	67,2	1,8	1,9	130	100	44,55	44,55	6,3	5,3
13/14		185	2,0	2,0	11,0	27	27	28,0	29,0	68	68	1,2	0,25	-190	27,3	26,0	56,2	52,3	2,9	2,1	145	120	44,55	44,55	8,0	7,0
15/16		185	3,5	3,5	11,0	24	24	25,5	26,0	64	64	1,2	0,25	-190	60,7	55,2	28,1	23,5	2,5	2,1	165	150	49,00	44,55	9,0	8,0
17/18		185	5,4	5,2	11,0	24	24	25,5	26,0	64	64	1,2	0,25	-190	53,8	54,0	24,2	23,8	2,0	1,9	220	175	49,00	51,80	10,0	10,0
19/20		185	8,2	8,1	11,0	24	24	27,5	29,0	64	64	1,2	0,25	-190	27,5	32,6	19,6	16,1	1,9	1,1	320	235	49,00	51,80	11,2	11,2
21/22		185	9,8	9,8	11,0	24	26	27,5	29,0	64	64	1,2	0,25	-190	28,5	31,6	22,6	16,6	1,5	1,1	410	300	51,80	51,80	12,6	11,2
23/24		185	14,0	14,0	11,0	25	25	28,5	29,0	64	64	1,2	0,25	-190	38,0	34,4	20,5	15,9	1,5	1,0	470	405	56,25	51,80	12,6	11,2
25	ACERTAR TO (relat. média normal)	160	0,15	-	0,003	21	-	22,0	-	50	-	0,7	0,25	-	0,35	-	35,1	-	1,1	-	60	-	40,96	-	0,8	-
26		160	0,35	-	0,050	23	-	25,0	-	59	-	0,7	0,25	-	0,70	-	30,5	-	1,3	-	70	-	40,96	-	1,3	-
27		160	0,70	-	0,163	23	-	24,0	-	55	-	0,7	0,25	-	2,63	-	26,1	-	1,3	-	80	-	40,96	-	2,8	-
28/29		160	1,10	1,1	2,083	25	27	25,5	27,8	62	55	1,0	0,25	-190	9,90	9,2	53,0	49,5	3,1	2,7	130	100	44,55	44,55	4,0	4,0
31/31	ACERTAR TO COM 90 LAPIDAR INVERTIDA	105	0,22	0,25	0,110	24	25	28,0	27,0	68	80	1,0	0,25	-190	0,25	0,16	5,5	5,0	0	0	55	50	31,55	31,55	1,0	0,9
32		105	0,40	-	0,110	25	-	27,0	-	59	-	1,0	0,25	-	0,42	-	4,9	-	0	-	50	-	31,55	-	1,3	-
33		105	0,80	-	0,110	22	-	22,5	-	60	-	1,0	0,25	-	1,00	-	6,1	-	0,5	-	60	-	36,00	-	2,2	-
34		105	2,00	-	0,110	24	-	25,0	-	50	-	1,0	0,25	-	3,00	-	7,0	-	1,0	-	100	-	44,55	-	3,0	-
35		105	0,22	-	0,286	27	-	29,0	-	62	-	1,0	0,25	-	0,27	-	2,6	-	0,5	-	50	-	41,55	-	1,3	-
36		105	0,65	-	0,286	18	-	21,0	-	57	-	1,0	0,25	-	0,48	-	2,2	-	0,5	-	65	-	36,00	-	2,0	-
37		105	1,20	-	0,286	20	-	21,5	-	54	-	1,0	0,25	-	1,50	-	3,6	-	0	-	70	-	36,00	-	2,9	-
38		105	1,80	-	0,286	27	-	29,0	-	62	-	1,0	0,25	-	2,70	-	6,0	-	0,5	-	100	-	44,55	-	3,1	-
39		110	0,40	-	1,086	25	-	27,0	-	66	-	1,0	0,25	-	0,31	-	1,1	-	0	-	65	-	36,51	-	1,9	-
40		110	0,80	-	1,086	24	-	26,5	-	62	-	1,0	0,25	-	0,95	-	1,3	-	0	-	80	-	36,51	-	2,8	-
41		110	1,40	-	1,086	26	-	28,0	-	72	-	1,0	0,25	-	2,00	-	2,9	-	0,6	-	95	-	40,96	-	3,1	-
42		110	2,00	-	1,086	24	-	27,0	-	59	-	1,0	0,25	-	3,20	-	4,8	-	1,0	-	150	-	44,55	-	4,0	-
43		110	0,65	-	1,5	20	-	22,0	-	58	-	1,0	0,25	-	1,10	-	2,8	-	0,25	-	65	-	36,51	-	2,9	-
44		110	1,80	-	1,5	24	-	25,5	-	60	-	1,0	0,25	-	2,95	-	3,2	-	0,5	-	70	-	40,96	-	3,6	-
45		110	3,00	-	1,5	26	-	28,0	-	52	-	1,0	0,25	-	5,20	-	5,0	-	1,0	-	90	-	44,55	-	4,0	-
46		110	4,20	-	1,5	27	-	29,0	-	55	-	1,0	0,25	-	9,50	-	6,7	-	0,5	-	140	-	44,55	-	5,0	-
47		120	0,50	-	1,5	20	-	21,0	-	58	-	1,0	0,25	-	0,90	-	3,1	-	0,5	-	70	-	44,55	-	3,1	-
48		120	1,50	-	1,5	22	-	23,0	-	52	-	1,0	0,25	-	3,00	-	4,0	-	0	-	90	-	44,55	-	4,0	-
49		120	2,00	-	1,5	26	-	28,0	-	55	-	1,0	0,25	-	4,50	-	5,0	-	0,6	-	95	-	44,55	-	4,5	-
50		120	2,70	-	1,5	27	-	29,0	-	52	-	1,0	0,25	-	8,50	-	7,0	-	1,0	-	130	-	44,55	-	4,5	-
51		110	0,3	-	4,5	22	-	22,5	-	62	-	1,0	0,25	-	1,90	-	4,4	-	0,5	-	85	-	44,55	-	4,5	-
52		110	1,7	-	4,5	22	-	23,5	-	54	-	1,0	0,25	-	8,00	-	5,0	-	0,5	-	100	-	44,55	-	5,0	-
53		110	3,0	-	4,5	25	-	27,0	-	60	-	1,0	0,25	-	14,00	-	6,0	-	0,6	-	110	-	44,55	-	5,6	-
54		110	4,0	-	4,5	24	-	26,0	-	55	-	1,0	0,25	-	23,00	-	7,8	-	1,0	-	140	-	44,55	-	5,6	-
55		125	0,3	-	4,5	18	-	20,0	-	52	-	1,0	0,25	-	1,40	-	1,9	-	0,5	-	85	-	40,96	-	5,0	-
56		125	1,2	-	4,5	21	-	21,5	-	58	-	1,0	0,25	-	4,50	-	3,0	-	0,5	-	100	-	44,55	-	5,6	-
57		125	2,0	-	4,5	25	-	27,7	-	55	-	1,0	0,25	-	9,50	-	6,0	-	0,8	-	120	-	44,55	-	6,3	-
58		125	2,7	-	4,5	27	-	28,0	-	61	-	1,0	0,25	-	16,50	-	10,0	-	1,0	-	155	-	44,55	-	6,3	-

culado, além da umidade ótima para a aplicação, pode-se dimensionar o sistema de irrigação conveniente, caracterizado por uma vazão de água determinada, uma frequência de molhamento correspondente etc.

