



FABRICAÇÃO DE PRECISOS MICROFURROS COM PROCESSO DE USINAGEM COMBINADO: ECDM (ELETROEROSÃO COM REMOÇÃO ELETROQUÍMICA)

Autor: Alexandre de Souza,
AS INGPEED (Development in Engineering, <http://www.asingpeed.xpg.com.br/>)
Blumenau-SC, Brazil

Abstract:

A new manufacturing technology that combines in itself the main features of the processes “Electro Discharge Machining” (EDM) and “Electro Chemical Machining” (ECM) was named “Electro Chemical Discharge Machining”. This modern combined machining process (hybrid), non-conventional, is currently used successfully for the production of precise microholes in electrically conductive materials. With the technology ECDM an amount of material of the workpiece can be removed electrochemically and thermally with a high removal rate by the generation of rapid electrical discharges in electrolyte solution. This article explain in details the physical principle of material removal of the ECDM process, with a special focus on the use of this technology for the fabrication of microholes in stainless steels.

Keywords: EDM, ECM, ECDM, Electro Discharge Machining, Electro Chemical Machining.

1. ASPECTOS GERAIS DA TECNOLOGIA DE USINAGEM ECDM

A bem conhecida tecnologia de eletroerosão por faíscas (EDM – *Electro Discharge Machining*) e o processo de remoção eletroquímica (ECM – *Electro Chemical Machining*) são utilizados atualmente dentro da abrangente área metal-mecânica para a usinagem das mais variadas complexas formas geométricas em materiais que apresentam uma determinada condutividade elétrica, como por exemplo, aços inoxidáveis martensíticos e austeníticos, ligas de alumínio ou até mesmo alguns tipos de materiais cerâmicos que conduzem eletricidade. Algumas das atuais importantes aplicações de ambos os processos de fabricação encontram-se dentro da área de microusinagem para a produção de furos com diâmetros muito pequenos ou até mesmo para a fabricação de microcavidades de elevadíssima precisão geométrica. EDM e ECM são denominados dentro do campo da engenharia mecânica como processos “não-convencionais” de usinagem, isto é, durante o processo de remoção de material não há um contato mecânico local entre a ferramenta e peça que está sendo usinada. No processo EDM o material da peça é removido através de descargas elétricas com um conteúdo energético muito elevado, por meio de um meio dielétrico líquido,

enquanto que no processo ECM a remoção do material da peça ocorre por uma série de complexas reações eletroquímicas (mecanismos de eletrólise) que se desenvolvem dentro da denominada “célula eletrolítica”, a qual é composta da ferramenta, peça a ser usinada, solução eletrolítica (eletrólito) de condutividade elétrica controlada em mS/cm e uma fonte de tensão elétrica. O processo EDM é conhecido pela sua extrema capacidade de produzir formas geométricas com elevada precisão e repetibilidade, onde a tecnologia ECM permite produzir peças com elevadas taxas de remoção de material e ao mesmo tempo com rugosidades superficiais muito baixas [16]. Devido ao fato de não haver um contato entre a ferramenta e peça durante o processo de usinagem na aplicação das tecnologias EDM e ECM, elas podem ser utilizadas desta forma para usinar peças metálicas independentemente de suas características metalúrgicas de tratamento térmico, ou seja, o processo de usinagem pode ser realizado totalmente de modo independente das propriedades mecânicas da peça [13].

Atualmente, o contínuo aumento das exigências industriais em relação ao aspecto de redução dos custos de usinagem e ao mesmo tempo a necessidade de uma produção de peças com tolerâncias de fabricação em limites bem estreitos têm levado alguns renomados centros de pesquisa em engenharia a desenvolver novas

técnicas de fabricação que combinam em si dois processos de usinagem. Elas são denominadas tecnicamente também de processos de fabricação “combinados” ou “híbridos”. A combinação dos processos ECM e EDM, cujas principais características foram descritas anteriormente, forma a tecnologia “ECDM”, a qual recebe a denominação técnica em inglês de “*Electro Chemical Discharge Machining*”. O processo ECDM trata-se de uma nova e moderna tecnologia de usinagem combinada não-convencional que apresenta importantes características dos processos ECM e EDM, o qual se encontra atualmente em um avançado estágio de desenvolvimento. Dentro da abrangente subdivisão dos processos de fabricação da área metal-mecânica e metalúrgica o processo ECDM encontra-se dentro do subgrupo “remoção”, fazendo parte então do grupo principal “separação de material”. Peças com excelentes acabamentos superficiais, tolerâncias estreitas e com boas propriedades mecânicas podem ser obtidas com o processo ECDM [15].

O presente trabalho tem como objetivo principal descrever os principais aspectos tecnológicos do processo ECDM, onde serão explicados em detalhes o seu princípio físico de remoção de material e sua atual aplicação principal dentro do campo da engenharia, como por exemplo aqui, a usinagem de microfuros de diâmetros e comprimentos extremamente pequenos em materiais metálicos.

2. PRINCÍPIO FÍSICO DE REMOÇÃO DE MATERIAL DO PROCESSO ECDM

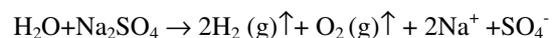
O princípio físico de remoção de material do processo ECDM consiste da geração de descargas elétricas a partir de uma solução eletrolítica (eletrólito). A **figura 1** mostra as várias fases do processo ECDM através de fotos que foram obtidas com câmera de alta velocidade (HSFC – *High Speed Framing Camera*) em diferentes intervalos de tempo (t_a , t_b , t_c , t_d), as quais servem então como base fundamental para a compreensão do princípio físico deste processo que será explicado na seqüência deste trabalho.

O processo ECDM consiste de duas fases principais que ocorrem em uma seqüência definida:

primeiramente a fase ECM do processo ECDM (fase eletroquímica do processo) seguida da fase EDM (fase eletroerosiva do processo ECDM). Na aplicação de uma tensão elétrica (normalmente entre 20 a 100 Volts) entre a ferramenta (eletrodo-ferramenta ou somente “cátodo”) e a peça (eletrodo-peça ou “ânodo”), onde entre os quais se encontra uma solução eletrolítica, ocorre a formação de um determinado volume de gás (junto à superfície da ferramenta, o qual se propaga em direção à peça. O volume de gás V que se forma no cátodo varia com o tempo (dV/dt) e pode ser determinado matematicamente pela **Equação 1**, onde $V=V[x(t), y(y), z(t)]$:

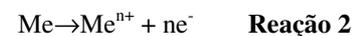
$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial V}{\partial z} \frac{dz}{dt} \quad \text{Equação 1}$$

O gás que se forma junto ao cátodo trata-se de hidrogênio ($H_2 \uparrow$) originado através de várias reações eletroquímicas dentro da solução eletrolítica após a aplicação de uma tensão elétrica u_{ECM} entre os eletrodos. Para uma solução eletrolítica de nitrato de sódio (Na_2SO_4), por exemplo, o gás hidrogênio é originado de acordo com a seguinte reação química (**reação 1**) [11]:



