UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RAFAEL SILVA DINIZ

ESTUDO DO PROCESSO EDM: UMA REVISÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DO PROCESSO

SÃO LUÍS

2015

RAFAEL SILVA DINIZ

ESTUDO DO PROCESSO EDM: UMA REVISÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DO PROCESSO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

SÃO LUÍS

2015

Diniz, Rafael Silva.
Estudo de processo EDM: uma revisão dos principais parâmetros do processo / Rafael Silva Diniz.– São Luís, 2015.

48 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Estado do Maranhão, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues

1.Aço. 2. Rugosidade. 3. Fluido dielétrico I.Título

CDU: 621.7.044.7

RAFAEL SILVA DINIZ

ESTUDO DO PROCESSO EDM: UMA REVISÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DO PROCESSO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr Jean Robert Pereira Rodrigues

Aprovado em: 17de Julho de 2015

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof. Dr Jean Robert Pereira Rodrigues

_____
Prof. Dr. José Roberto Pereira Rodrigues

_____
Prof. MSc. Louryval Coelho Paixão

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pela força, saúde e perseverança. Dedico ao meu pai José Hipolto Araújo Diniz. Minha mãe Maria da Conceição Silva Diniz, que sempre nos incentivou a estudar. Uma dedicatória especial à Liana Rachel Bandeira Costa, minha esposa, que nunca me deixou desanimar e sempre esteve ao meu lado em todos os momentos e minha filha Letícia Rafaelle Costa Diniz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues, meu Orientador, pela ajuda, incentivo e disponibilidade durante todo o trabalho.

Agradeço a Diretoria e aos professores do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão.

A todos os colegas que cursaram as mesmas disciplinas e pelo conhecimento adquirido com eles.

Àqueles da minha família que colaboraram e ajudaram em todos os momentos e de várias formas para que eu pudesse chegar até aqui.

RESUMO

Este trabalho estudou o efeito de diferentes parâmetros de corte, assim como os fluidos de corte. Também analisou o resultado da adição de pós no acabamento superficial sobre a rugosidade superficial do aço. O processo de usinagem por eletroerosão utiliza energia termelétrica na remoção de material em que a fusão e a vaporização do material usinado formam os mecanismos principais, usados para a geração de orifícios, ranhuras e cavidades, geralmente de pequenas dimensões em materiais com elevada dureza e baixa usinabilidade. O perfil do eletrodo corresponde à contra forma do detalhe a ser obtido na peça. A descarga de faíscas é produzida por pulsação controlada de corrente contínua entre a peça-obra e a ferramenta imersas em um fluido dielétrico ionizado. Em um processo EDM convencional, o tempo de usinagem para a operação de acabamento é extremamente superior a de um desbaste. Portanto, o tempo de usinagem para operação de acabamento é um dos problemas mais importantes no processo, com a adição de pó de alumínio no fluido dielétrico este se torna muito mais eficiente e capaz de melhorar o tempo de usinagem alcançando assim um alto nível de acabamento para um mesmo tempo de operação, quando comparado com o EDM convencional. Constatou-se pelos resultados dos experimentos realizados, que a utilização de diversos tipos de pós, tais como silício (Si), alumínio (Al) e grafite (Gr), adicionados em um óleo hidrocarbonos é bastante efetiva no sentido de se conseguir um fino acabamento em curto tempo de usinagem.

Palavras-chave: Aço; Rugosidade; Fluido Dielétrico.

ABSTRACT

This study investigated the effect of different cutting parameters and cutting fluids. Also analyzed the result of adding post in surface finish on the surface roughness of steel. The electro-discharge machining process uses thermal energy to remove material in which the melting and vaporization of the material forming the machined main mechanisms used for the generation of holes, grooves and cavities, generally small in materials with high hardness and low machinability. The electrode shape v profile corresponds to detail on the part to be obtained. The discharge sparks are produced by controlled pulse of direct current between the piece-work and the tool immersed in an ionised dielectric fluid. In a conventional EDM process, the machining time for the finishing operation is extremely superior to a thinning. Therefore, the time for finish machining operation is one of the most important problems in the process, with the addition of aluminum powder in the dielectric fluid it becomes much more efficient and capable of improving the machining time thus achieving a high level of finish for the same operation time as compared with conventional EDM. It was found from the results of experiments, the use of various types of powders, such as silicon (Si), aluminum (Al) and graphite (Gr), added to a hydrocarbon oil is very effective in order to achieve a fine finished in short machining time.

Keywords: Steel; Roughness; Dielectric Fluid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Esquema da usinagem por eletroerosão a fio (TARNG, MA e CHUNG, 1995). 18
Figura 3.2 Esquema da usinagem de eletroerosão por penetração (DUNIB, 1979)..... 19
Figura 3.3 Esquema dos principais elementos construtivos de um equipamento de usinagem por descargas elétricas (EDM) (ARANTES, 2001). 21
Figura 3.4 Sequência dos 3 momentos principais de uma descarga unitária (Ton, Toff e lavagem do material erodido) (CRUZ; MALAQUIAS; FERNANDES, 1999). 22
Figura 3.5 Baixa Frequência/Desbaste (GUITRAL, 1997). 23
Figura 3.6 Frequência Moderada/Semi-acabamento (GUITRAL, 1997). 24
Figura 3.7 Alta Frequência /Acabamento (GUITRAL, 1997)..... 24
Figura 3.8 Sistemas de lavagem no processo EDM (CRUZ; MALAQUIAS; FERNANDES, 1999). 27
Figura 3.9 Variação da TRM para os valores calculados e obtidos experimentalmente (MAMALIS et al, 1987). 29
Figura 3.10 Efeitos Superficiais e Sub-superficiais (FIELD et al, 1989)..... 30
Figura 4.1 Características importantes na seleção de um fluido dielétrico para EDM (ARANTES, 2001). 33
Figura 4.2 Mecanismo de propagação da descarga elétrica (Kurafuji e Suda 1965) 39
Figura 4.3 Relação entre o "gap" e a dispersão das descargas (KOBAYASHI 1995)... 39
Figura 4.4 Relação entre a rugosidade superficial média (Ra) e a área usinada (KOBAYASHI 1995). 40
Figura 4.5 Aspecto superficial e vistas tridimensionais das crateras geradas por uma descarga de um único pulso (OKADA E UNO, 1997)..... 40
Figura 4.6 Aspecto superficial e secção transversal das crateras obtidas pelo processo EDM (OKADA E UNO, 1997) 41
Figura 4.7 Diagrama esquemático do "gap" (OKADA E UNO, 1997). 42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Principais processos de usinagem não convencional (CRUZ; MALAQUIAS; FERNANDES, 1999). 14
Tabela 3.1 TRM experimental e calculada (MAMALIS et al, 1987)..... 28
Tabela 4.1 Especificações Importantes para Fluidos Dielétricos populares no mundo *(Intech EDM, 1996).* 37

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AISI – American Iron and Steel Institute – Instituto Americano de ferro e Aço;

Al – Alumínio;

Asup - Área Superficial [mm²];

AWJM – Abrasive Water Jet Machining;

CHM – Chemical Machining;

DT – Duty Time [µs];

DVR – Desgate Volumétrico Rotativo [mm³];

EBM – Electron Beam Machining;

ECM – Electrochelmical Machining

EDM – Electrical Discharge Machining;

Ft - Frequência Total [kHz];

GD – Geometria Definida;

GND - Geometia não Definida;

Gr – Grafite;

I (máx) – Máxima Intensidade de Força [A];

IBM – Ion Beam Machining;

LBM – Laser Beam Machining;

N – Coeficiente de Correção;

PBM – Plasma Beam Machining;

R – Tempo de Retração[µs];

RD – Regime de Operação;

Si – Silício;

TRM - Taxa de remoção de material [mm^3/min];

U - Tempo de Sequência de Descargas [µs];

USM - Ultrasonic Machining;

I - Corrente Elétrica [A];

Ra - Rugosidade média aritmética [µm];

Toff - Tempo inativo de cada descarga [µs];

Ton- Tempo de duração de cada descarga [µs];

V - Tensão elétrica [V];

Vwc - Volume de Metal Removido por Pulso [mm³];

WJM - Water Jet Machining;

ZAC - Zona Afetada pelo Calor.

SUMÁRIO

1. **INTRODUÇÃO** 12
2. OBJETIVOS 16
2.1 OBJETIVOS GERAIS 16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
3.1 PRINCIPAIS VARIÁVEIS DO PROCESSO 21
3.1.1 Polaridade 21
3.1.2. Regime de operação 22
3.1.3. Corrente 22
3.1.4. Frequência 23
3.1.5 Gap 24
3.1.6 Tempo de onda ligado (T_{ON}) 25
3.1.7 Tempo de onda desligado (T_{OFF}) 25
3.1.8 Duty time (DT) 25
3.1.9 Tempo de retração (R) e tempo de sequência de descargas (U) 25
3.1.10. Ferramental 26
3.1.11. Taxa de remoção de material (TRM) 27
3.1.12. Desgaste volumétrico relativo (DVR) 29
3.1.13. Textura e integridade superficial 29
3.1.14. Camada refundida 30
4. FLUIDO DIELÉTRICO 32
4.1 PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS FLUIDOS DIELÉTRICOS 32
4.2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA 37
4.3 PÓS ADICIONADOS NO FLUIDO DIELÉTRICO 39
5. CONSIDERAÇÃO FINAL 44
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 44
REFERÊNCIAS 45

1. INTRODUÇÃO

Sendo a usinagem uma tecnologia que realiza o arrancamento controlado de material de uma peça em bruto, em geral a forma de obtenção destas é feita por processos de forjamento, fundição, laminação, entre outros, com o objetivo de produzir peças com formas e características superficiais predeterminadas. Os processos convencionais de usinagem usam o contato físico entre a ferramenta e a peça para o arrancamento de cavaco utilizando basicamente dois mecanismos: o de cisalhamento (casos como torneamento, fresamento, furação e etc.) e a abrasão (retificação, brunimento, lapidação e etc.). Apesar de todo o avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas, esses processos têm sérias limitações, principalmente em casos de utilização de materiais duros e quando se deseja a obtenção de formas complexas ou de pequenas dimensões (AMORIM, 2002).