Transpondo-se isso para a UEE, verifica-se que a área a ser usinada é um parâmetro de peso na determinação das condições de usinagem e dos níveis de energia fornecidos por cada descarga, bem como na frequência de descargas.

A Tabela 6.4 apresenta uma correlação entre esses parâmetros hidráulicos e alguns parâmetros tecnológicos do processo eletroerosivo, a título de ilustração. Características peculiares de cada processo à parte, vê-se que a familiaridade com essa analogia pode ser útil e levar a resultados de interesse às duas áreas.

Tab. 6.4 - Analogia entre alguns parâmetros de irrigação de um solo e da UEE

PARÂMETROS IRRIGAÇÃO	PARÂMETROS UEE
Área a ser irrigada	Área a ser usinada
Permeabilidade do solo	Granulometria do material usinado
Vazão de água	Energia de descarga, no tempo
Frequência de molhamento	Frequência de Descargas
Velocidade de penetração da água no solo	Velocidade de avanço do cabeçote
Perdas por evapotranspiração	Perdas por aquecimento dos eletrodos, do dielétrico, emissão de luz, ruído etc.
Perdas de carga	Perdas dielétricas do processo
Sistema radicular	Estrutura cristalina do material usinado

Regime de usinagem: DESBASTE

Polaridade do eletrodo-ferramenta: negativa

Condições de ensaio: $A_f = 44,55 \text{ mm}^2$

49,00 mm^2

51,80 mm^2

56,25 mm^2

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ (0,25 Kgf/cm^2)

Tensão de ajuste: 185 V

Capacitância do circuito de carga: 6 μF

Fig. 56 - Relação de desgaste e velocidade de remoção de material em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: DESBASTE

Polaridade do eletrodo-ferramenta: negativa

Condições de ensaio: $\Lambda_f = 44,55 \text{ mm}^2$

49,00 mm^2

51,80 mm^2

56,25 mm^2

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ (0,25 Kgf/cm^2)

Tensão de ajuste: 185 V

Capacitância do circuito de carga: 6 μF

Fig. 57 - Sobrecorte lateral e rugosidade superficial da pela usinada em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: DESBASTE

Polaridade do eletrodo-ferramenta: negativa

Condições de ensaio: $A_f = 44,55 \text{ mm}^2$
 $= 49,00 \text{ mm}^2$
 $= 51,80 \text{ mm}^2$
 $= 56,25 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kgf/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 185 V

Capacitância do circuito de carga: 11 μF

Fig. 58 -- Relação de desgaste e velocidade de remoção de material em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: DESBASTE

Polaridade do eletrodo-ferramenta: negativa

Condições de ensaio: $A_f = 44,55 \text{ mm}^2$

49,00 mm^2

51,80 mm^2

56,25 mm^2

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kg/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 185 V

Capacitância do circuito de carga: 11 μF

Fig. 59 - Sobrecurso lateral e rugosidade superficial da peça usinada em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO

Polaridade do eletrodo-ferramenta: negativa

Condições de ensaio: $A_f = 40,96 \text{ mm}^2$
 $44,55 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kg/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 160 V

Capacitância do circuito de carga: 3 a 2.083 nF

Fig. 60 - Relação de desgaste e velocidade de remoção de material em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO

Polaridade do eletrodo-ferramenta: negativa

Condições de ensaio: $A_f = 40,96 \text{ mm}^2$
 $44,55 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kg/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 160 V

Capacitância do circuito de carga: 3 a 2.083 nF

Fig. 61 - Sobre corte lateral e rugosidade superficial da peça usinada em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO

Polaridade do eletrodo-ferramenta: positiva

Condições de ensaio: $A_f = 31,55 \text{ mm}^2$

$36,00 \text{ mm}^2$

$44,55 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kg/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 105 V

Capacitância do circuito de carga: 110 nF

Fig. 62 - Relação de desgaste e velocidade de remoção de material em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO

Polaridade do eletrodo-ferramenta: positiva

Condições de ensaio: $A_f = 31,55 \text{ mm}^2$

$36,00 \text{ mm}^2$

$44,55 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kg/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 105 V

Capacitância do circuito de carga: $C = 110 \text{ nF}$

Fig. 63 - Sobrecorte lateral e rugosidade superficial da peça usinada em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO

Polaridade do eletrodo-ferramenta: positiva

Condições de ensaio: $A_f = 31,55 \text{ mm}^2$

$36,00 \text{ mm}^2$

$44,55 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kg/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 105 V

Capacitância do circuito de carga: $C = 286 \text{ nF}$

Fig. 64 - Relação de desgaste e velocidade de remoção de material em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO

Polaridade do eletrodo-ferramenta: positiva

Condições de ensaio: $A_f = 31,55 \text{ mm}^2$

$36,00 \text{ mm}^2$

$44,55 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kg/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 105 V

Capacitância do circuito de carga: $C = 286 \text{ nF}$

Fig. 65 - Sobrecorte lateral e rugosidade superficial da peça usinada em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO

Polaridade do eletrodo-ferramenta: positivo

Condições de ensaio: $A_f = 36,51 \text{ mm}^2$

$40,96 \text{ mm}^2$

$44,55 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kg/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 110 V

Capacitância do circuito de carga: $C = 1086 \text{ nF}$

Fig. 66 - Relação de desgaste e velocidade de remoção de material em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO

Polaridade do eletrodo-ferramenta: positiva

Condições de ensaio: $A_f = 36,51 \text{ mm}^2$

$40,96 \text{ mm}^2$

$44,55 \text{ mm}^2$

dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kg/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 110 V

Capacitância do circuito de carga: 1.086 nF

Fig. 67 -- Sobrecorte lateral e rugosidade superficial da peça usinada em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO

Polaridade do eletrodo-ferramenta: positiva

Condições de ensaio: $A_f = 36,51 \text{ mm}^2$

$40,96 \text{ mm}^2$

$44,55 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kgf/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 110 V

Capacitância do circuito de carga: $1,5 \text{ }\mu\text{F}$

Fig. 68 -- Relação de desgaste e velocidade de remoção de material em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO

Polaridade do eletrodo-ferramenta: positiva

Condições de ensaio: $A_f = 36,51 \text{ mm}^2$
 $40,96 \text{ mm}^2$
 $44,55 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kg/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 110 V

Capacitância do circuito de carga: $1,5 \text{ }\mu\text{F}$

Fig. 69 - Sobrecorte lateral e rugosidade superficial da peça usinada em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO

Polaridade do Eléttrodo-ferramenta: positiva

Condições de ensaio: $A_f = 44,55 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kg/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 120 V