Reação 1

Podem ser observados ainda na **figura 1** que o volume do gás hidrogênio aumenta com o tempo até atingir a superfície da peça correspondentemente ao tempo t_c . O intervalo de tempo transcorrido entre t_a e t_c é chamado de tempo da fase ECM do processo ECDM (t_{ECM}), sendo que durante esta rápida fase do processo ocorre uma remoção eletroquímica do material da peça, a qual pode ser representada pela **reação 2** [13]:



No momento do contato do volume de gás com a superfície da peça ocorre a completa isolamento elétrica do espaço (fenda de trabalho) entre o eletrodo-ferramenta e a peça, ou seja, agora entre as superfícies frontais dos eletrodos formou-se um dielétrico gasoso com determinadas características dielétricas. Neste instante inicia-se então a fase EDM do processo ECDM, ou seja, entre os eletrodos ocorre agora uma remoção de material da peça através de uma descarga elétrica de elevada potência que se estabelece através de um canal

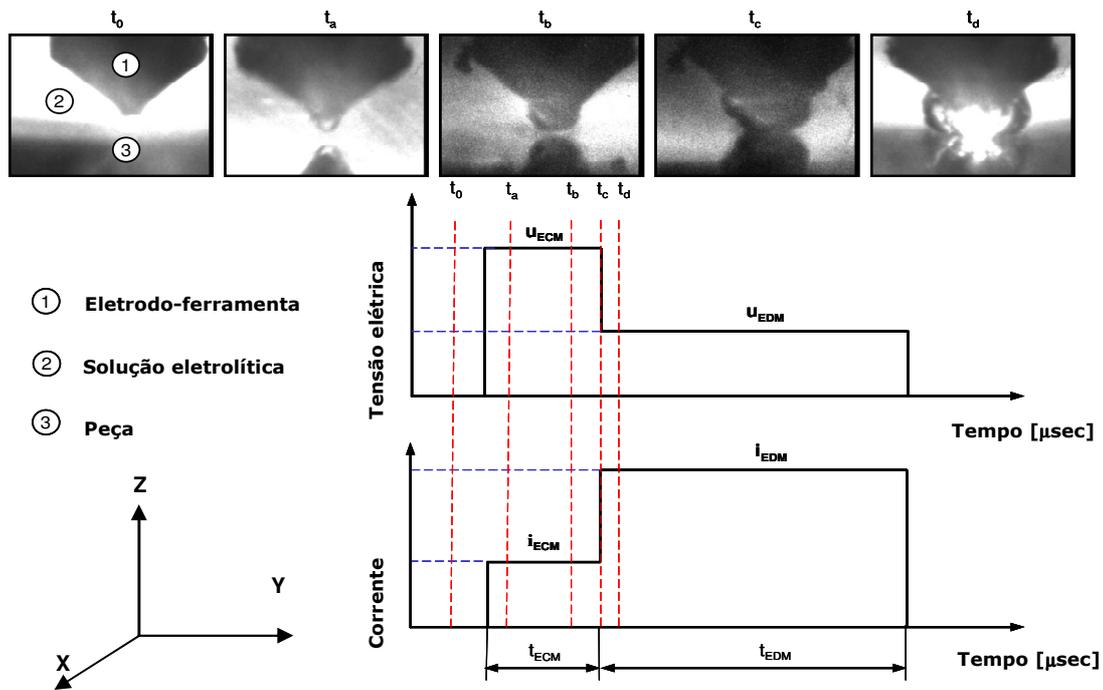


Figura 1: Fotos das fases do processo EDCM com *High Speed Framing Camera* em diferentes intervalos de tempo [14]

de plasma em forma aproximada de um “barril”, por meio de uma série de importantes fenômenos físicos que ocorrem dentro do dielétrico (ionização por impacto, emissão “fria” e “quente” de elétrons dos eletrodos) [2], [3], [5], [6]. A descarga elétrica possibilita então a microfusão tanto do material da ferramenta como do material da peça, onde na superfície deles pode ser visualizada uma pequena cratera (**figura 2**) em forma geométrica de uma “calota esférica” (“cratera de descarga”). As dimensões geométricas da cratera de descarga produzida (diâmetro e profundidade) dependem principalmente da intensidade de energia elétrica que flui entre o eletrodo-ferramenta e a peça no momento da descarga elétrica e também de algumas importantes propriedades físicas do material dos eletrodos, tais como, ponto de fusão e condutividade térmica. Durante o decorrer da descarga elétrica o volume do canal de plasma V_{PL} varia com o tempo dV_{PL}/dt e pode ser determinado matematicamente pela equação 2, onde $V_{PL} = V_{PL}[x(t), y(y), z(t)]$:

$$\frac{dV_{PL}}{dt} = \frac{\partial V_{PL}}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V_{PL}}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial V_{PL}}{\partial z} \frac{dz}{dt}$$

Equação 2

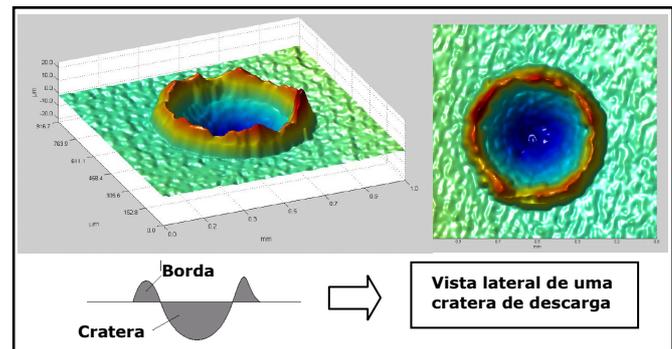


Figura 2: Cratera de descarga na superfície dos eletrodos formada na fase EDM do processo EDCM.

O decorrer das fases ECM e EDM do processo EDCM pode ser visualizado ainda através da representação gráfica de um pulso de tensão e corrente elétrica com o tempo, a qual é mostrada também em detalhes na **figura 1**. Resumidamente, gera-se durante a fase ECM do processo EDCM um determinado fluxo total de corrente elétrica i_{ECM} (corrente eletroquímica) em um específico intervalo de tempo t_{ECM} , em função de uma determinada tensão elétrica u_{ECM} . A tensão elétrica u_{EDM} da fase EDM atinge valores que dependem do tipo do material da ferramenta e da peça e que se situam entre 20 e 35 Volts. Geram-se aqui temperaturas de 10000 °C (~ 1 eV) entre os eletrodos como resultado das

fortes interações entre íons, elétrons e moléculas no interior do canal de plasma [1], [4], [7], [8], [10].

Conforme demonstrado anteriormente, o processo ECDM transcorre após a aplicação de uma tensão elétrica entre a ferramenta e a peça, isto é, forma-se aqui um pulso ECDM entre os eletrodos. De forma semelhante que o processo EDM é necessário também para a realização dos processos ECM e EDM a aplicação de um pulso de tensão elétrica entre uma ferramenta e uma peça, onde é produzido também desta forma uma determinada intensidade de corrente elétrica entre eles. A **figura 3** mostra uma comparação entre os tipos de pulsos de tensão que são gerados respectivamente nos processos ECM, EDM e ECDM. Trata-se aqui da forma geométrica de um único pulso de tensão e corrente elétrica formado entre o eletrodo-ferramenta e a peça nestes processos mencionados anteriormente, o qual se desenvolve em um intervalo de tempo de poucos microssegundos [13].