Por outro lado, a necessidade humana obrigou a pesquisa a desenvolver novos materiais normalmente de difícil usinagem por processos tradicionais. Surgiram novos aços-liga, as superligas, as cerâmicas finas, os compósitos, entre outros. Para melhor entendimento, devem-se conhecer os princípios físicos de funcionamento dos processos não tradicionais de usinagem (AMORIM, 2002).

O que difere fundamentalmente os processos não tradicionais dos ditos tradicionais, além da época em que apareceram, são as formas de energia empregadas e os mecanismos de retirada de material da peça.

Cada processo tem seu nicho no moderno mundo da usinagem e dificilmente concorrem entre si. Para fazer um adequado uso de cada processo, são necessários que se conheçam detalhadamente os parâmetros de usinagem do processo que se pretende realizar. Deve ser levado em conta que:

- Os processos não tradicionais não devem competir, via de regra, com os processos tradicionais;
- Um particular processo adequado a uma determinada situação pode não ser igualmente eficiente sob outras condições.

Na literatura inglesa os processos de usinagem são comumente divididos em processos convencionais de usinagem e processos não convencionais de usinagem (BEDDOES e BIBBY, 2003; YOUSSEF e El-HOFY, 2008).

A literatura alemã, porém, divide os processos de usinagem em três grupos: processos de usinagem com ferramentas de geometria definida, processos de usinagem com ferramentas de geometria não definida e processos especiais de usinagem (WEINGAERTNER, 1998).

Os processos de usinagem com ferramentas de geometria definida (GD) são os mais comuns e também os que são empregados para maiores produções. Entre eles estão o torneamento, o fresamento e a furação. Os processos de usinagem com ferramentas de geometria não definida (GND) são caracterizado por seu excelente acabamento superficial. Dentre esses processos encontram-se a retificação, o brunimento e a lapidação. Os processos especiais de usinagem formam uma categoria cuja tecnologia e aplicações são diferenciadas dos anteriores. Enquanto nesses processos a ideia básica é sempre de uma (ou mais) ferramenta sólida em cunha penetrando no material, em processos especiais essa formatação não existe (AMORIM, 2002).

Os processos especiais de usinagem utilizam tecnologias e conceitos novos, se comparados com processos GD e GND, e surgiram para suprir necessidades específicas, porém com o tempo passaram a ocupar mais espaços na usinagem e a serem mais competitivos (BENEDICT, 1987). Entre estes processos podemos citar a usinagem com jato d´água, a usinagem eletroquímica, a usinagem por laser e a eletroerosão.

Da mesma forma que ocorre em muitas outras áreas técnicas, a aplicação tecnológica prática de descargas elétricas como processo de produção aconteceu devido à necessidade do ambiente industrial em solucionar alguns dos seus problemas internos e essenciais para o processo de fabricação (AMORIM, 2002).

Também conhecido por EDM (do inglês Electrical Discharge Machining), o processo se estabeleceu em 1943, dois russos, B.R. e N. I. Lazarenko, na universidade de Moscou, através do desenvolvimento destes dois cientistas ao investigarem o desgaste de contatos de interruptores, deduziram que as descargas de centelhas poderiam ser utilizadas para usinar novos metais recém-desenvolvidos que provaram ser difíceis de moldar pelos métodos convencionais (GUITRAU, 1997; HO e NEWMAN, 2003; KIYAK e ÇAKIR, 2007, McGEOUGH, 1988).

Trabalhos similares se desenvolveram aproximadamente na mesma época nos Estados Unidos, para a retirada de machos e brocas quebradas de válvulas hidráulicas. A partir da década de 80, com a utilização da tecnologia CNC, as máquinas tiveram grande avanço, embora já fossem utilizadas desde a década de 50 (HO e NEWMAN, 2003).

A usinagem por descargas elétricas (EDM), um processo de usinagem não tradicional, tem substituído a furação, a fresagem, a retificação e outras operações de usinagem tradicionais e é agora uma opção de usinagem bem estabelecida em muitas indústrias em todo o mundo (SINGH *et al,* 2004).

Aplicando-se uma diferença de potencial (em corrente contínua) entre duas placas condutoras de eletricidade, chamadas de eletrodo e peça, separadas por uma pequena distância (de 0,012mm a 0,050mm) denominada "gap", ocorrem descargas elétricas entre elas. Neste espaço entre a peça e o eletrodo, circula o fluido dielétrico que se torna eletrolítico na forma gasosa (McGEOUGH, 1988; MEDEIROS, 1985).

No instante da descarga elétrica, o eletrodo e a peça não estão em contato devido ao meio dielétrico que os envolve. Ao iniciar o ciclo de erosão, na pequena região de descarga elétrica, a potência despendida por unidade de área pode chegar até 1000 W/m^2, a temperatura até 15.000°C, assim o fluido dielétrico evaporará, tornando-se eletrolítico e no meio gasoso a pressão poderá alcançar as marcas de até 200 atm (McGEOUGH, 1988).

Ultimamente têm sido desenvolvidos outros processos, geralmente por combinação com processos não tradicionais básicos. Desta forma, desenvolveram-se muitos e outros, ainda em fase de laboratório, que estão por surgir. A Tabela 1.1 apresenta as siglas e seus significados dos processos não tradicionais mais comuns.

Tabela 1. 1 Principais processos de usinagem não convencional (CRUZ; MALAQUIAS; FERNANDES, 1999).

Sigla	Processo
WJM	Water Jet machining
AWJM	Abrasive Water Jet machining
USM	Ultrasonic machining
ECM	Electrochemical machining
CHM	Chemical machining
EDM	Electrical discharge machining
EBM	Electron beam machining
LBM	Laser beam machining
PBM	Plasma beam machining
IBM	Ion beam machining

Para bem selecionar um processo, é preciso levar em conta o que a pesquisa e experiência prática já concluíram para cada um deles em termos dos seguintes aspectos:

- Materiais a serem usinados;
- Forma da peça (ou operações mais indicadas para o processo);
- Potencialidade do Processo: Taxa de Remoção de Material (TRM), Tolerância Dimensional, Acabamento Superficial e Zona Afetada pelo Calor (ZAC); e
- Considerações Econômicas.

As áreas mais clássicas de aplicação de EDM, como a fabricação de moldes e matrizes promovem o desenvolvimento da tecnologia, especialmente sua produtividade, para se manter como processo viável em função da demanda e pequeno ciclo de vida de componentes (HO e NEWMAN, 2003).

Ao se usinar qualquer componente deve-se ter em mente que existem dois importantes aspectos que devem ser definidos e controlados. O primeiro está relacionado com as irregularidades geométricas da superfície e é denominado textura superficial, e o segundo com as alterações metalúrgicas da superfície e camada subsuperficial, denominado Integridade superficial. No processamento de alguns produtos esses dois aspectos, textura superficial e integridade superficial, devem ser definidos, medidos e mantidos dentro dos limites especificados (FIELD e KAHLES 1982).

FIELD e KAHLES (1982) citam que as principais causas de alterações superficiais produzidas pelo processo de usinagem por eletroerosão são: altas temperaturas geradas no processo; reações químicas; excessiva corrente elétrica e densidade de energia durante a usinagem. A utilização de pós em suspensão no dielétrico podem ainda melhorar a qualidade superficial, aumentar as taxas de remoção e diminuir o desgaste nos processos de eletroerosão.

A medição da rugosidade da superfície é o parâmetro mais utilizado para definição da superfície obtida. A maior parte das publicações se refere aos tradicionais parâmetros bidimensionais de rugosidade. Destes, são mais utilizados o Ra e o Rt embora outros parâmetros, como Ry, Rq, Rz, estejam ganhando espaço (FUKUZAWA et al., 2004; HAN e KUNIEDA, 2004; TARNG, MA e CHUNG, 1995).

O tipo e forma de aplicação do dielétrico influenciam a taxa de remoção do material e o desgaste do eletrodo em operações de desbaste, enquanto influem na rugosidade em operações de acabamento, além de influenciarem na camada branca (WONG, LIM e LEE, 1995).

2. OBJETIVOS

A seguir serão apresentados os principais objetivos da pesquisa, o geral e os específicos, com suas devidas contribuições para o trabalho.

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Este projeto tem como objetivo geral desenvolver um estudo da rugosidade superficial do aço - ferramenta ABNT – M2 processado por EDM.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Fazer uma revisão teórica sobre as variáveis com maior influência no processo usinagem por eletroerosão como: material da peça - ferramenta, fluidos de corte, fluidos de corte e dielétricos, operações de acabamento e fino desbaste e a adição de pós no acabamento superficial.
- ✓ Demonstrar como as variáveis citadas acima se relacionam com a rugosidade e como este acabamento superficial se torna relevante para o desempenho das peças produzidas com o uso desse processo de fabricação mecânica.
- ✓ Desenvolver e disseminar um estudo que possa servir como referencial aos estudantes, futuros engenheiros, dentro de suas atividades profissionais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo EDM possui grande aplicação em usinagem de peças com geometria complexa e alta dureza, tais como moldes e matrizes, setor automotivo, aeroespacial, médico, ótico, de joalheria, dental, de ferramentas, de prototipagem e de componentes cirúrgicos (SIMAO et al, 2003; HO e NEWMAN, 2003; RAMASAWMY e BLUNT, 2004; FONDA et al., 2008). Segundo HO e NEWMAN (2003) e TSAI, YAN e HUANG (2003), a ausência de contato entre peça e ferramenta evita o aparecimento de forças de usinagem na superfície que eliminam as tensões mecânicas, aumentando a precisão dos componentes fabricados e desaparecem as vibrações durante o processo, o que faz com que, os dispositivos de fixação sejam menos robustos, trazendo uma redução de custo.