Capacitância do circuito de carga: $1,5 \text{ } \mu\text{F}$

Fig. 70 - Relação de desgaste e velocidade de remoção de material em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO

Polaridade do eletrodo-ferramenta: positiva

Condições de ensaio: $A_f = 44,55 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kg/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 120 V

Capacitância do circuito de carga: $1,5 \text{ }\mu\text{F}$

Fig. 71 - Sobrecorte lateral e rugosidade superficial da peça usinada em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO

Polaridade do eletrodo-ferramenta: positiva

Condições de ensaio: $A_f = 44,55 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kg/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 110 V

Capacitância do circuito de carga: $4,5 \text{ }\mu\text{F}$

Fig. 72 - Relação de desgaste e velocidade de remoção de material em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO

Polaridade do eletrodo-ferramenta: positiva

Condições de ensaio: $A_f = 44,55 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kg/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 110 V

Capacitância do circuito de carga: $4,5 \text{ }\mu\text{F}$

Fig. 73 - Sobrecorte lateral e rugosidade superficial da peça usinada em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO.

Polaridade do eletrodo-ferramenta: positiva

Condições de ensaio: $A_f = 40,96 \text{ mm}^2$
 $44,55 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kg/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 125 V

Capacitância do circuito de carga: $4,5 \text{ }\mu\text{F}$

Fig. 74 - Relação de desgaste e velocidade de remoção de material em função da corrente de descarga

Regime de usinagem: ACABAMENTO

Polaridade do eletrodo-ferramenta: positiva

Condições de ensaio: $A_f = 40,96 \text{ mm}^2$
 $44,55 \text{ mm}^2$

Dielétrico: querosene

Injeção ou sucção: $2,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($0,25 \text{ Kgf/cm}^2$)

Tensão de ajuste: 125 V

Capacitância do circuito de carga: $4,5 \text{ }\mu\text{F}$

Fig. 75 - Sobre corte lateral e rugosidade superficial da peça usinada em função da corrente de descarga

Constatou-se, durante a experimentação, que os e feitos de dispersão da energia da descarga são maiores para usinagens profundas e com sistema de lavagem deficiente. Nesses casos, as partículas removidas não são expulsas como deveriam da zona de usinagem, seja frontal, seja lateral. Ora, isso ocorre também na irrigação de um solo: à medida que a profundidade da camada a ser irrigada aumenta, aumenta a dispersão da água fornecida ao sistema, aumentando igualmente as perdas do processo.

O tempo de duração e o próprio processo da descarga são condicionados em grande parte à capacitância, à resistência e à indutância própria do circuito de descarga, nos circuitos de relaxação, como o que foi utilizado. O aumento do tempo de duração da descarga, através do aumento dessas grandezas, acarreta na majoração das perdas térmicas da energia, constatadas, nos ensaios efetuados, pela monitoração da temperatura do banho dielétrico de lavagem da peça, bem como pelo aquecimento sensível dos eletrodos, detectado por contato manual após cada ensaio. Isso ocasiona, obviamente, a queda do rendimento do processo, espelhada de forma soberba nos ensaios de desbaste (Figuras 56 e 57).

As linhas tracejadas de cada figura representam o comportamento esperado de cada uma dessas curvas sob condições adequadas de usinagem, tais como área frontal ótima do eletrodo-ferramenta, condições de lavagem, nível de contaminação do líquido dielétrico, tamanho dos grãos dos eletrodos etc. Foram extrapoladas de acordo com o comportamento obtido para essas curvas pelos diversos pesquisadores da área e publicados em diversos artigos, listados nas referências bibliográficas deste trabalho.

A relação de desgaste obtida foi maior que a esperada, de uma maneira geral. Apenas os ensaios com polaridade invertida dos eletrodos (Figuras 62 a 75) apresentaram os níveis desejados de relação de desgaste. Isso se deveu,

em parte, à baixa contaminação do dielétrico, já que nos ensaios de desbaste não se empregou a unidade de filtração; além disso, o sistema de lavagem utilizado mostrou-se ser deficiente e, na tentativa de melhorá-lo, aumentou-se a pressão de lavagem ($2,5 \times 10^4$ Pa) o que também contribuiu para a majoração do desgaste do elétrodo-ferramenta. Manteve-se constante essa pressão de lavagem para que a comparação global entre os ensaios pudesse ser embasada em condições semelhantes.

O comportamento das curvas de relação de desgaste versus corrente de descarga apresentou uma mesma característica em todos os regimes de usinagem usados: concavidade voltada para cima.

Nos ensaios de desbaste, a relação de desgaste foi decrescendo com o aumento da corrente de descarga; isso se deve à alta contaminação do dielétrico e ao pequeno "gap" de serviço, expondo com maior intensidade o elétrodo-ferramenta aos efeitos térmicos das descargas elétricas.

Nos ensaios de acabamento com polaridade normal, ou seja, com a ferramenta sendo o cátodo do circuito (Figura 60) há uma súbita majoração no desgaste da ferramenta correspondendo a uma violenta variação na capacitância do circuito de carga, que "salta" de 163 nF para 2.083 nF, um aumento da quase treze vezes.

Invertendo-se a polaridade do circuito, nos ensaios de acabamento, constata-se uma inversão de comportamento do desgaste da ferramenta, que associa baixas correntes de descarga a baixas relações de desgaste. Isto se deve ao fato de que, sob essa polaridade, algumas partículas erodidas da peça usinada soldam-se à superfície da ferramenta; à medida que se aumenta a energia de descarga, a massa e, conseqüentemente, a inércia dessas partículas, é maior e o "efeito ímã" é afetado.

Isso também explica a inversão de comportamento do sobrecorte lateral que, com polaridade invertida do circuito, apresenta uma concavidade voltada para cima. As par

tículas removidas da peça e "varridas" pela circulação do fluido dielétrico, ainda que no sistema de lavagem por sucção, aumentam paulatinamente de tamanho com o aumento da energia da descarga e ampliam, cada vez mais acentuadamente, o sobrecorte lateral, para possibilitar o seu livre trânsito.

As curvas de rugosidade superficial da peça usada versus corrente de descarga apresentam um comportamento independente da polaridade do circuito, mas altamente influenciadas pela energia da descarga até um determinado limite, após o qual a rugosidade superficial passa a ser constante.

A umidade relativa do ar não exerceu qualquer influência perceptível no desempenho do processo, apesar de que ela altera as características dielétricas do fluido de serviço. Durante os ensaios, variou desde 50 até 80%.

A temperatura ambiente interage diretamente com a temperatura do banho dielétrico. A máxima variação detectada entre ambas foi de $4,0^{\circ}\text{C}$. Convém salientar que a monitoração da temperatura do banho dielétrico foi executada junto ao termodetector do fluido do reservatório de serviço. Enquanto a temperatura ambiente variou de 18 a 28°C , durante a realização da experimentação, a temperatura do banho dielétrico flutuou em uma faixa de 20 a 30°C .

A temperatura altera a viscosidade do fluido dielétrico; um aumento naquela provoca uma diminuição nesta, melhorando a lavagem da zona de usinagem.