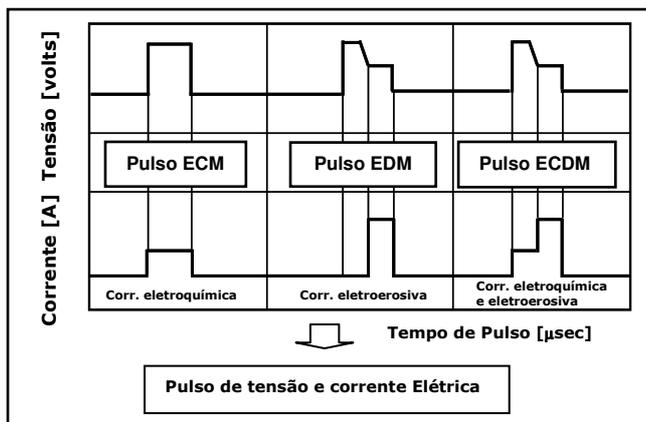


Figura 3: Comparação entre as formas dos pulsos de tensão e corrente elétrica dos processos ECM, EDM e ECDM

Podem ser verificados ainda na **figura 3** que a corrente elétrica gerada no processo ECDM atinge valores diferentes da corrente do processo EDM. Isto ocorre devido à presença da fase eletroquímica e eletroerosiva dentro de um pulso ECDM, ou seja, a corrente total (I_{ECDM}) que flui durante a aplicação de um pulso de tensão elétrica entre dois eletrodos no processo ECDM é a soma de dois tipos principais de correntes elétricas (i_{ECM} e i_{EDM}) e pode ser determinada matematicamente pela **equação 3**. O pulso de tensão e

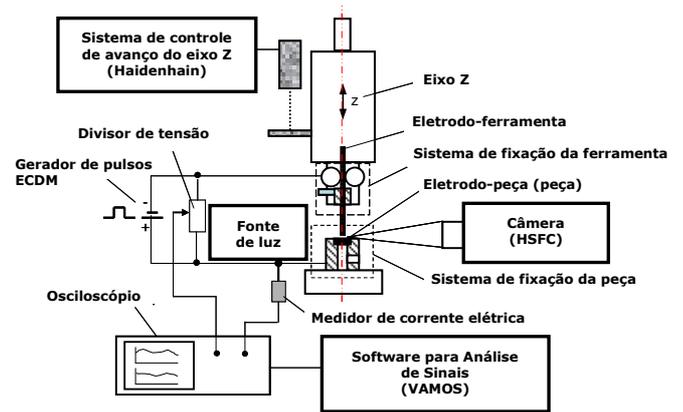


Figura 4: Bancada experimental para o estudo do fenômeno de descarga elétrica em eletrólito [15]

corrente elétrica do processo EDM apresenta apenas uma corrente eletroerosiva, sendo que o pulso elétrico do processo ECM consiste somente de uma corrente eletroquímica. A visualização destas três importantes formas de pulsos de tensão elétrica é fundamental para a correta compreensão do resultado de trabalho a ser atingido na usinagem de peças metálicas com os processos ECM, EDM e ECDM. Espera-se que com o processo ECDM possa ser obtida uma maior taxa de remoção de material do que com o processo EDM, pelo motivo da maior intensidade de corrente elétrica gerada com o processo ECDM comparativamente à tecnologia EDM.

$$I_{ECDM} = \int_0^{t_{ECM}} i_{ECM}(t) dt + \int_{t_{ECM}}^{t_{EDM}} i_{EDM}(t) dt$$

Equação 3

Fração eletroquímica de corrente

Fração eletroerosiva de corrente

A **figura 4** mostra uma bancada experimental desenvolvida pelo autor deste artigo para o estudo do fenômeno de descarga elétrica em solução eletrolítica. Ela consiste de várias partes mecânicas e eletrônicas e, através desta, foi possível analisar experimentalmente o processo ECDM com a utilização da câmera de alta velocidade por meio da exata focalização de seu feixe de luz em um pequeno espaço (fenda de trabalho) entre o eletrodo-ferramenta e a peça.

No eixo Z deste protótipo de máquina-ferramenta é fixado o eletrodo-ferramenta, cuja velocidade e posição podem ser ajustadas por um motor controlado por comando numérico acoplado diretamente

no eixo Z. A peça encontra-se posicionada devidamente no “sistema de fixação da peça”. Após um leve contato entre o eletrodo-ferramenta e peça pode ser feito um pequeníssimo deslocamento do eixo Z da máquina, de modo que permaneça entre eles um pequeno espaço de trabalho (*gap*) de 5 a 50 μm , o qual é devidamente preenchido com uma solução eletrolítica. Na aplicação de uma determinada tensão elétrica entre o eletrodo-ferramenta e a peça através do gerador de pulsos ECDM, o qual está acoplado eletronicamente com a câmera de alta velocidade e com o osciloscópio, é gerado um pulso ECDM, cujas várias fases foram explicadas anteriormente de forma detalhada. Desta forma o desenvolvimento das fases ECM e EDM do processo ECDM pode ser visualizado tanto com a câmera de alta velocidade (HFSC), por meio de fotos, como também com o osciloscópio, através do comportamento das curvas de tensão e corrente elétrica em função do tempo do pulso ECDM.

Com esta bancada experimental, além da obtenção das fotos da evolução das fases do pulso ECDM utilizando câmera de alta velocidade, foi realizada uma série de outros experimentos com a aplicação de um único pulso de tensão u_{ECM} entre os eletrodos, cujos resultados experimentais são mostrados na **figura 5**. Os gráficos apresentados nesta figura correspondem ao resultado do estudo da “probabilidade de ocorrência de descarga elétrica” em solução eletrolítica sob a variação de vários parâmetros do processo ECDM. Após o ajuste de uma determinada condutividade elétrica da solução eletrolítica (5, 25 ou 50 mS/cm), de um determinado *gap* entre os eletrodos (5, 10, 20 e 40 μm) e da forma geométrica da ponta do eletrodo-ferramenta (com ângulo em 45 ° e sem ângulo) foi aplicado um pulso de tensão u_{ECM} entre os eletrodos, cujos valores foram ajustados em 40, 80, 160 e 240 V, onde a forma geométrica do pulso tensão gerado entre eles pôde ser observada na tela do osciloscópio. Para determinadas configurações técnicas dos parâmetros citados anteriormente, isto é, dependendo dos valores de ajustes dos parâmetros do processo ECDM, pode ocorrer ou não o aparecimento de ambas as fases ECM e EDM

em um único pulso de tensão u_{ECM} aplicado entre o eletrodo-ferramenta e a peça. No caso de ocorrência de ambas as fases ECM e EDM diz-se que um pulso ECDM se desenvolveu entre os eletrodos, na solução eletrolítica, isto é, ocorreu tanto uma remoção eletroquímica como eletroerosiva do material peça. Dependendo da forma com que os valores dos parâmetros do processo ECDM são combinados entre si pode haver apenas a ocorrência da fase ECM em um pulso de tensão. Neste caso ocorre apenas uma pequena remoção eletroquímica do material da peça, e pode ser afirmado nesta situação que não se desenvolveu um completo pulso ECDM no eletrólito.