A eletroerosão é o mais utilizado e popular dos processos especiais de usinagem (HO e NEWMAN, 2003; KIYAK e ÇAKIR, 2007), e se baseia no fenômeno de descargas elétricas não estacionárias (faíscas) controladas para fundir e vaporizar parcelas do material, peça condutora. Isso é realizado aplicando corrente alternada ou contínua pulsada de alta frequência à peça, através de um eletrodo ou fio, configurando através da remoção dessas parcelas de material a usinagem de uma determinada superfície (GUITRAU, 1997).

CUSANELLI *et al* (2004) afirmam que a usinagem por descargas elétricas (EDM) é uma técnica amplamente usada para usinar metais duros e para executar tarefas específicas que não podem ser alcançadas usando técnicas convencionais. Estabelecido como uma alternativa para a usinagem de materiais de difícil usinabilidade e geometrias complexas. O desenvolvimento do processo, especialmente em termos de taxas de remoção, fez com que se tornasse mais competitivo, estendendo suas aplicações (HO e NEWMAN, 2003).

Apesar de não haver necessidade de o eletrodo-ferramenta ser mais duro do que a peça a ser usinada, como acontece nos processos de usinagem tradicionais. Reduzindo os custos por um lado, por outro a confecção da ferramenta geralmente possui custos elevados.

As bases de seu controle ainda são muito empíricas, em função da diversidade e complexidade dos fenômenos elétricos e não elétricos envolvidos e do seu recente aparecimento em relação aos processos tradicionais. Existe uma necessidade de contínuo desenvolvimento para se manter competitivo em relação a processos como a

usinagem de altas velocidades (HSM), que possui facilidade para usinagem de materiais duros com dureza em torno de (40-60 HRC), por exemplo (HO e NEWMAN, 2003).

Os processos de eletroerosão podem ser divididos em três tipos: eletroerosão por penetração, eletroerosão a fio e retificação eletroerosiva (WEINGAERTNER, 1998).

A eletroerosão a fio é bastante comum e utiliza de um arame metálico como eletrodo para recortar cavidades. Com a utilização de comandos CNC com mais de cinco eixos torna-se um processo muito versátil, e com grande aplicação em matrizaria. Possui vantagens em termos de velocidade de usinagem, custo e velocidade de reposição de eletrodo em relação ao processo de eletroerosão de penetração. Normalmente usa água deionizada como dielétrico (TARNG, MA e CHUNG, 1995). A figura 3.1 mostra um esquema do processo de eletroerosão a fio.

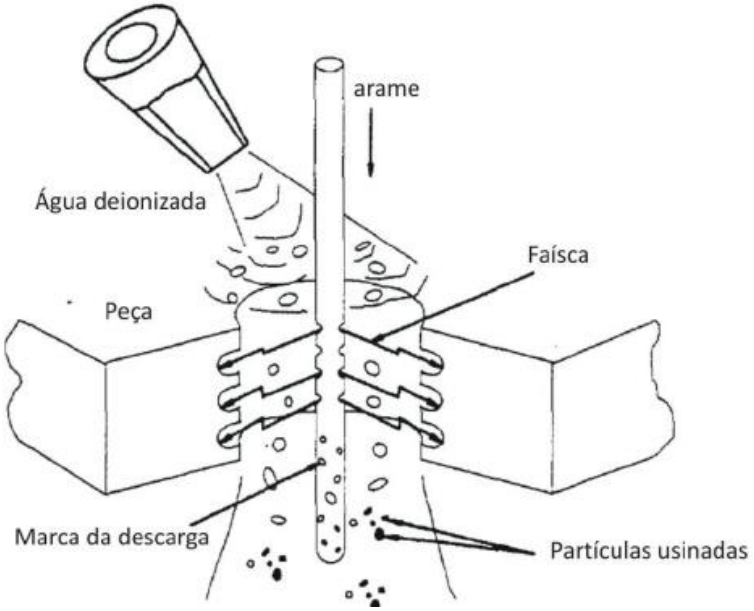

Figura 3. 1 Esquema da usinagem por eletroerosão a fio (TARNG, MA e CHUNG, 1995).

Já o processo de eletroerosão por penetração tem a capacidade de fabricar cavidades com fundo (conhecidas por cegas) e é um processo amplamente utilizado. Suas desvantagens em relação aos outros tipos de eletroerosão dizem respeito à fabricação e substituição de seus eletrodos e limpeza da área de trabalho. Normalmente, usa um tipo de óleo hidrocarboneto como dielétrico (DUNIB, 1979). A figura 3.2 mostra um esquema de eletroerosão por penetração.

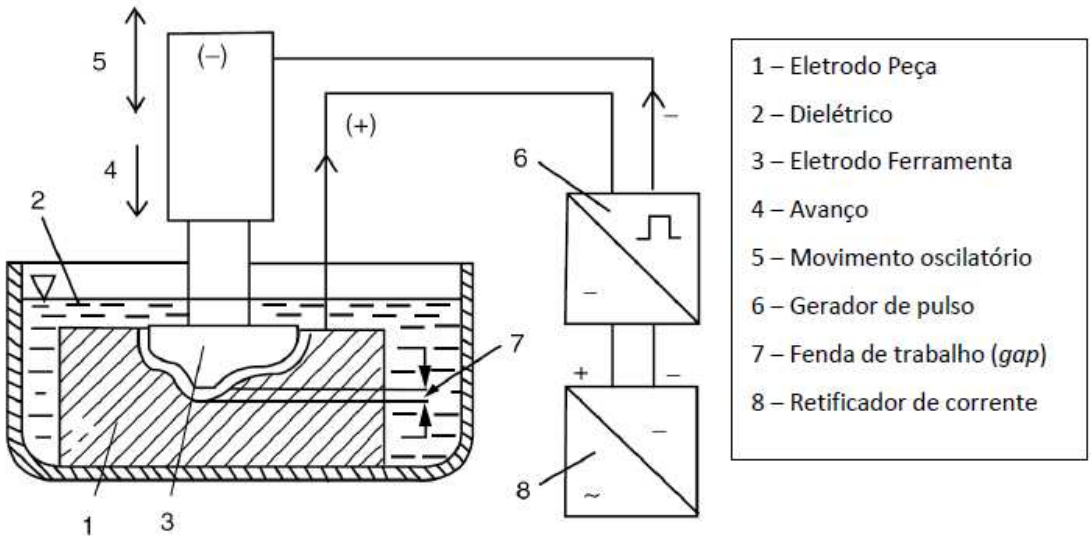

Figura 3. 2 Esquema da usinagem de eletroerosão por penetração (DUNIB, 1979).

Retificação por EDM tem este nome por motivos históricos e que se trata apenas de um processo EDM com eletrodo rotativo (que originalmente foi instalado em uma retificadora plana). Todos os efeitos e resultados possíveis para EDM de penetração são possíveis para EDM com eletrodo rotativo. Inclusive obter uma forma em um pacote composto de vários materiais distintos (cobre - ferro - alumínio - metal duro, por exemplo) o que não seria possível na retificação. No mais a máquina apresentava os mesmos movimentos de uma retificadora plana e a penetração do cabeçote era controlado como em uma máquina de eletroerosão de penetração. Hoje, qualquer máquina de eletroerosão de penetração de 5 eixos, permite a rotação do eletrodo, e ninguém fala mais em retificação eletroerosiva por descargas elétricas. (AMORIM, 2002)

Na busca de melhor desempenho para o processo de eletroerosão, foram ainda desenvolvidos trabalhos que envolvem processos híbridos de eletroerosão com retificação, usinagem a laser e usinagem de alta velocidade (HSM) (HO e NEWMAN, 2003; ASPINWALL, 2001), ou usinagem ultrassônica, para a produção de microfuros de até 5 μm de diâmetro

Dentre as várias teorias sobre a usinagem por eletroerosão para explicar a natureza de tudo o que acontece durante a ocorrência das descargas elétricas. Usaremos a de (AMORIM, 2002) que cita, em sua tese, que a teoria termoelétrica apresenta as melhores evidências explicativas do fenômeno de remoção de material por descargas elétricas. Esta teoria relata que, o ciclo de uma descarga elétrica entre dois eletrodos submersos num meio líquido de trabalho ocorre em quatro fases consecutivas, a serem descritas:

1. Fase de ignição da faísca:

- ❖ O eletrodo se aproxima da peça;
- ❖ As duas unidades são energizadas;
- ❖ Concentração do campo elétrico na fenda de trabalho (*"gap"*);

2. Formação do canal de plasma:

- ❖ Criação de um canal ionizado entre o eletrodo e a peça;

3. Fusão e evaporação de uma pequena quantidade de material nos eletrodos:

- ❖ Interrupção da centelha;
- ❖ Material da peça se funde localmente e se desintegra;
- ❖ O eletrodo se desgasta levemente;

4. Ejeção do material fundido:

- ❖ Evacuação das partículas metálicas pelo fluxo do dielétrico.

Na máquina de eletroerosão, a ferramenta é avançada em direção à peça, ambos mergulhados num líquido isolante, ou fluido dielétrico como é mais conhecido. A ferramenta é carregada positivamente e a mesa e a peça são negativas (ou vice-versa). Uma série de pulsos voltaicos é aplicada entre os dois eletrodos, que são separados pela fenda de trabalho (*"gap"*), numa distância em torno de 0,01 a 0,5 mm (McGEOUGH, 1988).

À medida que o eletrodo-ferramenta, carregado com um potencial de alta voltagem, se aproxima da peça, forma-se um intenso fluxo eletromagnético e o fluido tornassem gasosos rompendo suas propriedades isolantes. O fluido dielétrico é integrado ao processo. Ele fornece isolamento contra descargas prematuras, resfria a área isolada, e remove os detritos (GUITRAU, 1997).

O processo de quebra do dielétrico é um evento localizado: ele ocorre num canal de raio, aproximadamente, 10 μm (McGEOUGH, 1988).