A tensão de ajuste influiu significativamente nas condições de usinagem. Esse efeito foi observado nos ensaios de números 43 a 50 e 51 a 58. Diminuindo a tensão de ajuste, nos circuitos de relaxação, majora-se a frequência de descargas, melhora-se o acabamento superficial, diminui-se o sobrecorte lateral e o desgaste do eletrodo-feramenta, mas em detrimento da velocidade de remoção de material. A recíproca é verdadeira.

O avanço do cabeçote, no tempo, mostrou ter um comportamento idêntico àquele da velocidade de remoção de material versus a corrente de descarga.

Observou-se qualitativamente que os números de Reynolds, relativos à circulação do fluido no reservatório de serviço e na zona de usinagem, influem ponderavelmente na estabilidade do processo e, conseqüentemente, na precisão dimensional, acabamento superficial e tempo de fabricação da peça usinada.

A lavagem por injeção lateral, usada nos ensaios, mostrou ser mais indicada que a lavagem por sucção, desde que o desgaste do eletrodo-ferramenta, a conicidade e o acabamento superficial da peça usinada, não sejam tão importantes. Ela permite a obtenção de maiores velocidades de remoção de material, é mais facilmente utilizada e se aplica a qualquer emprego do processo. Com a inversão da polaridade, a conicidade máxima verificada, utilizando-se lavagem por injeção lateral, foi de 1° em cada lado da cavidade executada, enquanto a máxima relação de desgaste foi de 10%, como se observa nos gráficos e tabelas dos resultados obtidos.

Ao se cortar transversalmente uma barra constituída de um tipo especial de aço inoxidável em desenvolvimento na EESC-USP, de baixa usinabilidade mecânica, com uma barra de aço-carbono de espessura 0,8 mm, mono-engastada no suporte de fixação da ferramenta, observou-se a presença de forças significativas no processo, como pode ser deduzido da análise da Figura 76.

Verificou-se que os efeitos da vibração excessiva do porta-eletrodo podem ser altamente danosos à peça usinada, quando a ferramenta tem baixa rigidez, como o eletrodo da direita, da Figura 76; à esquerda, apresenta-se um eletrodo com maior rigidez, com o qual se obteve uma usinagem sem maiores problemas, mas com o triplo do tempo de usinagem que seria obtido com o eletrodo anterior, para o regime selecionado (acabamento, polaridade normal).

Fig. 76 - Peça de aço inoxidável cortada com elétrodo de aço-carbono

Apesar de não haver forças de corte significativas devido à usinagem por eletroerosão propriamente dita, a ferramenta vibra, devido principalmente à vibração do cabeçote da máquina, hidraulicamente acionado. A Figura 77 mostra o instante em que o elétrodo-ferramenta, já deformado, entra em contato com o fluido dielétrico no reservatório de serviço.

Aqui, o cabeçote porta-elétrodo está "parado", para que se evidenciem as franjas, no fluido dielétrico, oriundas da vibração do cabeçote porta-ferramenta. Em operações de desbaste, com "gaps" elevados, não há efeitos significativos sobre o processo; em operações de acabamento, entretanto, com "gaps" reduzidos, há tendência à formação de curtos-circuito entre os elétrodo e, consequentemente, instabilidade na usinagem, prejudicando assim a acuracidade do processo.

Fig. 77 - Frangas, no fluido dielétrico, provenientes da vibração excessiva do cabeçote eletroerosivo

7. CONCLUSÕES. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1. Conclusões

Apresentaram-se os parâmetros tecnológicos que influem mais significativamente no processo de usinagem por eletroerosão. A análise dos resultados experimentais mostra que a energia da descarga influi decisivamente nos parâmetros de saída da UEE. O tempo de fabricação, o acabamento superficial e a conicidade da peça usinada, o desgaste do eletrodo-ferramenta e a espessura da camada superficial da peça usinada afetada pelo calor, são funções dessa energia.

O parâmetro mais importante do processo é, indiscutivelmente, a energia da descarga. Nos circuitos de relaxação, ela depende da capacitância do circuito de carga e da tensão no capacitor. O valor da tensão no capacitor depende da tensão de ajuste e do espaço compreendido entre os eletrodos. A diminuição do "gap" provoca uma queda na tensão do capacitor e o aumento da frequência de descargas. A resistência do circuito de carga limita o valor da

corrente de descarga e seleciona o regime de usinagem pretendido.

A área frontal do elétrodo-ferramenta é outro parâmetro básico a ser considerado na seleção das condições ótimas de usinagem. Altos níveis de energia da descarga, quando aplicadas a áreas pequenas, provocam uma acentuada instabilidade de usinagem, caracterizada pela elevação da temperatura do banho dielétrico, geração de ruído e aumento da frequência de contatos físicos entre os elétrodos.

Os parâmetros hidrodinâmicos do fluido dielétrico no reservatório de serviço e na zona de usinagem, a geometria, as propriedades físicas e metalúrgicas dos elétrodos e a contaminação do fluido dielétrico, são outros fatores a serem considerados na UEE.

Os efeitos da vibração excessiva do cabeçote porta-ferramenta evidenciaram-se durante a usinagem de aço inoxidável com elétrodo de aço-carbono, mostrando haver o desenvolvimento de forças significativas durante a usinagem, provenientes de contatos metálicos entre os elétrodos, devido às falhas operacionais do servo-sistema de comando do avanço do cabeçote eletroerosivo.

7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Ante a necessidade de se desenvolverem novas pesquisas na área de usinagem por eletroerosão, imprescindíveis à seleção dos parâmetros tecnológicos ótimos do processo, para uma dada aplicação, listam-se alguns experimentos que podem ser efetuados:

- a) Estudo da influência dos parâmetros tecnológicos sobre o desempenho do processo através do agrupamento das variáveis em parâmetros dimensionais e esboço dos gráficos relacionando tais parâmetros, obtidos em ensaios.

- b) Estudo das características dinâmicas do servo-sistema de comando do avanço do cabeçote porta-ferramenta.
- c) Análise dinâmica da estrutura da máquina-ferramenta eletroerosiva, sob condições operacionais.
- d) Projeto e construção de unidades de filtragem e resfriamento do dielétrico, que permitam o controle da contaminação e temperatura do banho dielétrico, comparando os seus desempenhos em serviço.
- e) Utilização de água desionizada como fluido de serviço e comparação com os resultados obtidos empregando-se o querosene.
- f) Projeto e desenvolvimento de novas ligas que assegurem boas características térmicas, elétricas e de custo do eletrodo-ferramenta e lhe possibilitem uma fabricação exequível para qualquer geometria da cavidade a ser executada.