Existe para cada combinação especial de parâmetros do processo ECDM uma certa determinada probabilidade de ocorrência de descarga elétrica em solução eletrolítica, isto é, a presença de ambas as fases ECM e EDM em um único pulso ECDM. Pode ser verificado na **figura 5** para aquelas combinações de parâmetros do processo ECDM onde houve uma diminuição da resistência elétrica da fenda de trabalho, como por exemplo, o aumento da condutividade elétrica do eletrólito e a diminuição do tamanho da fenda de trabalho (*gap*), aumentam-se as chances de ocorrência de descarga elétrica em solução eletrolítica. A diminuição da resistência elétrica da fenda de trabalho possibilita um aumento da corrente eletroquímica durante a fase ECM do processo ECDM, o que acarreta uma maior produção de gás hidrogênio entre os eletrodos. Um maior volume de gás hidrogênio no espaço entre a ferramenta e a peça significa que são maiores as chances de ocorrência da fase EDM do processo ECDM, isto é, maior é a probabilidade de ocorrer uma descarga elétrica em solução eletrolítica. Pode ser verificado ainda através dos gráficos que tanto a forma da ferramenta com ângulo (eletrodo de prata com diâmetro externo de 1 mm) bem como a utilização de maiores tensões elétricas entre os eletrodos aumentam também a probabilidade de descarga elétrica em eletrólito. Neste caso os parâmetros do processo ECDM ajustados desta forma provocam um extremo aquecimento da solução eletrolítica por efeito Joule [13], o que gera uma quantidade muito grande de

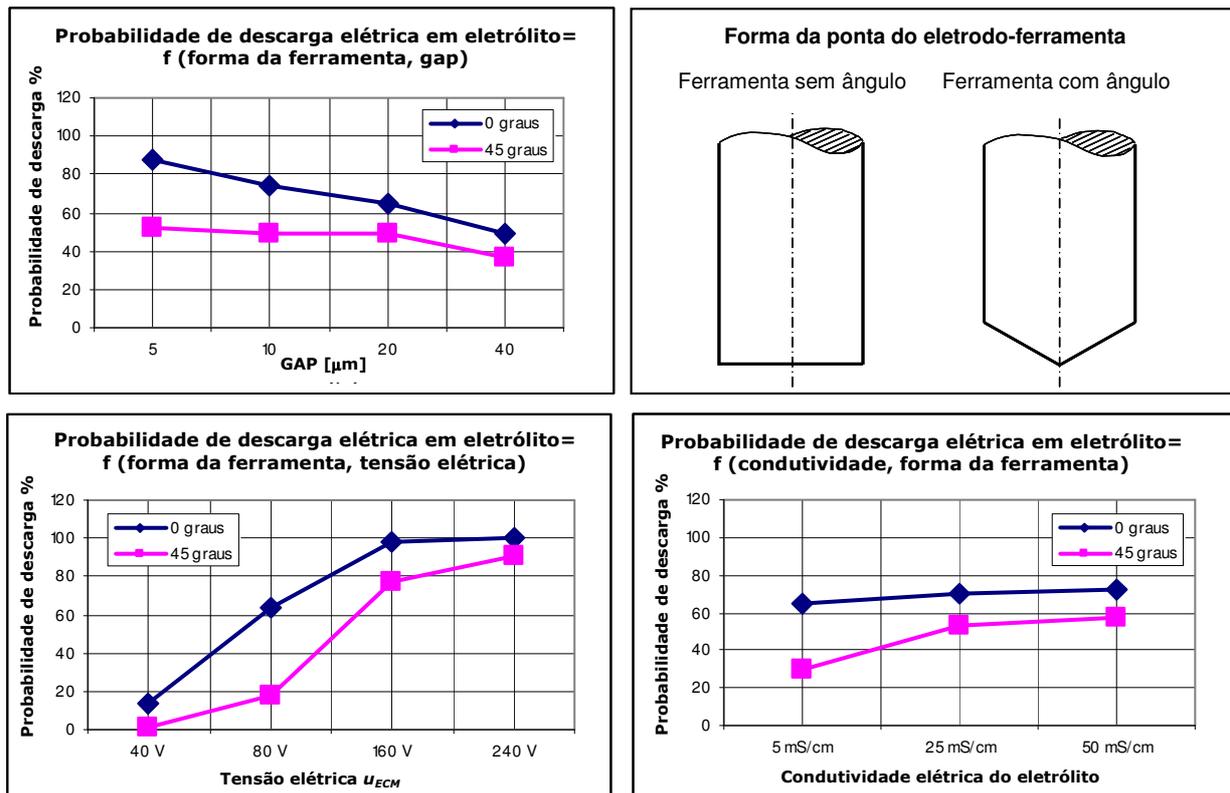


Figura 5: Análise de ocorrência de descarga elétrica em solução eletrolítica

vapor de gases que se misturam com o volume de gases sendo gerado no cátodo. Este alto volume de gases (hidrogênio + vapor de gases) provoca assim o rápido preenchimento da fenda de trabalho entre os eletrodos e logo em seguida o surgimento da descarga elétrica [11], [14], [17], [18], [19].

O entendimento básico do princípio físico do processo ECDM que foi apresentado anteriormente é ponto fundamental para compreensão do procedimento de fabricação de microfuros através desta tecnologia, cujas principais características serão apresentadas de forma estruturada no capítulo seguinte desta matéria.

3. USINAGEM DE MICROFURROS COM A TECNOLOGIA ECDM

Uma das atuais importantes aplicações dos fundamentos físicos de descargas elétricas em solução eletrolítica é a usinagem precisa de microfuros com o processo ECDM. A **figura 6** mostra a foto de uma máquina de eletroerosão por penetração (fabricante AGIE, modelo AGIE Compact 1) e sua representação esquemática. Através da realização de uma determinada modificação e adaptação no “sistema de controle”

(“closed loop control”) junto ao fabricante da máquina foi possível utilizar este equipamento de eletroerosão para a usinagem de microfuros com o processo ECDM. Este tipo de máquina-ferramenta é utilizado normalmente na prática para usinagem de geometrias em peças metálicas por eletroerosão por penetração (EDM) com água deionizada como dielétrico do processo. Esta máquina foi adaptada convenientemente ao processo ECDM, de modo que ela pudesse trabalhar com soluções eletrolíticas de elevada condutividade elétrica em vez de água deionizada.