Quando os elétrons e os íons positivos alcançam o ânodo e o cátodo, eles liberam sua energia cinética na forma de calor. Temperaturas de aproximadamente 8000 a 12000º C e fluxos de calor de até 1017 Wm^{-2} podem ser atingidos. Devido à evaporação do dielétrico, a pressão no canal de plasma sobe rapidamente a valores de até 200 atm. Porém, no final do pulso, quando a voltagem é removida, a pressão também cai repentinamente, e o metal superaquecido é evaporado explosivamente (McGEOUGH, 1988).

À medida que a ação procede, o canal do plasma aumenta de largura, e a densidade da corrente através da fenda de trabalho (*"gap"*) intereletrodo diminui. Com

a fração da corrente em função da diminuição dos elétrons, as contribuições dos íons positivos aumentam, e proporcionalmente mais metal é então erodido do cátodo. A erosão de metal do cátodo pode ser de até 99,5%, sendo o desgaste do ânodo mantido a 0,5%. Em usinagem por descargas elétricas (EDM), portanto, o eletrodo-catodo é transformado na peça e o ânodo torna-se a ferramenta (McGEOUGH, 1988).

Na Figura 3.3, é apresentado um esquema dos principais elementos construtivos de um equipamento usinagem por descargas elétricas (EDM).

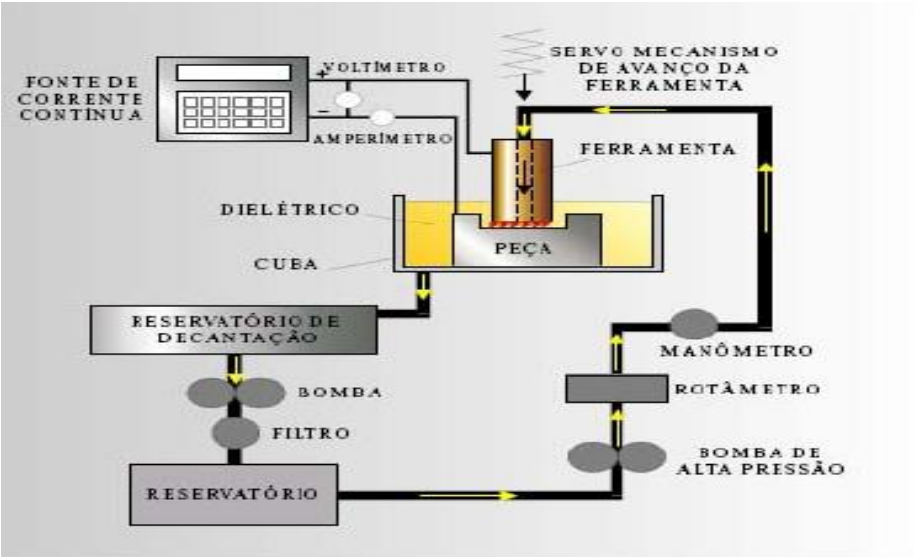

Figura 3. 3 Esquema dos principais elementos construtivos de um equipamento de usinagem por descargas elétricas (EDM) (ARANTES, 2001).

3.1 PRINCIPAIS VARIÁVEIS DO PROCESSO

A seguir serão vistas as variáveis e como elas afetam direta ou indiretamente o processo. (RAMASAWMY e BLUNT, 2004):

3.1.1 Polaridade

Máquinas EDM por penetração podem usar tanto polaridade positiva quanto negativa, dependendo mais da aplicação, mas a maioria das operações é realizada com a ferramenta positiva. Polaridade positiva vai usinar mais lentamente que polaridade negativa, mas é usado na maioria das vezes para proteger a ferramenta de um desgaste excessivo (HO; NEWMAN, 2003). Em EDM, o eletrodo pode ser tanto positivo quanto negativo. A polaridade pode afetar a velocidade de remoção de material, ou melhor, Taxa de Remoção de Material (TRM), o acabamento e a estabilidade das descargas (GUITRAL, 1997).

Na Figura 3.4 Uma visualização da sequência de usinagem é apresentada onde estão esquematizados os detalhes da sequência dos vários momentos dentro de um pulso elétrico, com duração está em torno de microssegundos a alguns milissegundos. Nesse intervalo de tempo, ocorre a abertura do arco elétrico, a formação do canal de plasma, o fechamento do arco e a implosão de partículas retiradas principalmente da peça. Sendo que o fechamento do arco é o responsável pela implosão, importante para retirada de partículas do par ferramenta-peça no processo EDM (CRUZ; MALAQUIAS; FERNANDES, 1999).

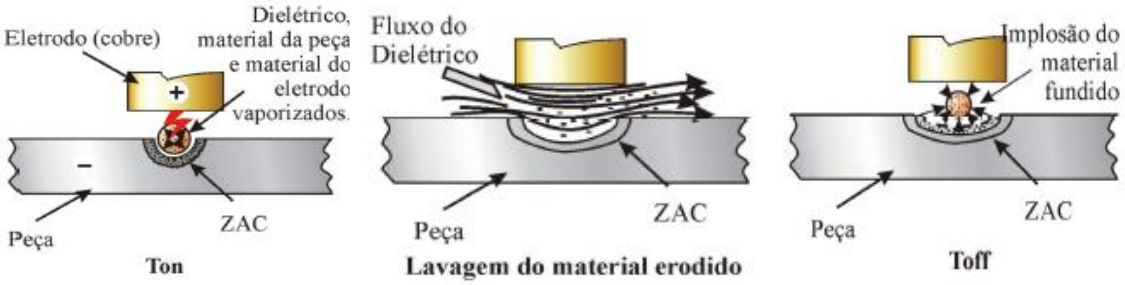

Figura 3. 4 Sequência dos 3 momentos principais de uma descarga unitária (Ton, Toff e lavagem do material erodido) (CRUZ; MALAQUIAS; FERNANDES, 1999).

3.1.2. Regime de operação

O que caracteriza o regime de corte é a potência elétrica P = VI (voltagem × corrente) e a duração do pulso elétrico. Têm-se maiores TRM para maiores potências e durações de pulso. Melhores acabamentos são obtidos com menores potências e menores durações de pulso. Sobre a RD pode-se dizer que também aumenta no mesmo sentido da TRM, na maioria dos casos experimentados. (ARANTES, 2007.)

3.1.3. Corrente

Maiores correntes são usadas em cavidades ou detalhes com grandes áreas de superfície. Quanto maior a área da superfície, maior a força ou corrente a ser aplicada pela descarga. A corrente elétrica é a quantidade de "força" usada na descarga de usinagem. Tanto em aplicação por penetração quanto a fio, a intensidade de corrente máxima é governada pela área da superfície usinada. (ARANTES, 2007)

Para aplicação de penetração, a máxima intensidade de força ($I_{máx}$) é aproximadamente 0,1 ampères por milímetro quadrado da seção do eletrodo. Essa fórmula simples pode ser baseada na área superficial (A_{sup}) do eletrodo multiplicada pela constante 0,1. (ARANTES, 2007)

Por exemplo, a máxima amperagem para um eletrodo quadrado de 10 mm de lado poderia ser calculada pela elevação desse numero ao quadrado $(A_{sup})^2$ e multiplicar esse número pelo 0,1. Essa fórmula é mais próxima da realidade para formas menores e especialmente ferramentas de grafite, que podem aceitar correntes maiores sem danos excessivos. (ARANTES, 2007)

3.1.4. Frequência

Frequência é a medida usada para determinar o número de vezes que a corrente passa de ligada a desligada na unidade de tempo. Para operações de desbaste, o T_{on} é geralmente estendido para se obter altas TRMs e, desde que haja alguns ciclos por segundo, essa poderia ser uma regulagem de baixa frequência. Em operações de acabamento, nos quais se tem T_{on} e T_{off} bem pequenos tendo-se assim vários ciclos por segundo e poderia ser considerada uma regulagem de alta frequência. Muitas vezes pode-se realmente escutar uma mudança de frequência ao se alterar os tempos T_{on} e T_{off} durante a usinagem. As Figuras 3.5 a 3.7 mostram as formas das superfícies usinadas por EDM, de modo simplificado, em diferentes frequências, e os efeitos representativos no perfil superficial (GUITRAL, 1997).

A Figura 3.5 mostra que o acabamento com T_{on} longo é bem grosseiro. Isso é devido ao fato de que longa duração da descarga é suficiente para fundir uma grande cratera. Isso torna a camada refundida mais espessa com uma Zona Afetada Pelo Calor (ZAC) mais profunda. Fazendo-se necessário outras operações de acabamento para eliminá-la, caso contrário prejudicara a integridade da superfície usinada (GUITRAL, 1997).

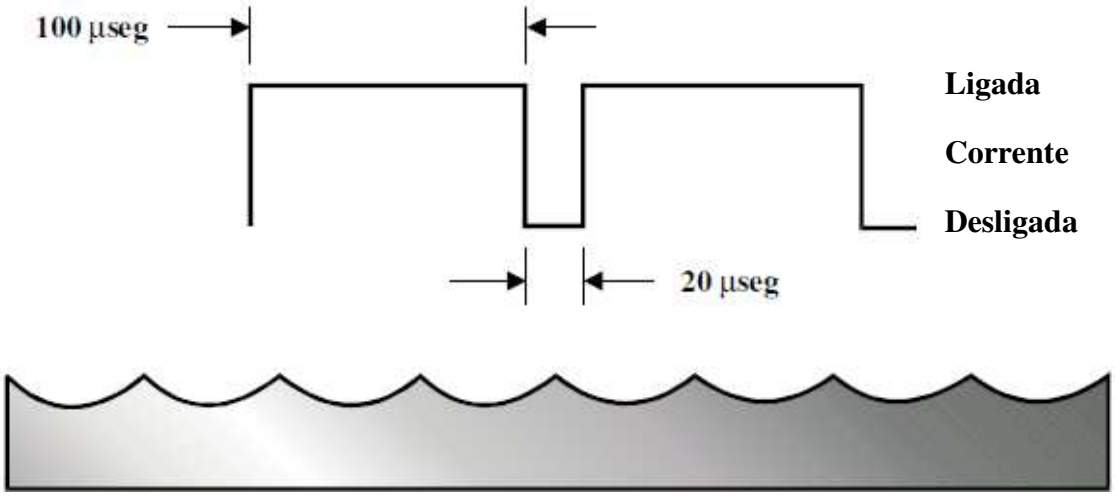

Figura 3. 5 Baixa Frequência/Desbaste (GUITRAL, 1997).