8. BIBLIOGRAFIA

8.1. Referências Bibliográficas

1. FERRARESI, D. - Fundamentos da usinagem dos metais.
São Paulo, Edgard Blücher, 1970. v.1, p.25.
2. MICHELETTI, G. F. - Máquinas ferramentas para usinagem na produção. São Carlos, EESC-USP, 1979. v. 2, paginação irregular.
3. SPRINGBORN, R. K., ed. - Non-traditional machining processes. Dearborn, American Society of tool and manufacturing engineers, 1967. 178 p.
4. SVEDBERG, T. - Arkiv foer kemi. Mineralogi och Geologi, 2 (paper 40), 1906.
5. KOHLSCHÜTTER, V. - Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie, 25, 1919. p. 309.

6. LEWINSON, J. M. et alii - Production of cavities and holes in metals by the electro spark process.
Berlin, VEB Verlag Technik, 1954.
7. TAREEV, B. - Physics of dielectric materials.
Moscow, MIR, 1979. p. 57-59.
8. HUNTRESS, E. A., ed. - Electrical-discharge machining.
American Machinist, p. 86, Aug. 1978.
9. SEMON, G. - Guide pratique d'usinage par étincelage.
Suisse, Ateliers des Charmilles, 1974.
10. BELLOWS, G. - Thermal non-traditional machining.
Cincinnati, Non-traditional machining guide, 1976.
11. MEDEIROS, J. T. N. & SANTOS, J. M. C. - Usinagem por eletroerosão. São Carlos, EESC-USP, 1979. p.36-42. Não publicado.
12. RODRIGUES, A. C. S. et alii - Usinagem dos metais por descargas elétricas. Campinas, UNICAMP, 1974.
p. 47-48. Não publicado.
13. VAN DIJCK, F. - Physico-mathematical analysis of EDM process. Thesis, Louvain, 1973.
14. VAN DIJCK, F. & SNOEYS - Plasma channel diameter growth effects stock removal in EDM. Annals of the CIRP, 21, 1972, p. 39-40.
15. MARTY, C. C. - Investigation of surface temperature in electro-discharge machining. Transactions of the ASME, Aug. 1977, p. 682-684.

16. LASCOE, O. D. - Electro-discharge machining. Purdue research sponsored by the IBM Corp., Endicott, New York. Purdue University, Lafayette, Indiana, USA, 1962.
17. VAJTA, L. et alii - Study of the decomposition of kerosene used as a dielectric medium in spark machining. Periodica Polytechnica, Budapest, 11, 1967, p. 3-4.
18. HOCKENBERRY, T. O. - The role of the dielectric fluid in electrical discharge machining. I. Society of Automobile Engineering. (Paper 680635), 7-11, Oct. 1968.
19. DE BRUYN, H. E. - Some aspects of the influence of gap flushing on the accuracy in finishing by spark erosion. Annals of CIRP, 18, p. 147-151.
20. KARAFUJI, H. & SUDA, K. - Study on electrical discharge machining. I. Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo, 27 (1): p. 1-18, 1965.
21. CROOKALL, J. R. & HEUVELMAN, C. J. - Electro-discharge machining - the state of the art. Annals of CIRP, 20 (2): p. 113-120, 1971.
22. PORTO, O. L. & CUPINI, N. L. - Efeito do tamanho do grão na rugosidade do alumínio em eletroerosão. Máquinas & Ferramentas, 1 (14): p. 102-105, 1980.
23. MANUAL de instrucciones da máquina eletroerosiva tipo Erosimat D-01/A - HITEKA. Budapest.

8.2. Bibliografia Consultada

1. DANILEVSKY, V. - Manufacturing engineering. Moscow, MIR, 1973. 550 p.
2. DATSKO, J. - Material properties and manufacturing process. New York, John Wiley & Sons, 1967, 543 p.
3. FRÖHLICH, H. - Theory of dielectrics. London, Oxford University Press, 1968. 192 p.
4. MARTY, C. - Usinages par procédés non conventionnels. Paris, Masson Editeurs, 1971, 336 p.
5. SME - Thermal machining processes. Michigan, Society of Manufacturing Engineers, 1979. 252 p.
6. SME - Tool and manufacturing engineers handbook. Michigan, 1975, Mc Graw-Hill. Paginação irregular.

A P Ê N D I C E A

GLOSSÁRIO DE TERMOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE UEE

ACABAMENTO (finishing)

Regime utilizado em UEE que confere à peça uma rugosidade superficial inferior ou igual a $1,6 \mu\text{m}$ (VDI 24).

ACABAMENTO SUPERFICIAL (surface finish)

Medida da rugosidade superficial de um componente após um tratamento final, referida ao perfil da superfície.

ACURACIDADE DO PROCESSO (process accuracy)

Medida estatística do grau com que um fenômeno observado em um processo difere da especificação exigida.

ÁGUA DESIONIZADA (desionized water)

Água tratada para um estado não condutor, pelo processo de desionização.

AJUSTE DE FLUXO (centerflow adjustment)

Adequação da pressão e vazão do fluido de trabalho, feita por meio de uma válvula manual.

ÂNODO (anode)

Elemento coletor de elétrons. É um eletrodo com zona de polaridade positiva.

ARCO - V. ARCO ELÉTRICO

ARCO ELÉTRICO

Fluxo contínuo de corrente elétrica entre dois elétrodos. Na ocorrência de um arco em um proceso de UEE, haverá desgaste no elétrodo e erosão irregular na peça.

CABEÇOTE (ram)

Membro móvel de u'a máquina de EE, no qual se a-
lojam o elétrodo e o fixador do elétrodo. O seu
movimento pode ser servo-comandado por um motor
elétrico, um regulador eletrohidráulico ou um
sistema de controle adaptativo.

CAMADA RESSOLIDIFICADA (resolidified layer)

Camada de material fundido e ressolidificado, de
positada na superfície da peça usinada.

CARBONIZAÇÃO (carbonization)

Conversão em carbono ou em fuligem de uma subs-
tância carbônica.

CÂTODO (cathode)

Elemento emissor de elétrons.

CENTELHA (spark)

Descarga elétrica de curta duração, devido à ru-
tura súbita e espontânea do ar ou de algum outro
material dielétrico que separa dois terminais. É
acompanhada de uma emissão momentânea de luz.

CICLO DE SERVIÇO (duty cycle)

É uma sequência completa do fenômeno de descar-
ga, que engloba os tempos de ionização, do "gap",
descarga propriamente dita, expulsão das partícul

las erodidas da zona de usinagem e desionização do dielétrico.

CIRCUITO DE CARGA (charge circuit)

Circuito armazenador da energia de descarga. Pode ser do tipo de relaxação, valvulado, transistorizado ou integrados digitais.

CIRCUITO DE DESCARGA (discharge circuit)

Circuito que libera a energia armazenada pelo circuito de carga. É caracterizado pelos elétrodos, sua impedância e capacitância do "gap".

CIRCUITO GAGO (stutter circuit)

É um tipo de circuito que interrompe a corrente de saída quando ocorre um curto-circuito no "gap" e, em seguida, gera pequenos pulsos de corrente para "verificar" se o curto-circuito cessou.

COLÓIDE (colloid)

Sistema no qual uma fase é composta de partículas sólidas com dimensões entre 10^{-3} a $1\ \mu\text{m}$, e que está disperso em uma fase diferente.