O processo de usinagem de microfuros com o processo ECDM é influenciado pelas características da peça a ser usinada, da solução eletrolítica, do eletrodo-ferramenta, bem como pelos parâmetros da máquina-ferramenta (gerador de pulso e sistema de controle) (**figura 7**). Como resultado de trabalho deste processo combinado de usinagem é avaliado normalmente a taxa de remoção de material da peça, o desgaste da ferramenta e a rugosidade superficial do microfuro usinado.

Com a máquina-ferramenta da **figura 6** foi

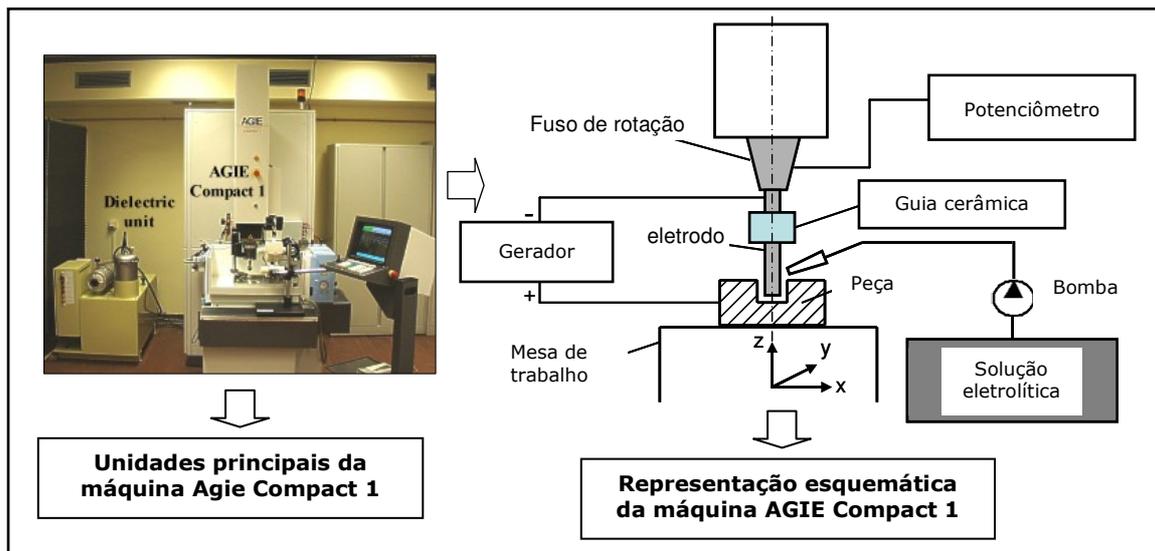


Figura 6: Máquina AGIE Compact 1 utilizada para a fabricação de microfuros com o processo ECDM [15]

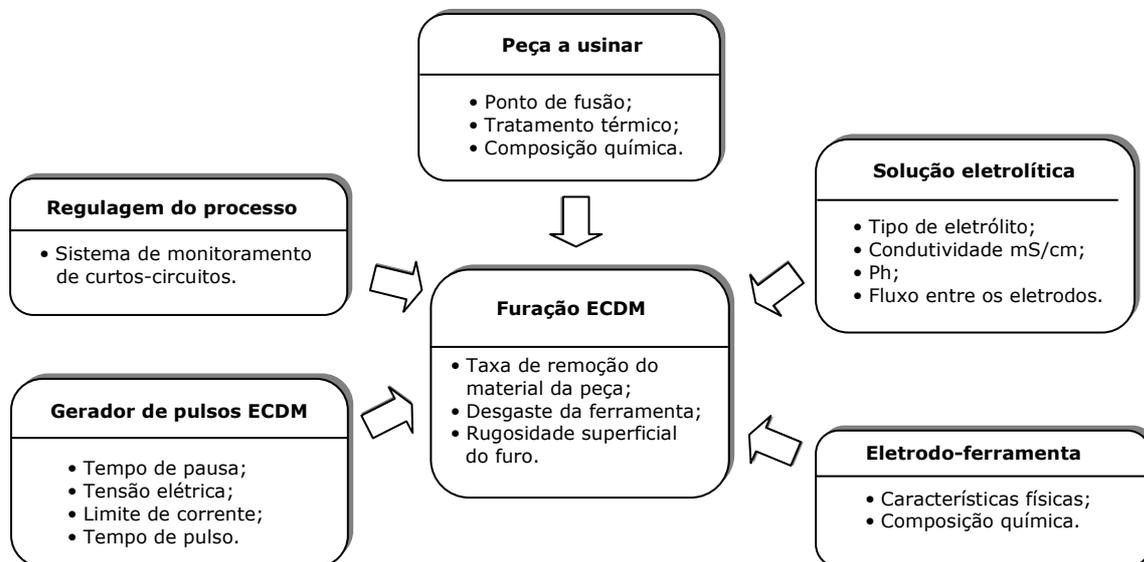


Figura 7: Parâmetros do processo de microfuração ECDM que influem no resultado de trabalho

realizada uma grande seqüência de experimentos, onde foi determinada assim a influência da composição química do eletrólito e de sua condutividade elétrica na dimensão do diâmetro de entrada de microfuros usinados (com 0,6 mm de profundidade), no tempo de processo e desgaste da ferramenta (figura 8). Para a realização dos experimentos foi utilizado um microeletrodo de tungstênio com um diâmetro de 0,1 mm que foi fixado no fuso de rotação da máquina e posicionado dentro da guia cerâmica (com forma geométrica prismática), paralelamente ao eixo de Z da máquina-ferramenta. Durante o processo de usinagem do microfuro o microeletrodo foi girado a uma velocidade de rotação de

2000 RPM. Os microfuros foram usinados em um tipo de aço inoxidável austenítico [15], onde foram utilizados no processo dois tipos de soluções eletrolíticas: um eletrólito “não-passivador” (NaCl – Cloreto de Sódio) e uma solução eletrolítica “passivadora” (Na_2SO_4 – Nitrato de Sódio). O eletrólito passivador gera durante fase a ECM do processo ECDM certa quantidade de oxigênio (ver reação 1) junto à superfície da peça, a qual reage quimicamente com o material formando um tipo de óxido metálico (“camada passivadora”). Esta camada passivadora forma-se junto à parede do microfuro usinado e apresenta uma determinada resistência elétrica. As características físicas e químicas da camada