Na Figura 3.6, a duração da descarga cai, produzindo crateras menores e menos material fundido. O acabamento é melhorado, mas a velocidade de usinagem vai diminuir, e no caso de EDM por penetração, o desgaste da ferramenta vai aumentar.

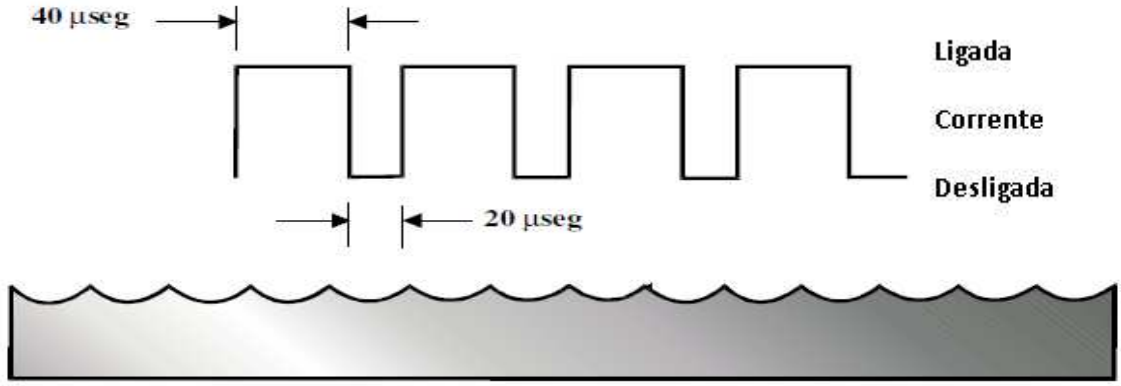

Figura 3. 6 Frequência Moderada/Semi-acabamento (GUITRAL, 1997).

A Figura 3.7 apresenta a característica da superfície em operações de acabamento. São realizadas mais descargas na mesma unidade de tempo isso resulta em menor duração das mesmas e com menor intensidade, isto resulta em pouco material erodido, como se pode ver pelas pequenas crateras. Diminuindo-se a força e o T_{on} antes de se obter a forma final (GUITRAL, 1997).

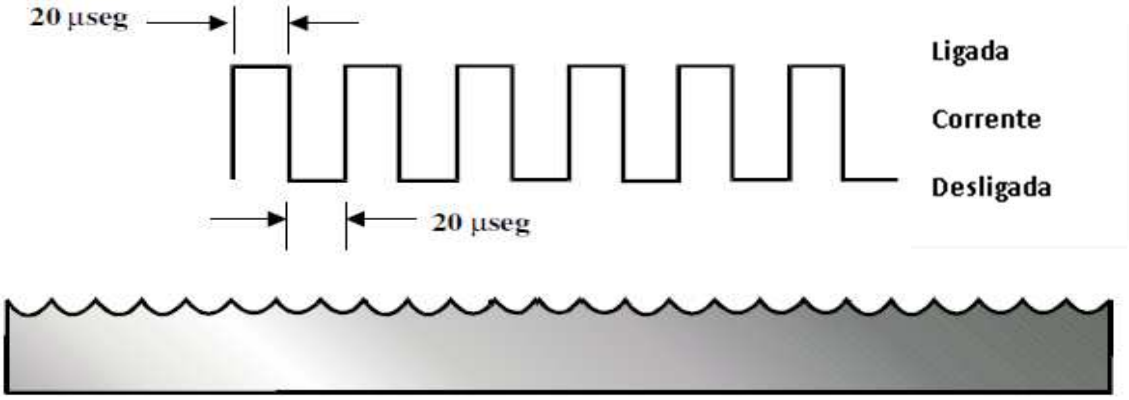

Figura 3. 7 Alta Frequência /Acabamento (GUITRAL, 1997).

3.1.5 Gap

A medição do "gap" é importante no sentido da utilização prática da tecnologia. O dimensionamento dos eletrodos e seu posicionamento na peça levam em consideração o "gap" formado no processo. Segundo SCHUMACHER (2004), existem "gap's" medidos on-line e o "gap a", medido com fenda de trabalho limpa. Todos são complicados de se medir, sendo que os primeiros dependem de equipamentos especializados e são muito influenciados pelas condições na fenda; e o "gap a" é altamente influenciado pela rugosidade e sua medição depende de se interromper o processo.

3.1.6 Tempo de onda ligado (T_{ON})

O tempo de onda ligado, comumente denominado de T_{ON} é o tempo durante o qual a faísca possui energia elétrica. Este valor é inserido diretamente na máquina e se situa na faixa de alguns microssegundos a alguns milissegundos (BENEDICT, 1987). O aumento de T_{ON} normalmente leva a um aumento da taxa de remoção, a uma piora da qualidade superficial e subsuperficial e na diminuição do desgaste do eletrodo (GUITRAU, 1997; BENEDICT, 1987).

3.1.7 Tempo de onda desligado (T_{OFF})

O tempo de onda desligado, denominado T_{OFF}, é o tempo necessário à estabilização do ambiente no "gap", incluído o tempo de explosão da bolha de gases, após o tempo de corrente ligada. Pode afetar drasticamente a velocidade do processo, mas é fundamental para a estabilidade deste (GUITRAU, 1997).

O T_{OFF}, segundo GUITRAU (1997), não influi no desgaste do eletrodo, uma vez que este ocorre devido à energia disponibilizada apenas durante T_{ON}.

3.1.8 Duty time (DT)

O também chamado Duty factor (MARAFONA, 2007; MOHRI et al., 1995; FONDA et al., 2008) ou Duty cicle (GUITRAU, 1997) ou ainda relação de contato. À (WEINGAERTNER, 1998; AMORIM, 2002) é uma relação entre o T_{ON} e o tempo total do pulso, ou ciclo de uma faísca. É um valor que normalmente é inserido na máquina, mantendo a relação entre T_{ON} e T_{OFF} (ENGEMAC, 2002).

3.1.9 Tempo de retração (R) e tempo de sequência de descargas (U)

Em raras situações práticas, a usinagem por eletroerosão se desenvolve de maneira contínua, sem que exista um período em que o eletrodo retroceda e facilite a limpeza da região da usinagem (WEINGAERTNER, 1998; AMORIM, 2002).

A bibliografia raramente se refere a essa situação de retração. (WEINGAERTNER, 1998; AMORIM, 2002) citam o tempo de retração (R) e tempo de sequência de descargas (U) como sendo os parâmetros a serem definidos durante a usinagem. O tempo de sequências de descargas significa o tempo durante o qual as descargas são disparadas sem que o eletrodo retroceda, seguido pelo tempo de retração, que é o tempo que o eletrodo retrocede, portanto não disparando faíscas.

3.1.10. Ferramental

O ferramental definido como o conjunto que engloba a geometria da ferramenta propriamente dita, o sistema de fixação da peça e o sistema de lavagem. A geometria da ferramenta modifica a velocidade de usinagem e a TRM. Isso se deve ao fato de que quanto maior for a área da ferramenta maior será o volume de material arranca acarretando numa menor velocidade do processo, se comparado com uma ferramenta de área menor e com parâmetros constantes. Ex: um eletrodo maciço x eletrodo vazado (MCGEOUGH, 1998).

Com o uso de máquinas CNC, as ferramentas podem ser elaboradas com formas simples como uma fina haste com extremidade esférica. Com métodos computacionais, é possível obter-se trajetórias definidas, o que viabiliza a obtenção de superfícies complexas, como se fosse uma fresadora CNC. Isto favorece o processo, pois não há a necessidade de se fabricar ferramentas com geometrias não convencionais, que com o decorrer da usinagem requer novas correções de forma (GUITRAL, 1997).

O sistema de lavagem é outro fator de significativa importância no ferramental, tendo várias funções importantes. Uma delas é a de arrastar todo material erodido entre a ferramenta e a peça, garantindo um avanço contínuo da ferramenta. Outra função é a renovação constante do fluido dielétrico na interface, mantendo as características físicas e químicas do mesmo. (MCGEOUGH, 1998)

Essa renovação garante também o resfriamento mais pronunciado através da ferramenta ou peça (WONG; LIM; LEE, 1995). A lavagem interna pode ser feita por sucção ou injeção conforme ilustrado na Figura 2.8. As vantagens de um ou outro sistema dependem de cada caso e deve ser levado em conta não só a geometria da peça, mas também a precisão requerida (BHATTACHARYYA, 1973).

O sistema de fixação da peça também influi na TRM, pois se relaciona com o sistema de lavagem permitindo a passagem do dielétrico em diferentes regiões (CRUZ; MALAQUIAS; FERNANDES, 1999).

Todo o conjunto que compõe o ferramental relaciona-se mutuamente, portanto a escolha de um ferramental adequado ao tipo de trabalho a ser executado, deve levar em consideração todos os fatores envolvidos, para que o processo tenha o melhor desempenho.