COMPENSAÇÃO DO PESO DO ELÉTRODO (electrode weight compensation)

Regulagem no parâmetro de ganho do sistema de controle do movimento do cabeçote de u'a máquina de eletroerosão, para assegurar a sua estabilidade durante o processo, devido às diferentes dimensões dos elétrodos.

CONTAMINAÇÃO DO FLUIDO DIELÉTRICO (dielectric fluid
contamination)

Processo de introdução no dielétrico de quaisquer partículas sólidas, oriundas da poluição ambiental, da eletroerosão etc., e partículas líquidas provenientes da umidade do ar, substâncias decorrentes da decomposição do dielétrico etc.

CRATERA (crater)

Pequena cavidade deixada em uma superfície de uma peça eletroerodida por uma descarga.

"CRESCIMENTO" DO ELÉTRODO (electrode "growth")

Efeito de eletrodeposição que ocorre sob certas condições de eletroerosão, fazendo com que o material da peça se deposite no elétrodo, aumentando as suas dimensões sem controle.

CURTO-CIRCUITO (short-circuit)

Contato físico entre os elétrodos, de efeitos danosos à usinagem eletroerosiva.

DESBASTE (rough cut)

Regime utilizado em UEE, que confere à peça uma rugosidade superficial igual ou maior que 5,0 μm (VDI 34).

DESCARGA ELÉTRICA (electric discharge)

Passagem de eletricidade por um dielétrico, em geral acompanhada de uma centelha ou arco.

DESCARGA ANORMAL (anomalous discharge)

Descarga com baixas características eletroerosivas que ocorre antes de concluída a formação dos "streamers"; a energia dessa descarga é absorvida quase totalmente pelo fluido de serviço.

DESGASTE DO ELÉTRODO (electrode wear)

Quantidade de material removido do elétrico-ferramenta.

DESGASTE VOLUMÉTRICO (volumetric wear)

Desgaste total do elétrico, expresso em unidades de volume.

DESIONIZAÇÃO DO FLUIDO (fluid deionization)

Retorno ao estado dielétrico de um fluido ionizado, após terem sido removidas todas as fontes de ionização, envolvendo difusão de íons às paredes do reservatório e a recombinação de volume de íons positivos e negativos.

DIELETRICO (dielectric)

Um material elétrico isolante, ou um material no qual se pode manter um campo elétrico com um mínimo de perdas de energia.

ELÉTRODO (electrode) ou ELÉTRODO-FERRAMENTA(tool-electrode)

É a ferramenta eletroerosiva. Ela deve ser feita de um material bom condutor de eletricidade. Sua geometria é comumente uma imagem negativa da forma desejada na peça acabada, com as suas dimensões ajustadas para levar em conta o sobrecorte para o regime utilizado.

ELÉTRODO ESCALONADO (stepped electrode)

É um elétrico que possui um estágio com dimensões reduzidas para desbaste e um ou mais estágios de acabamento, com dimensões progressivamente maiores para a usinagem de furos passantes.

ELETRODO MÚLTIPLO (split electrode)

São dois ou mais eletrodos em u'a máquina, isola dos entre si. Cabos separados, ligados a cada eléctrodo, são provenientes de canais de saída do gerador e simultaneamente são feitas descargas de cada elemento pela sua ligação com o canal correspondente.

EROSÃO (erosion)

Em UEE, é a remoção de metal dos eléctrodos.

ESTABILIDADE DE USINAGEM (machining stability)

Estado de desenvolvimento da usinagem. Diz-se que a estabilidade de usinagem é boa se a progressão da usinagem é regular e isenta de curtos-circuitos e de descargas anormais.

FERRAMENTA (tool)

Ver eléctrodo.

FLUIDO DIELECTRICO (dielectric fluid)

Em um processo de UEE, é, em geral, um hidrocarb^oneto de baixa viscosidade (querosene) ou água desionizada, onde se encontram imersos os eléctrodos. O fluido dielétrico de serviço preenche o "gap" entre o eléctrodo e a peça, agindo como isolante elétrico até que seja atingido um valor específico de tensão no "gap". Quando tal ocorre, ele se ioniza, tornando-se um condutor elétrico, permitindo um fluxo de corrente pelo caminho ionizado, até a peça. Ele serve também para refrigerar a zona de trabalho e para expulsar as partículas geradas pela erosão da zona de trabalho.

FREQUÊNCIA DE DESCARGAS (discharge frequency)

Número de descargas por segundo, na zona eletrodo-peça.

FURO DE LAVAGEM (flushing hole)

Furo executado na peça ou no eletrodo, que serve para introduzir o dielétrico no "gap", para fins de lavagem.

"GAP" (gap)

Distância entre o eletrodo e a peça, durante a usinagem.

GERADOR (power supply)

Dispositivo de um sistema de UEE que fornece a energia que produz a descarga elétrica entre o eletrodo e a peça.

GERADOR DUAL (dual power supply)

Geradores duplos, alojados em um só gabinete, que podem operar com duas máquinas de UEE, simultaneamente.

"HUNTING" (hunting)

Movimento alternado do cabeçote de u'a máquina de eletroerosão, durante o corte. Ele pode ocorrer devido às condições inadequadas de lavagem do "gap", sensibilidade extremamente elevada do servo-sistema, deposição de resíduos carbônicos no fundo de uma cavidade eletroerosiva etc.

INSTABILIDADE DA USINAGEM (machining instability)

Estado que altera o desenvolvimento normal e preferido da usinagem. Pode ser caracterizado por curtos-circuitos e/ou descargas anormais.

INTENSIDADE DE DESCARGA (discharge strenght)

Quantidade de energia da descarga.

LAVAGEM (flushing) (flow)

Processo de passagem do dielétrico pelo "gap", para remover as partículas produzidas pela UEE.

LAVAGEM CENTRAL (center flow flushing)

Método de fazer jorrar dielétrico por um furo central feito no elétrodo.

LAVAGEM INVERTIDA (reverse flow flushing)

Sistema de lavagem por injeção pelo copo metálico de lavagem sob a peça usinada.

LAVAGEM LATERAL (lateral flow flushing)

O mesmo que lavagem superficial.

LAVAGEM POR EXSUDAÇÃO (swarf flow flushing)

Sistema de lavagem que consiste em injetar o dielétrico sob pressão no interior de um elétrodo feito de material poroso. O fluido dielétrico atravessa os poros e executa a lavagem com eficiência.

LAVAGEM POR INJEÇÃO (injection flushing)

Método de lavagem que utiliza a circulação forçada de dielétrico sob pressão, pelo "gap".

LAVAGEM POR ASPIRAÇÃO OU SUCÇÃO (vacuum flushing)

Método de lavagem que utiliza uma pressão vacuométrica de sucção para aspirar o dielétrico contaminado do "gap", para um copo metálico posto sob a peça usinada e, daí, para o tanque de serviço.

LAVAGEM PULSANTE (pulsed flushing)

Método de lavagem que sincroniza a injeção do fluido dielétrico com o levantamento periódico do cabeçote, assegurando uma eficiente limpeza na zona de usinagem.