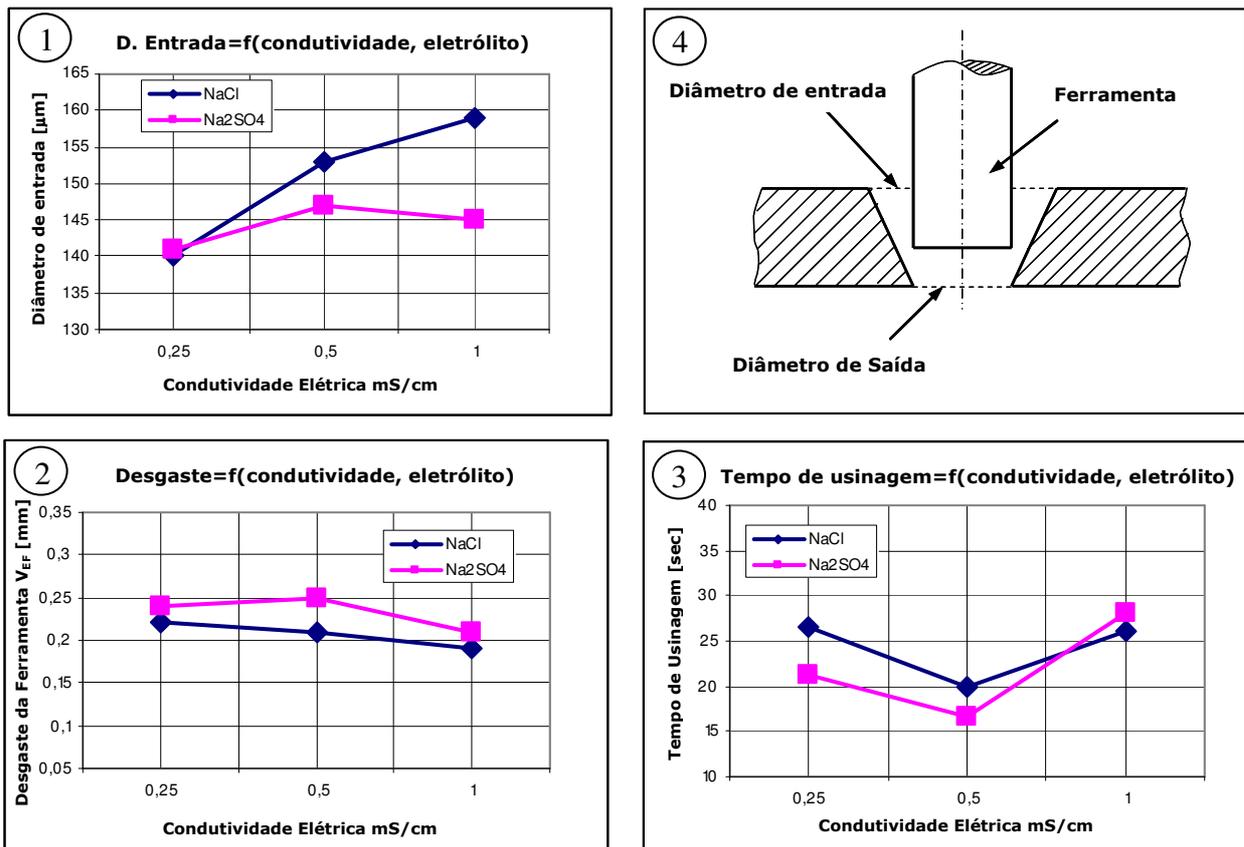


Figura 8: Influência dos parâmetros do processo ECDM sobre o resultado de trabalho

passivadora possibilitam na maioria dos casos uma baixa resistência elétrica. O eletrólito NaCl não possibilita a formação de oxigênio junto à superfície da peça durante a fase ECM do processo ECDM, isto é, com este tipo de solução eletroquímica não existe a formação de camadas passivadoras junto à superfície do furo durante o processo de usinagem.

Através dos gráficos da **figura 8** pode ser visto que o aumento da condutividade da solução eletrolítica até certo limite (entre 0,25 até 0,5 mS/cm) diminui o tempo de usinagem e aumenta o diâmetro de entrada do microfuro. Valores de condutividades elétricas acima de 0,5 mS/cm aumentam em demasia a quantidade de curtos-circuitos durante o processo de usinagem (o sistema de controle da máquina-ferramenta tolera apenas uma quantidade máxima de curtos-circuitos em um determinado espaço de tempo), o que provoca constantes movimentos de retorno do eixo Z da máquina durante o processo de usinagem, acarretando desta forma um aumento do tempo de usinagem. Com o eletrólito NaCl, devido a não-formação de uma camada passivadora

junto à superfície da peça, forma-se assim uma quantidade muito grande de partículas de remoção entre os eletrodos durante o processo de usinagem, as quais provocam muitos curtos-circuitos e, desta forma, o aumento do tempo do processo. Sem a formação de uma camada passivadora junto à parede do microfuro que está sendo usinado remove-se também neste local uma maior quantidade de material, o que explica então os maiores valores do diâmetro de entrada do microfuro com a solução de cloreto de sódio. Tanto para a solução de cloreto de sódio como para a solução de nitrato de sódio o aumento da condutividade elétrica da solução acarreta conseqüentemente uma redução do tempo da fase ECM (t_{ECM}) e o aumento da quantidade total de partículas de remoção durante o processo do usinagem do microfuro com o processo ECDM (**figura 9**). Pode ser verificado ainda através dos gráficos da **figura 8** que o desgaste do eletrodo-ferramenta com a utilização da solução de nitrato de sódio é claramente bem maior que com o cloreto de sódio. Devido à formação da camada passivadora junto à superfície do microfuro com a

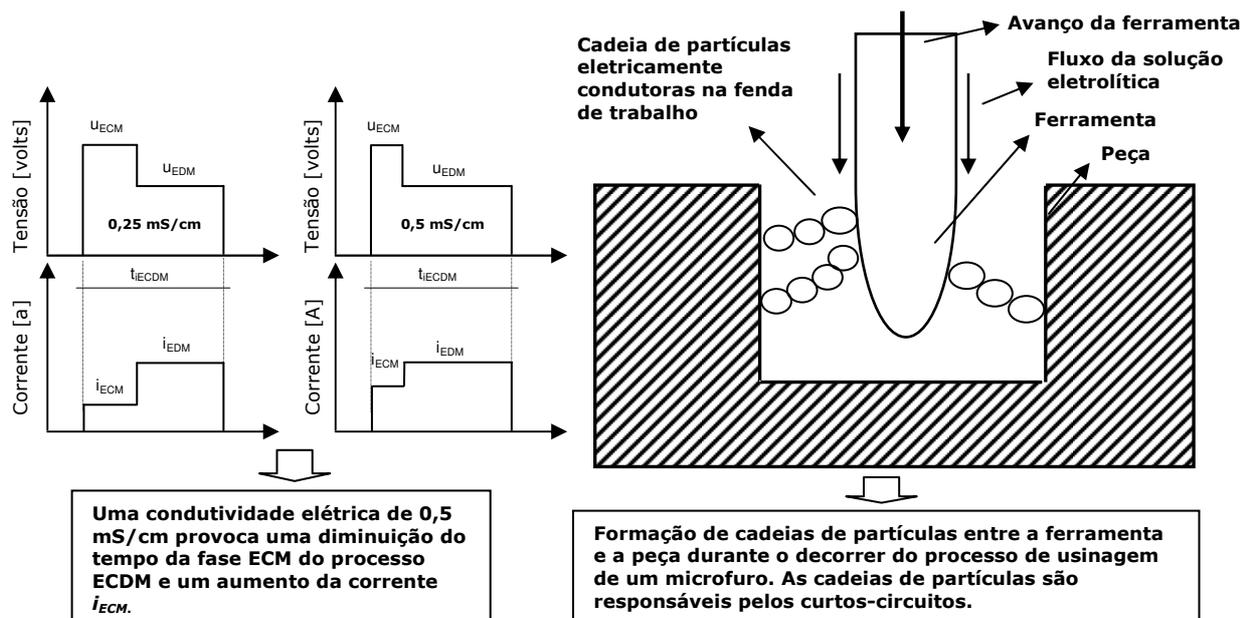


Figura 9: Forma do pulso ECDM (esquerda) e cadeia de partículas entre os eletrodos (curto-circuito)