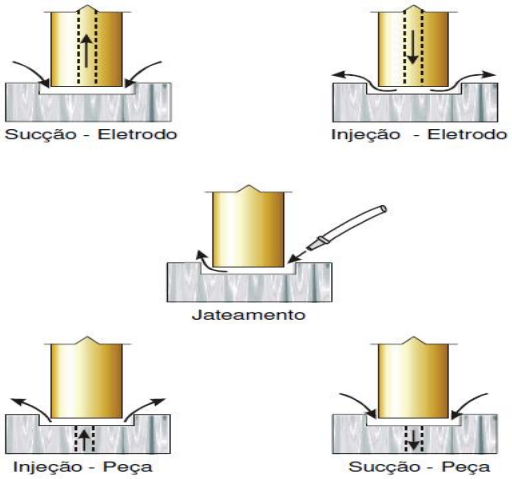

Figura 3. 8 Sistemas de lavagem no processo EDM (CRUZ; MALAQUIAS; FERNANDES, 1999).

3.1.11. Taxa de remoção de material (TRM)

Segundo McGEOUGH (1988), não foi desenvolvido ainda um modelo matemático que expresse com total precisão a taxa de remoção de material (TRM) no processo EDM. Somente dados práticos sobre a TRM têm sido colocados à disposição dos usuários, encontrados em catálogos de fabricantes dos equipamentos EDM, com resultados de pesquisas específicas, cada um utilizando seu equipamento.

É do conhecimento geral que a TRM depende de uma série de parâmetros. Dentre eles, destacam-se (McGEOUGH, 1988):

- As propriedades do material da peça, incluindo o ponto de fusão e o calor latente;
- As propriedades do material da ferramenta, até mesmo os fatores geométricos;
- Os parâmetros de usinagem, dadas principalmente por V e I;
- As características elétricas da forma do pulso de descarga, Ton e Toff;
- O sistema de lavagem;
- O tamanho do “GAP”;
- O fluido dielétrico (propriedades elétricas e térmicas, aditivos, temperatura).

A dificuldade de modelagem ou simulação da TRM é bem complexa e pouco precisa. A seguir cita-se um bom exemplo de tentativa de modelagem matemática que busca ao máximo a aproximação da realidade. (MAMALIS et al, 1987)

- Modelagem matemática:

A forma e o volume da cratera produzida no processo EDM não estão relacionadas somente com a rugosidade, mas podem também ser usadas para o cálculo aproximado da TRM Uma simples aproximação relaciona as dimensões da cratera com medidas no microscópio eletrônico para descobrir quanto foi a remoção de material da peça. Em geral, a TRM, pode ser expressa como (MAMALIS et al, 1987):

$$TRM = n.ft.Vwc\ [mm3/min] \quad \text{Eq. 3.1}$$

Em que Vwc é o volume de metal removido por pulso, ft é a frequência total do pulso, e n é um coeficiente de correção que depende de: inclusão dos pulsos inativos em ft; não observância de atrasos de ignição; utilização de erros estatísticos na estimação das médias das dimensões das crateras no microscópio óptico. Os resultados experimentais assumindo uma cratera esférica dão um coeficiente n = 0,299 ± 17,6%. Veja Tabela 3.1:

Tabela 3.1 TRM experimental e calculada (MAMALIS et al, 1987)

TRM (mm^3/min.) obtida	TRM (mm^3/min.) calculada	n
21	**88,5**	**0,24**
19	**71,9**	**0,26**
52	**220,7**	**0,23**
124	**415,6**	**0,29**
75	**361,1**	**0,21**
54	**181,6**	**0,29**
105	**270,9**	**0,39**
53	**173,7**	**0,30**
119	**356,2**	**0,33**
126	**506,6**	**0,25**

Através da Figura 3.9, verifica-se uma diferença da ordem de 4 vezes entre os valores calculados e os valores obtidos experimentalmente, ou seja, é mantido entre estes resultados uma certa diferença constante, o que demonstra que tal expressão para cálculo da TRM não está totalmente fora da realidade. Falta, portanto, melhoria da expressão de forma a reduzir estes erros.

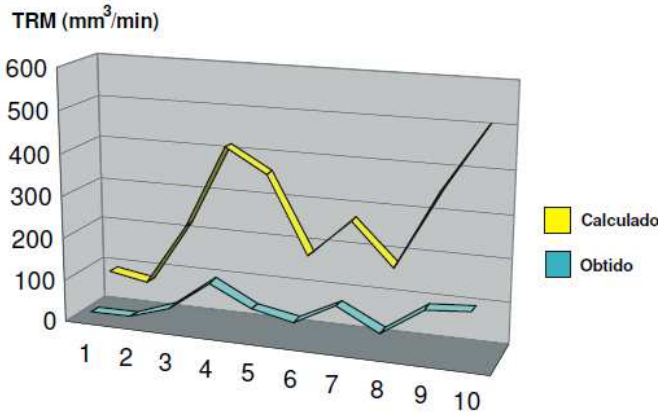

Figura 3.9 Variação da TRM para os valores calculados e obtidos experimentalmente (MAMALIS et al, 1987).

3.1.12. Desgaste volumétrico relativo (DVR)

Material usado para fabricação da ferramenta. O tamanho da cratera produzida na peça é determinado pela energia da descarga e pelo material da peça. Como já foi dito parte dessa energia é aplicada à ferramenta e, assim, é produzida uma cratera também na ferramenta, a qual é igualmente dependente do material da ferramenta e da energia da descarga (FERNANDES, 1999). Para se quantificar a eficiência das ferramentas em diferentes aplicações utiliza-se um índice conhecido como Desgaste Volumétrico Relativo (AMORIM, 2002). Tal como a TRM, o cálculo do Desgaste Volumétrico Relativo (DVR) é altamente complexo e também depende de inúmeros fatores, como os relacionados anteriormente. Influenciam na produtividade bem como os custos do processo EDM

3.1.13. Textura e integridade superficial

Qualquer processo de remoção de material produz alterações superficiais e subsuperficiais na região usinada. Essas alterações influem decisivamente no desempenho da peça em trabalho, o que é agravado quando essas peças estão sujeitas a esforços dinâmicos, ou devem resistir a altos esforços estáticos, além daquelas expostas a ambientes agressivos e altamente corrosivos (FULLER, 1989).

Essas alterações, em geral, se subdividem em alterações nos aspectos de textura superficial e integridade superficial. A primeira refere-se às irregularidades geométricas da superfície e a segunda tem relação com as alterações metalúrgicas superficiais e subsuperficiais da peça após o processo de usinagem. (FIELD et al 1989)

No caso específico do processo EDM, de acordo com FIELD et al (1989), as principais alterações encontram-se esquematizadas na Figura 3.10 Estas alterações decorrem das altas temperaturas geradas no processo e de possíveis reações químicas

que podem ocorrer na microrregião usinada, uma vez que altas temperaturas agem como agente catalisador dessas reações e promovem o aumento do processo de difusão de átomos.

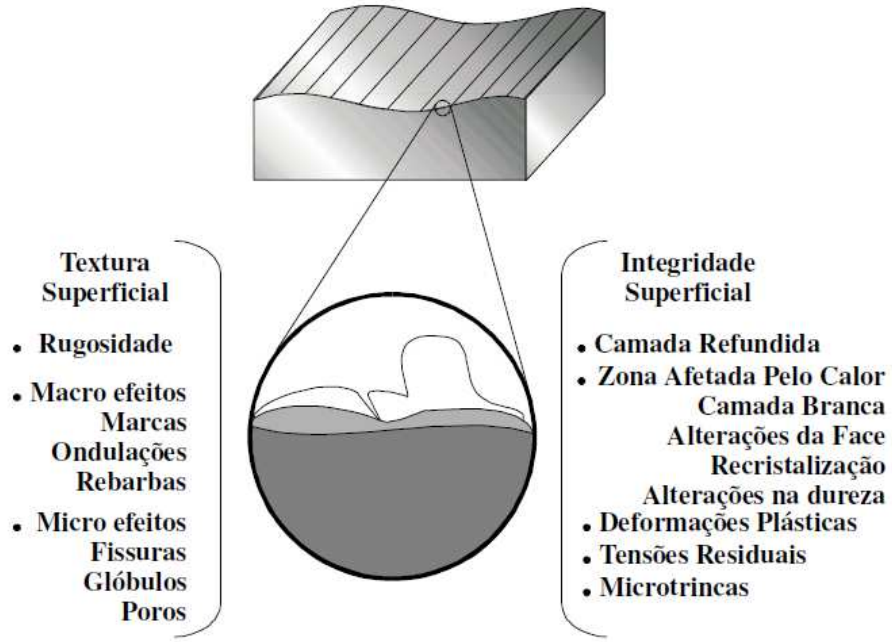

Figura 3.10 Efeitos Superficiais e Sub-superficiais (FIELD et al, 1989)

3.1.14. Camada refundida

A camada refundida é consequência da natureza térmica do processo EDM e, apesar não se tem conseguido sua total eliminação. (FULLER, 1989)

A cratera formada pela descarga geralmente recebe uma determinada quantidade de material fundido em sua superfície devido à tensão superficial e a efeitos de resfriamento. O material refundido chamado de "camada branca" por ser carbonetizado é resultante do resfriamento ocasionado pelas paredes e pelo fluido dielétrico que é refrigerante. Abaixo da camada branca fica a área chamada de "zona afetada pelo calor" (ZAC). Essa área é apenas parcialmente afetada pelas altas temperaturas. A dureza da camada resolidificada e da ZAC, imediatamente abaixo, dependem da corrente e da frequência usadas durante a usinagem, e da capacidade de condução de calor do próprio material. A camada refundida pode afetar a estrutura e/ou a integridade da superfície usinada por EDM (FULLER, 1989).

Pela produção de um tratamento térmico não controlado (aquecimento do metal a uma temperatura muito alta e depois resfriamento em óleo). O calor excessivo quebra as moléculas de óleo em outros hidrocarbonetos e resinas. O metal fundido reage com os átomos de carbono do fluido dielétrico e depois se deposita na camada refundida, criando uma superfície "carbonetizada" está possui características microestruturais

diferentes do material de base. Processo geralmente indesejado que diminui a confiabilidade da peça confeccionado pelo processo. (FULLER, 1989).