LAVAGEM SUPERFICIAL (surface flushing)

Método que utiliza bicos ou mangueiras para direcionar jatos de dielétrico na área de corte, para afastar os resíduos. Em geral é utilizado com o sistema de levantamento periódico do cabeçote.

LIMITADOR DE CURSO (limit switch)

É um dispositivo, regulável através de um micrômetro, que serve para monitorar a profundidade de usinagem em um ponto pré-determinado, atingindo o qual o cabeçote é desenergizado automaticamente.

MESA DE COORDENADAS (coordinates table)

Mesa de u'a máquina-ferramenta que é utilizada para o posicionamento preciso das peças com referência à ferramenta e à zona de usinagem, definindo a localização geométrica da peça em um sistema de coordenadas cartesianas.

MOTOR DE PASSO (stepping motor)

Um motor que gira em movimentos angulares essencialmente uniformes e curtos, ao contrário de girar continuamente. Os passos angulares são obtidos eletromagneticamente.

NÚCLEO (core)

Haste que permanece após uma usinagem com um eletrodo que possui um furo de lavagem. Também conhecida como alma, espiga etc.

PEÇA (workpiece)

Em usinagem de materiais, diz-se que é o material que sofre o processo, até a sua obtenção final.

PLASMA (plasma)

Gás fortemente ionizado que contém números iguais de íons e elétrons em densidade suficiente tal que o comprimento de blindagem de Debye é muito menor do que as dimensões do volume do gás.

POLUIÇÃO DO LÍQUIDO DIELÉTRICO (dielectric pollution)

Ver contaminação do dielétrico.

PONTO DE FULGOR (flash point)

Temperatura na qual os vapores de um líquido volátil, em mistura com ar, entram em ignição espontaneamente. É um fator decisivo na escolha do dielétrico para a UEE.

PRESSÃO DE RECALQUE DO DIELÉTRICO (supply dielectric pressure)

Pressão manométrica do fluido dielétrico bombeado do tanque de dielétrico para o reservatório de serviço.

PRÉ-USINAGEM (pre-machining)

Usinagem prévia da peça, para reduzir o volume de material a ser removido, por meio de processos convencionais de usinagem.

PULSADOR (pulsator) (woodpecker device)

Uma unidade acessória de u'a máquina UEE para fazer o eletrodo se resfriar periodicamente, em um certo intervalo de tempo e ajudar na lavagem de

uma cavidade profunda e/ou cega. Ele faz o elé-trodo mover-se como um pistão em uma câmara.

PULSO (pulse)

Descarga de uma quantidade de energia elétrica, com voltagem e amperagem pré-estabelecidas, e a-gindo em um intervalo de tempo, também pré-esta-belecido.

Ra (Ra)

Desvio médio aritmético. Média dos valores abso-lutos das ordenadas de perfil efetivo em relação à linha média em um comprimento de amostragem.

RELAÇÃO DE DESGASTE (wear ratio)

Percentagem em volume do elé-trodo gasto, compara-do com o volume retirado do material da peça, de-vido à UEE.

RESERVATÓRIO DE SERVIÇO (dielectric tank)

Recipiente superposto à mesa de coordenadas que encerra o fluido dielétrico de lavagem, onde os elé-trodos permanecem imersos durante a usinagem.

RIGIDEZ DIELÉTRICA (dielectric strength)

Em UEE, é o potencial necessário para quebrar(ionizar) o "gap" imerso em fluido, comumente ex-presso em quilovolts por metro.

RUGOSIDADE SUPERFICIAL (surface roughness)

Soma das diferenças geométricas provenientes de desvios de forma da ferramenta, do processo de formação do cavaco ou partícula e da modificação estrutural por ação química, resultantes de a-ções inerentes ao processo de usinagem.

SEMI-ACABAMENTO (semifinishing)

Regime utilizado em UEE, que confere à peça uma rugosidade superficial igual ou maior que $1,6 \mu\text{m}$ (VDI 24).

SERVO-AVANÇO DO ELÉTRODO (electrode servo feeding system)

Dispositivo que aciona e controla o movimento do cabeçote de u'a máquina de eletroerosão.

SOBRECORTE (overcut)

Uma cavidade eletroerodida é sempre maior do que o elétrodo utilizado para usiná-la. A diferença entre a dimensão do elétrodo e da cavidade usinada é denominada sobrecorte. O sobrecorte diâmetral, ou total, é duas vezes o valor do sobrecorte lateral.

SOBREMÉTAL PARA ACABAMENTO (allowance machining)

Diferença entre a dimensão do elétrodo de acabamento e a dimensão correspondente da cavidade ou orifício já usinado por meio do elétrodo de desbaste ou semi-acabamento.

SUPRESSOR DE ARCO (arc suppressor)

Circuito no gerador de u'a máquina de eletroerosão que reduz a possibilidade de abertura de arco.

TANQUE DO DIELÉTRICO (dielectric tank)

Recipiente responsável pela decantação, refrigeração, armazenamento e suprimento do fluido dielétrico ao reservatório de serviço.

TEMPO ATIVO (on time)

Tempo de duração de uma centelha eletroerosiva.

TEMPORIZADOR DO PULSO (pulse timer)

Dispositivo utilizado para ajustar a duração dos tempos ativo e passivo da centelha. Nas máquinas modernas, os tempos ativo e passivo podem ser ajustados individualmente.

TEMPO DE DESIONIZAÇÃO (deionization time)

Tempo necessário para que o fluido de serviço recupere as suas propriedades dielétricas.

TEMPO DE IONIZAÇÃO (ionization time)

Intervalo de tempo em que uma d.d.p. é aplicada ao "gap", antes que ocorra a descarga.

TEMPO DE RESPOSTA DO SERVO (servo response time)

Tempo transcorrido entre a excitação e a resposta a nível de regime, para um sistema de servo-comando.

TEMPO PASSIVO (off time)

Intervalo de tempo entre dois pulsos, determinado pelo multivibrador, também denominado tempo de pausa ou tempo aberto.

TENSÃO NO "GAP" (gap voltage)

Ver tensão em vazio no "gap" e tensão de serviço no "gap".

TENSÃO EM VAZIO NO "GAP" (open circuit voltage)

D.d.p. no "gap", antes que ocorra a centelha.

TENSÃO DE SERVIÇO NO "GAP" (closed circuit voltage)

D.d.p. no "gap" durante a descarga.

USINAGEM SEM DESGASTE (no wear machining)

Modo de operação no processo UEE, onde o desgaste do eletrodo é insignificante, devido à inversão de polaridade do circuito e manutenção da frequência de descargas em uma faixa ótima, de acordo com cada combinação de materiais dos eletrodos.

VELOCIDADE DE REMOÇÃO DE MATERIAL (material removal rate)

Volume de material removido da peça em um intervalo de tempo. É comumente expresso em milímetros cúbicos por minuto.

VELOCIDADE DE AVANÇO DO CABEÇOTE (feeding ram ratio)

Velocidade do movimento relativo entre ferramenta e peça, na direção principal de corte.