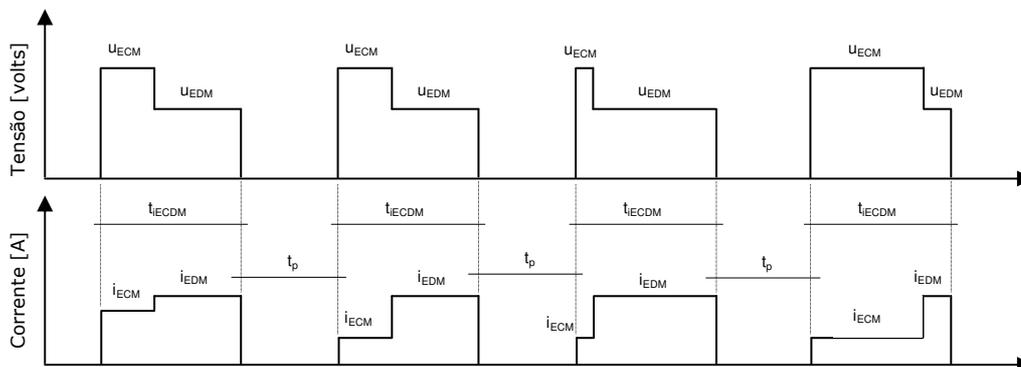


Figura 10: Formas geométricas dos pulsos ECDM [15]

solução de nitrato de sódio aumenta-se muito as chances de ocorrência descargas laterais entre a superfície lateral da ferramenta e a parede do furo durante o processo de usinagem, o que acarreta em um elevado desgaste da ferramenta por mecanismos eletroerosivos [15].

Resumidamente, pode-se dizer que o resultado do processo de microfuração ECDM é fortemente afetado pelas características da solução eletrolítica, onde um aumento da condutividade elétrica até certos limites possibilita um considerável aumento da taxa de remoção de material da peça. Durante o processo de usinagem ECDM são aplicados entre o eletrodo-ferramenta e a peça uma série de pulsos de tensões, cujas formas geométricas alteram-se durante o processo de penetração da ferramenta na peça (figura 10). Através do gerador

de pulsos da máquina-ferramenta Agie Compact 1 pode ser alterado a tensão u_{ECM} e o intervalo de tempo entre dois pulsos consecutivos (t_p). O processo de fabricação de um microfuro com a tecnologia ECDM ocorre de duas formas principais: na fenda de trabalho frontal entre a ferramenta e a peça predominantemente de modo eletroerosivo (fase EDM), na fenda lateral, praticamente de forma eletroquímica (fase ECM do processo ECDM).

A figura 11 mostra as características do processo de microfuração ECDM na fenda de trabalho lateral (s_L) e frontal (s_F) com o decorrer do tempo de usinagem. Após o início do processo de usinagem, e transcorrido um determinado período de tempo, ocorre ainda na fenda de trabalho lateral e frontal entre os eletrodos uma remoção de material tanto eletroquímica

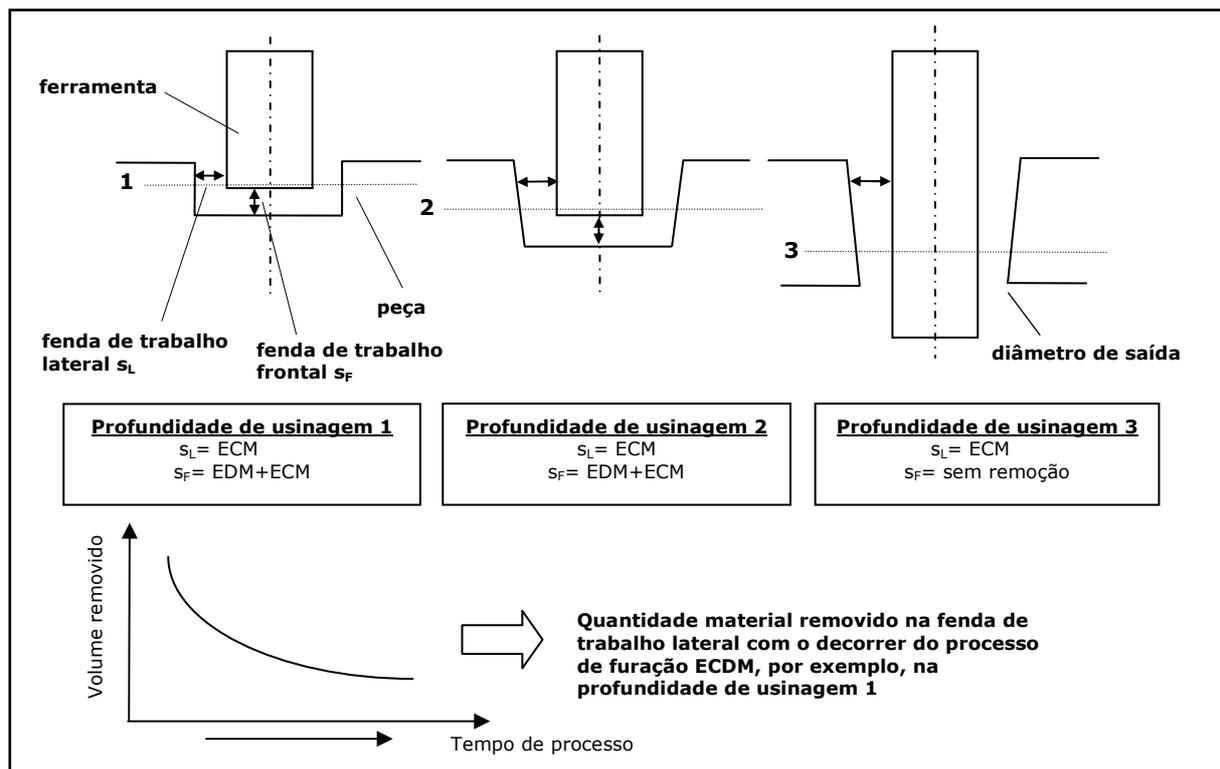


Figura 11: Remoção de material na fenda de trabalho lateral e frontal no processo ECDM