Mesmo quando usinando materiais pré-endurecidos, a camada refundida produzida pelo óleo possuirá geralmente dureza mais elevada que o material de base (GUITRAL, 1997).

A camada refundida em dielétricos aquosos é diferente porque os óxidos produzidos pela vaporização da água provocam a diminuição da quantidade de carbono da superfície do material. Por outro lado, átomos de cobre da ferramenta podem ser assimilados pela superfície exposta do material da peça, contribuindo para um processo de diminuição da dureza da superfície em relação ao material de base. Em materiais ferrosos, a superfície usinada pode ter dureza menor que o material de base (GUITRAL, 1997).

4. FLUIDO DIELÉTRICO

O fluido pode ser querosene, hidrocarbono aditivado – ambos derivados do petróleo – água deionizada e até mesmo certas soluções aquosas. Importante para o desempenho do processo EDM, pois atua diretamente em vários aspectos da usinagem. Tais como: controlar a potência de abertura da descarga promove a lavagem da interface ferramenta-peça (“gap”), arrastando para fora as partículas erodidas e auxilia no arrefecimento do sistema, ambas são importantes para o desempenho otimizado do processo, pois uma capacidade adequada permite um resfriamento relativamente rápido das partículas erodidas, evitando-se assim um aumento de partículas que voltarão a se solidificar e integrar o material constitutivo da camada refundida, sendo o grande responsável pela presença de uma camada refundida mais ou menos profunda o que acaba por ser muito prejudicial à integridade superficial da peça. (FULLER, 1989)

BENEDICT (1987) diz que das três funções, a primordial para a eficiência do processo é a lavagem dos produtos gerados no corte que são partículas de metais e os resíduos de carbono, resultantes do fracionamento, evitando curtos circuitos e ou uma baixa taxa de remoção pela estagnação do fluido dielétrico. Essa interferência representa em termos práticos, uma diminuição das Taxas de Remoção de Material (TRMs), já que quanto maior a presença de tais partículas de metal e carbono, mais frequentes serão as operações de recuo automático realizado pela máquina, e maiores os cursos desses recuos. Uma lavagem mais eficiente da cavidade que está sendo erodida, proporcionara um aumento na qualidade da superfície usinada.

4.1 PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS FLUIDOS DIELÉTRICOS

Para bem cumprir suas funções, o fluido dielétrico deve ser avaliado principalmente em relação às seguintes propriedades ou fatores, como ilustra a Figura 4.1 (ARANTES, 2001):

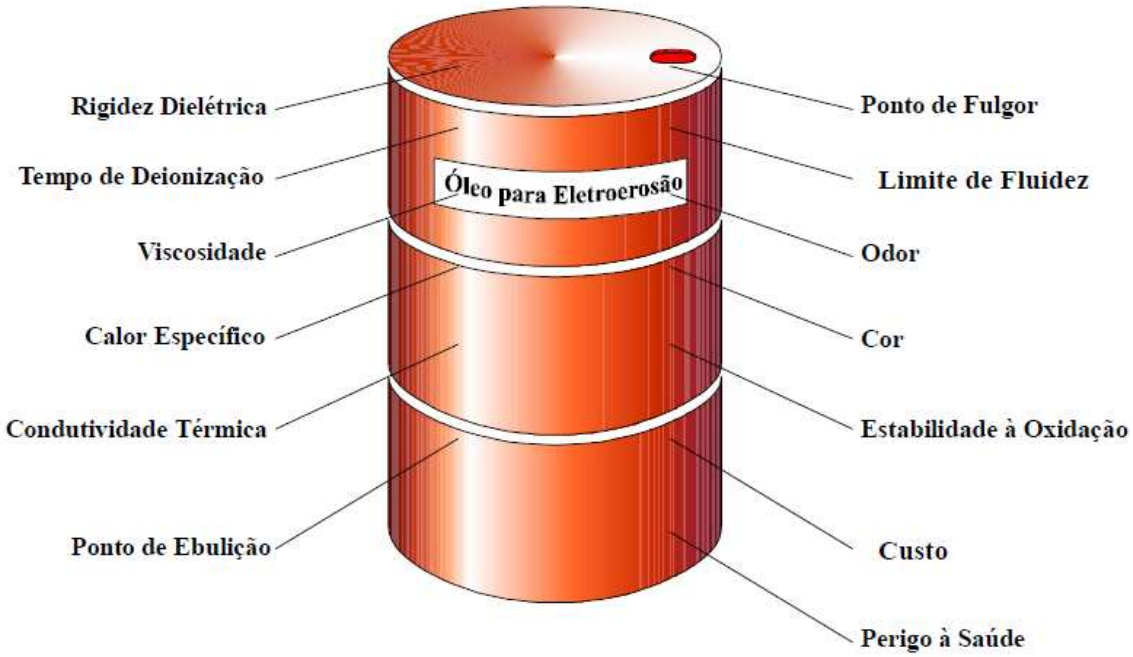

Figura 4.1 Características importantes na seleção de um fluido dielétrico para EDM (ARANTES, 2001).

Rigidez Dielétrica: Rigidez Dielétrica, ou Resistividade Dielétrica é uma medida da capacidade de insulação de um dado fluido para EDM. Maior rigidez dielétrica implica em menor distância entre ferramenta-peça, com o consequente aumento da precisão da usinagem. Alta rigidez dielétrica ajuda a minimizar o arco e é frequentemente tida como indicadora do desempenho do processo EDM. Entretanto, torna-se pouco importante, pois, assim que o fluido é usado, ele é contaminado com as partículas sólidas do processo, alterando significativamente esse valor (ARANTES, 2001).

Tempo de Deionização: Um dos fatores que implicam em altas TRM's é o tempo de deionização. Este refere-se ao tempo para íons e elétrons se recombinarem depois de uma descarga. Quanto menor é o tempo de deionização, menor é o tempo T_{off} necessário entre os pulsos subsequentes. Esta característica faz com que se evitem curtos-circuitos. (ARANTES, 2001)

Viscosidade: É uma medida da resistência ao escoamento do fluido. Quanto menor for a viscosidade, melhores serão as características de escoamento, apesar de alta viscosidade poder proporcionar bom desempenho em alguns tipos de operações de desbaste, ela prejudica a expulsão dos produtos da erosão da interface ferramenta-peça. Para pulsos de pequena energia é aconselhável uma baixa viscosidade do dielétrico para maior eficiência do processo. É recomendada também no caso onde se requeiram boa tolerância dimensional e em usinagem de acabamento onde se necessita que o fluido circule com facilidade por folgas e orifícios diminutos (Intech EDM, 1996).

Calor Específico: Quanto maior, mais energia térmica é acumulada sem elevação na temperatura, o que aumenta o rendimento do processo e a vida do fluido dielétrico. A elevação da temperatura aumenta a difusão de átomos da peça para o fluido e vice-versa, o que pode causar alterações significativas na estrutura do material usinado, além do aparecimento de uma maior quantidade de micro trincas causadas pelo calor excessivo (FERNANDES, 1999).

Condutividade Térmica: Quanto maior, menor é o tempo necessário para solidificar e refrigerar as gotas de metal expelidas da zona de erosão. Isto reduz a possibilidade de partículas se aderirem ao eletrodo ou redepositarem na superfície da peça. Estas duas características (calor específico e condutividade térmica) aliadas proporcionam alta capacidade de refrigeração, preservando a integridade da estrutura metalúrgica do material da peça durante a operação. (FERNANDES, 1999).

Ponto de Ebulição: Quanto maior o ponto de ebulição do dielétrico, este se mantém mais estável em temperaturas elevadas sem perder suas propriedades originais, perdendo frações menores de componentes pela evaporação seletiva das frações mais voláteis. Quanto menos o fluido dielétrico absorver os produtos gasosos da erosão ou dissolver seus produtos sólidos, mais tempo será capaz de manter suas propriedades originais. O fluido dielétrico e seu vapor, bem como os produtos resultantes das descargas elétrica no fluido, não devem ser tóxicos ou irritantes ao operador (Intech EDM, 1996).

Ponto de Fulgor: é uma medida da volatilidade do fluido e é a máxima temperatura na qual um fluido irá suportar antes de uma combustão momentânea, ou um "flash", quando na presença de uma ignição. Como regra, quanto maior for o ponto de fulgor, mais seguro será a operação de usinagem. Um alto ponto de fulgor dará maior segurança operacional diminuindo os riscos de incêndios tanto no manuseio quanto na estocagem (Intech EDM, 1996).

Limite de Fluidez: Limite de Fluidez ou Ponto de Fluidez é um indicador da capacidade que o fluido tem de escoar livremente a baixas temperaturas. A temperatura indicada é a mais baixa na qual o fluido pode escoar. Essa característica pode ser um fator importante em climas mais frios (abaixo de 0°C) se seu local de armazenamento não possui aquecimento nos finais de semana ou se o mesmo é estocado em locais abertos o que não é o caso do Brasil. No Brasil, particularmente, essa característica não tem importância alguma, servindo somente como título de informação (Intech EDM, 1996).

Odor: Um “odor” pode indicar muitas vezes evaporação excessiva do dielétrico, mas pode também indicar a qualidade do local de trabalho para o operador. A maioria dos fluidos de alta qualidade do mercado são desodorizados ou com odor pequeno mas tolerável (Intech EDM, 1996).

Cor (Saybolt): A escala de Cor Saybolt é usada para descrever a cor de fluidos dielétricos para eletroerosão, usando valores numéricos de +30 até −30; com +30 indicando incolor, ou cor de água, e −30 uma cor de limão, um amarelo pálido. Similar ao odor, a cor não tem efeito particular no funcionamento do fluido no processo EDM (Intech EDM, 1996).