ZONA AFETADA PELO CALOR (heat affected zone)

Camada superficial na qual o processo eletroerosivo altera a estrutura do material usinado e as suas propriedades mecânicas devido aos efeitos térmicos da descarga.

A P Ê N D I C E B

DIMENSIONAMENTO DE ELÉTRODOS-FERRAMENTAS E ESTIMATIVA DO TEMPO DE USINAGEM POR ELETROEROSÃO

A minimização do tempo total de fabricação de um produto é uma necessidade que se torna mais acentuada a cada dia. Tempo de fabricação, afinal de contas, associa-se diretamente ao custo do produto.

Há outra exigência em paralelo que também preocupa a engenharia de fabricação: a qualidade da superfície usinada. A melhoria dessa qualidade acarreta a majoração do tempo de fabricação.

Portanto, existem condições de contorno para o problema, teoricamente bem definidas; na prática, inúmeros fatores interagem no delineamento de tais contornos, sejam de natureza técnica, econômica, político-social.

Na usinagem por eletroerosão, o problema se agrava pelas reconhecidamente baixas velocidades de remoção de material, quando comparadas àquelas dos processos convencionais de usinagem. Utilizando-se a velocidade máxima de remoção de material em UEE, a qualidade da superfície usinada é a pior possível, o desgaste do eletrodo-ferramenta é crítico, a conicidade é elevada, a imprecisão do processo aumenta etc.

As melhores qualidade superficial e precisão dimensional da peça usinada são obtidas mediante baixos níveis de energia de descarga e altas frequências de descargas, o que confere ao processo velocidades de remoção de material reduzidíssimas.

É conveniente, portanto, utilizar mais de um regime de usinagem na fabricação de uma peça por eletroerosão. Como, na maioria dos casos, cada regime está associa-

do a um eletrodo-ferramenta e, às vezes, a um dispositivo especial de fixação desse eletrodo, os custos adicionais decorrentes de ferramentas e dispositivos complementares é um fator limitante do número de regimes a serem usados.

Em geral, recomenda-se pelos menos dois regimes, sendo um de desbaste e outro de acabamento; sempre que possível, a peça a ser eletroerodida é pré-usinada por algum processo tradicional de usinagem.

O fluxograma apresentado na Figura 78 sintetiza o procedimento mais adequado à determinação dos parâmetros tecnológicos do processo eletroerosivo que possibilitem a obtenção de uma peça eletroerodida e que atende às especificações de projeto relativas ao acabamento superficial e à acuracidade dimensional.

Uma vez determinado o material da peça, seleciona-se o material que comporá o eletrodo-ferramenta para o regime a ser executado com base nos parâmetros tecnológicos e custo de fabricação desse eletrodo. A seguir, calcula-se a área da seção transversal do eletrodo-ferramenta; se a sua superfície frontal não for plana, ou estiver inclinada em relação ao plano da mesa de serviço, a área frontal desse eletrodo-ferramenta passa a ser o parâmetro de interesse.

A curva da Figura 49 associa a velocidade de remoção de material à área frontal ótima do eletrodo-ferramenta. A utilização dessa curva proporciona as melhores condições de usinabilidade com o mínimo dispêndio de energia e desgaste do eletrodo-ferramenta, adequando com maior propriedade o processo eletroerosivo à aplicação particular. Não convém, portanto, distanciar-se muito do valor indicado para a VRM.

Conhecido o valor indicado para a velocidade de remoção de material, selecionam-se o regime de usinagem e as condições de lavagem propícias à aplicação. Nesse ponto, é imperiosa uma análise comparativa de custos entre os

diversos processos que possibilitem a fabricação da peça requerida, como aquela apresentada na seção 4.4.

A determinação do sobre corte, conicidade e relação de desgaste para o regime de usinagem e condições de lavagem escolhidas é feita através de consulta às curvas e tabelas respectivas, como aquelas mostradas nas Figuras 56 a 75 e na Tabela 6.4, que são uma função do tipo de gerador elétrico e dos materiais utilizados como eletrodos.

Nesse ponto, depara-se com um outro problema de natureza técnico-econômica : trata-se de verificar a necessidade da programação de um ou mais regimes de usinagem, que proporcionem um tempo de fabricação relativamente curto e uma qualidade superficial enquadrada nos padrões requeridos pelo projeto.

Como regra geral, deve-se utilizar dois regimes de usinagem quando se desejar um produto com uma rugosidade superficial $R_a = 2,20 \mu m$, ou três regimes de usinagem, quando o projeto requerer uma rugosidade superficial $R_a \leq 1,26 \mu m$ e a área frontal do eletrodo for superior a 200 mm^2 .

Uma vez definido o número de passes ou regimes de usinagem, é necessário confrontar os custos relativos à compra ou fabricação dos eletrodos e/ou porta-eletrodos complementares com a economia resultante da redução do tempo total de usinagem devido à programação de um ou mais regimes intermediários.

No dimensionamento dos eletrodos de desbaste e semi-acabamento, deve-se levar em conta os desvios de forma e posição introduzidos com a troca dos porta-eletrodos e dos eletrodos, além dos desvios relativos à própria máquina eletroerosiva.

O procedimento adequado a ser seguido é simples:

- a) Com a área frontal do eletrodo calculada, consultar, na Figura 49, o valor mais adequado para a VRM;

Fig. 78 - Procedimento mais adequado à seleção das condições de usinagem e dimensionamento dos eletrodos em UEE

- b) Determinada a VRM, selecionar as condições de usinagem propícias à aplicação (tensão, amperagem, tipo e condições de lavagem etc.), através de consulta às Figuras 56 a 75, dali retirando os valores de RD, Ra e S_L ;
- c) Cada dimensão do eletrodo de desbaste deve ser igual à dimensão correspondente, na peça, do regime seguinte, menos $1,5 S_L$; cada dimensão do eletrodo de acabamento deve ser igual à dimensão final correspondente, na peça, menos o sobrecorte lateral de acabamento, para os ajustes selecionados;
- d) A consulta à Tabela 6.3 fornece o valor da conicidade da peça usinada. Determinada essa grandeza e a profundidade da cavidade a ser usinada, calcular o volume usinado e, dividindo-o pela VRM, obter o tempo de usinagem a través desse regime; se a lavagem escolhida for pulsante com elevação periódica do eletrodo-ferramenta, adicionar o tempo total gasto para executar a lavagem ao tempo de usinagem;
- e) Com a conicidade, RD e a profundidade da peça a ser usinada, verificar o comprimento mínimo do eletrodo-ferramenta para cada regime analisado e prognosticar a tolerância final da peça a ser usinada.

Dimensionados os eletrodos e selecionados os ajustes a serem efetuados, depara-se com uma última decisão: para a geometria da cavidade a ser usinada, é mais conveniente comprar ou fabricar os eletrodos-ferramentas? Trata-se de uma decisão muito particular, que depende da aplicação, das possibilidades e custos da ferramentaria a que está associada a máquina-ferramenta eletroerosiva e da política adotada pela empresa, nesse tocante.