como também eletroerosiva da peça (profundidade de usinagem 1). Transcorrido um maior espaço de tempo (profundidade de usinagem 2) a dimensão geométrica da fenda lateral torna-se tão grande de modo que ocorre lá apenas um remoção de material eletroquímica, embora na fenda frontal entre os eletrodos continue havendo uma remoção de material eletroquímica e eletroerosiva. A partir da profundidade de usinagem 2 pode-se dizer que o processo de microfuração ECDM ocorre predominantemente de forma eletroquímica na fenda lateral entre os eletrodos, embora esta remoção de material diminua gradativamente com o decorrer do tempo de usinagem de forma exponencial. Na seqüência do processo de microfuração, em uma profundidade de usinagem 3, acontece a “ruptura” do microfuro, ou seja, o eletrodo-ferramenta provoca a formação de um furo passante na peça que está sendo usinada, sendo que continua ocorrer somente uma remoção eletroquímica nesta profundidade de usinagem até o exato momento em que a ferramenta atinge o seu ponto máximo de penetração na peça, o qual foi pré-programado através do comando numérico da máquina-ferramenta. O

microfuro produzido com o processo ECDM apresenta sempre uma determinada conicidade como resultado da diferença entre o diâmetro de entrada e saída do furo, onde no diâmetro de entrada pode ser observado um forte arredondamento por motivo da remoção eletroquímica na fenda de trabalho lateral entre o eletrodo-ferramenta e a peça.

Tanto o arredondamento na entrada do microfuro como também sua conicidade podem ser certamente muito vantajosos em específicas aplicações industriais tecnológicas. Na utilização de eletrólitos passivadores no processo de microfuração ECDM a camada passivadora formada na parede do microfuro pode possibilitar aqui excelentes características tribológicas, cujas propriedades podem ser ainda mais detalhadas tecnicamente através de outras análises experimentais.

4. OBSERVAÇÕES FINAIS

A combinação de conhecidos processos industriais para a formação de uma única tecnologia de fabricação (processo de fabricação “combinado” ou

“híbrido”) tem ganho continuamente nos últimos tempos uma enorme importância tecnológica dentro da área metal-mecânica. Pode ser citado aqui, por exemplo, o funcionamento combinado com brochamento sendo desenvolvido por Marcondes [9], o processo de torneamento de ultra-precisão combinado com feixe de laser de elevada potência, bem como o processo ECDM. Estas tecnologias de fabricação são promissoras para aumento de produtividade e melhoria da qualidade dos produtos produzidos.

A tecnologia ECDM favorece o processo de usinagem de microfuros com elevada taxa de remoção de material, baixo desgaste da ferramenta e, além disso, com uma pequena zona termicamente afetada na estrutura superficial da peça usinada. A possibilidade de obtenção de camadas passivadoras junto à superfície do microfuro como função do tipo de solução eletrolítica empregada no processo de usinagem torna a tecnologia ECDM uma nova e interessante área dentro dos processos de fabricação não-convencionais. Além disso, a tecnologia de fabricação combinada ECDM pode ser uma boa alternativa ao processo de eletroerosão por faíscas e à tecnologia de remoção eletroquímica em relação à tecnologia de fabricação de precisos microfuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BHATTACHARYYA, B., DOLOI, B. N., SORKHEL, S. K. Experimental investigations into electrochemical machining (ECDM) of non-conductive ceramic materials, **J. Mater. Process. Technol.**, 95/1/3, 145-154, 1999.
- [2] BELL, A. T. **Topics In Current Chemistry, Plasma Chemistry III**. eds. S. Veprek, M. Venugopalan, 43, Springer-Verlag, Berlin, 1980.
- [3] CHEN, F. F. **Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion**. 2nd ed., Plenum Press, New York, 1984.
- [4] FUKUZAWA, Y., KATOUGI, H., MOHRI, N., FURUTANI, K., TANI, T. Machining Properties of Insulating Ceramics with an Electric Discharge Machining - Machining of the Oxide Ceramics -, Proc. 12th Int. Sympo. **Electromachining ISEM XII**, Aachen, Germany, 445-453, 1998.
- [5] GRILL, A. **Cold Plasma in Materials Fabrication**. IEEE Press, New York, 1994.
- [6] HOLBER, W. **Handbook of Plasma Processing Technology**. 285, Noyes Publications, Park Ridge, 1989.
- [7] KURAFUJI, H., SUDA, K. Electrical Discharge Drilling of Glass I, **Annals of CIRP**, 16, 415-419, 1968.
- [8] LAHANN, J., KLEE, D., HOECKER, H. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**. Vol. 30, Issue12, 2000.
- [9] MARCONDES, P.V.P., ETO, A. M., BELTRA, P. A. C., BORGES, P. C. A smart stamping tool for punching and broaching combination. **Journal of Materials Processing Technology**, 206, 2008. Elsevier.
- [10] MCGEOUGH, J. A., BHALLA, S., SILVA, A., WOLLENBERG, G., SCHULZE, H. P., RUSZAJ, A. Modelling and Experiments on Combined Electrochemical Electrodischarge Machining of Metals. **Computer-aided Production Engineering**. Wuhan (China), S. 3-14, 2001.
- [11] MOHRI, N., FUKUZAWA, Y., TANI, T., SAITO, N., FURUTANI, K. Assisting Electrode Method for Machining Insulating Ceramics, **Annals of CIRP**, 45/1: 201-204, 1996.
- [12] RIEDEL, E. **Anorganische Chemie**. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1994.
- [13] SCHÖPF, M. **ECDM Abrichten metallgebundener Diamantschleifscheiben**. Dissertation. ETH Zürich, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik, Nr. 580, 2001.
- [14] SINGH, Y. P., JAIN, V. K., KUMAR, P., AGRAWAL, D. C. Machining piezoelectric (PZT) ceramics using an electrochemical spark machining (ECSM) process, **J. Mater. Process. Technol.**, 58/1, 24-31, 1996.
- [15] SOUZA, A. **Grundlagen der ECDM-Bearbeitung mit der Verwendung von neutralen Elektrolytlösungen – Ein kombiniertes Fertigungsverfahren**. Dissertação de Doutorado, Versão 2009.

[16] SOUZA, A. **Processos de Fabricação – Parte 1.**

Apresentação Power Point, 2008.

TOKURA, H., KONDOH, I., YOSHIKAWA, M.

Ceramic material processing by electrical discharge in electrolyte, **J. Mater. Sci.**, 24/3, 991-998, 1989.

[17] TSUCHIYA, H., INOUE, T., MIYAZAKI, M. Wire

Electro-chemical Discharge Machining of Glass and

Ceramics, **Proc. 5th Int. Conf. Prod. Eng.**, Tokyo,

Japan, 413-417, 1984.

[18] VOLZ, K., SCHREIBER, K. S., GERLACH, J. W.,

REIBER, W., RAUSCHENBACH, STRITZKER. B.,

ASSMANN, W., ENSINGER, W. **Materials Science and Engineering**, A 289, 2000.

[19] WÜTHRICH, R., FASCIO, V. Machining of

Nonconducting Materials Using Electrochemical

Discharge Phenomenon – An Overview, **Int. J.Mach.**

Tool. Manuf., 45, 1095-1108, 2005.