Estabilidade à Oxidação: Quanto maior a estabilidade à oxidação do fluido dielétrico, maior será a duração no sistema EDM esse processo é acelerado pelo calor, luz e reações com metais; e na presença de água, ácidos e contaminantes sólidos.a maioria dos fluidos EDM de alta qualidade apresentam boa estabilidade à oxidação, tanto pela adição de um inibidor quanto pela própria natureza anti-oxidande da base do fluido. Em termos práticos, a maneira como o fluido é manipulado é mais importante para a expectativa de vida do mesmo. Mantendo o sistema o mais limpo possível, usando uma filtragem melhor, e mantendo menores temperaturas de operação são fatores de operação que podem prolongar a vida do dielétrico. O fluido deve ser quimicamente neutro, para evitar a corrosão de partes constitutivas da máquina, bem como não agredir a pele do operador. Devido aos fatores de proteção ambiental, tem crescido a aplicação de soluções aquosas (FERNANDES, 1999).

Custo: Obviamente, custo é um fator importante em qualquer produto usado por uma empresa. Entretanto, é uma falsa economia tentar economizar dinheiro usando produtos que não foram formulados para serem usados no processo EDM como fluido dielétrico. O risco de baixa expectativa de vida, potencial dano à saúde e baixo desempenho dielétrico são grandes. Por outro lado, alto custo não necessariamente corresponde a um melhor desempenho ou melhor qualidade das superfícies usinadas. Fluidos sintéticos são usualmente ésteres que são sintetizados e não provenientes do refinamento de óleos. Esses tipos de fluidos têm aplicação ocasional quando temperaturas muito altas ou outro fator não usual ditar o seu uso. Essas aplicações são bem raras e o custo desses fluidos é muito alto comparando-se com fluidos à base de óleo. (Intech EDM, 1996).

Perigo à saúde: Os efeitos à saúde causados por materiais manipulados têm se tornado um assunto de grande importância nos últimos anos. Muitos esforços têm sido feitos para minimizar os riscos à saúde, graças à legislação trabalhista mais rigorosa, no Brasil e no mundo, visando proteger sempre a integridade física do operador. Apesar de todos os fornecedores recomendarem um grande cuidado no armazenamento e que se evite prolongada exposição, muitos operadores de EDM não usam proteções tais como luvas, máscaras e semelhantes para evitar problemas tais como dermatites, problemas respiratórios e até mesmo sérias intoxicações. Alguns fluidos para EDM tem maior tendência de causar irritações à pele do que outros; principalmente, fluidos tipo solvente com alta concentração de conteúdo aromático ou aqueles que contém certos aditivos. Fluidos sintéticos com menores adições de aromáticos e até soluções aquosas são usados hoje. (Intech EDM, 1996)

De acordo com KÖNIG & DAUW (1998), a maior parte do gás produzido com fluidos sintéticos é vapor de água, que é invisível e, mais importante, não é prejudicial à saúde e não causa problemas ambientais. Particularmente na faixa de desbaste, a substituição por um meio aquoso pode trazer uma maior contribuição para a melhoria das condições no local de trabalho.

Além disso, KÖNIG & DAUW (1998) apresentam que os aumentos na taxa de remoção podem ser muito superiores quando comparados com os fluidos dielétricos à base de óleo, confirmados em testes práticos na usinagem de matrizes de forjamento e de matrizes para fundição sobre pressão. Uma explicação para tal fato reside no efeito de um resfriamento mais pronunciado e por possuírem maior estabilidade térmica, sendo possível aplicar altas correntes mesmo em áreas pequenas. Os referidos autores também concluíram que por proporcionar menor produção de gás no canal de plasma, torna-se mais concentrada a energia do processo, com a consequente melhoria na TRM. A tabela 4.1 mostra os valores das principais propriedades dos fluidos dielétricos.

Tabela 4.1 Especificações Importantes para Fluidos Dielétricos populares no mundo *(Intech EDM, 1996).*

Fluidos	Ponto de Fulgor (°C)	Viscosidade (SUS@40°C)	Limite de Fluidez (°C)
Electro 225	107	32-35	-20
BP180	82	32-35	-45
BP200	90	32-35	-44
BP 200T	106	32-35	-3
Grade 1025*	127	41-44	+7
Commonwealth244	107	32-35	+7
Iono Plus*	117	37-40	-15
Lector 45	135	43-46	+7
Mineral Seal Oil	132	35-45	Vários
Norpar 15	118	35-45	+7
Rustlick EDM 25	80	31-34	-60
Rustlick EDM 30	94	31-34	-60
US 1	118	32-35	+7

***- Hidrocarbonetos Sintetizados; não sintéticos químicos verdadeiros.**

4.2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA

Trocas regulares de filtros assim como prevenção à contaminação por água vai estender consideravelmente a vida do óleo dielétrico pode durar por vários anos dependendo do uso e da manutenção adotada. (GUITRAL, 1997).

Não se deve confundir “coloração do óleo” com “sujeira do óleo” todos os óleos, não importa o quanto são limpos quando novos, tornar-se-ão mais escuros, passando do amarelo bem claro para um marrom com o uso e o tempo. A cor do óleo não necessariamente é um indicador de que ele deva ser substituído. Isso ocorre porque esses produtos sofrem mudanças químicas quando expostos às altas temperaturas. Obviamente, uso de alta amperagem durante a operação de usinagem vai quebrar as moléculas de óleo mais rapidamente e nenhum filtro irá remover essa descoloração do óleo (GUITRAL, 1997).

Para se ter certeza absoluta de quando da necessidade de troca são realizados testes do óleo quanto à acidez, presença de “carvão”, que é um resíduo da usinagem, água, oxidação e outros contaminantes Trocar o óleo dielétrico pode ser muito caro, especialmente em máquinas de grande porte e com sistemas centrais de filtragem. (GUITRAL, 1997).

Após a verificação e se confirmando a suspeita, deve-se drenar o reservatório completamente e remover todo tipo de sedimento. O fluido nunca deve ser descartado no meio ambiente, devendo ser armazenado em tambores ou barris específicos e depositados em local apropriado por questões ambientais e de segurança. (Intech EDM, 1996)

Deve-se reabastecer o reservatório com um óleo EDM de alta qualidade, feito especialmente para esse propósito Caso o sistema dielétrico esteja excepcionalmente sujo ou fora de uso por vários meses, acrescente um pouco de óleo novo para evitar que a bomba possa ser danificada, por exemplo, sofrendo cavitação, e permitir que o fluido circule por aproximadamente uma hora para dissolver e lavar as crostas e filmes de óleo antigo que se formam dentro da tubulação. A maioria dos óleos dielétricos contém alguns solventes ativos, e vai ajudar a limpar as áreas inacessíveis no sistema. (Intech EDM, 1996).

Algumas empresas utilizam querosene desodorizado com sucesso, mas devemos saber que esse produto não foi desenvolvido para esse propósito. Aqueles que o utilizam gostam de sua baixa viscosidade e capacidade de fluidez, mas o querosene possui várias qualidades indesejáveis, tais como baixo ponto de fulgor, alta taxa de evaporação, além de causar grandes irritações na pele e gerando até dermatites. (Intech EDM, 1996).

Em algumas regiões dos EUA, esse tipo de fluido não pode ser utilizado como fluido para EDM. No Brasil, não existem proibições legais quanto ao seu uso, porém, é recomendado que o querosene desodorizado não seja utilizado. (Intech EDM, 1996).

Portanto, além das questões de segurança, essas medidas contribuem também com a produtividade. A utilização de um fluido barato, mas de baixa qualidade pode custar muito mais caro que a diferença de preço para um óleo “premium”, ou seja, um óleo de excelente qualidade. (Intech EDM, 1996).

Resistência à oxidação, viscosidade, resistividade dielétrica, etc., são todos fatores que irão afetar no futuro a produtividade da operação e em todos os casos, queda nas velocidades de corte (TRM), existência de “pittings”, aumento do arco, problemas de filtragem, tornando os custos cada vez maiores. Quando o assunto é fluido dielétrico, uma questão muito importante é a importância do sistema de lavagem, ou fluxo do dielétrico; mas primeiramente deve-se conhecer e entender as características do fluido a ser usado. Todo cuidado durante o projeto da ferramenta e simulação do fluxo pode representar muito pouco se não for usado um dielétrico de qualidade (GUITRAL, 1997).

4.3 PÓS ADICIONADOS NO FLUIDO DIELÉTRICO

KURAFUJI e SUDA (1965) foram os primeiros a analisar a influencia do tempo de uso dos fluidos dielétricos sobre as taxas de remoção de material (TRM'S), perceberam que quanto maior era o tempo de uso maior também era a taxa. Atribuíram esse comportamento a formação de resíduos em concentração especifica; afirmando haver um aumento na resistência do "gap" e consequentemente elevando a estabilidade do processo como um todo. Estas afirmações são justificáveis através da Figura 4.2, que mostra o efeito de propagação da descarga na presença dos resíduos (fragmentos de usinagem).

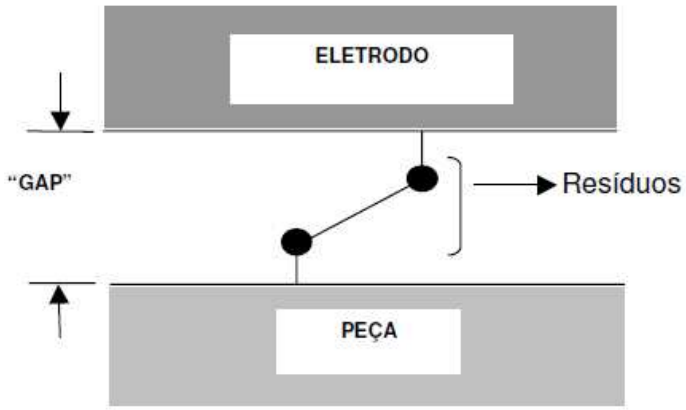

Figura 4.2 Mecanismo de propagação da descarga elétrica (Kurafuji e Suda 1965)

KOBAYASHI (1995) descobriu que pode-se gerar áreas especulares relativamente grandes (acima de 10cm^2) na operação de acabamento, ao se utilizar a adição de pó de silício no fluido dielétrico no processo de usinagem por descargas elétricas promove uma superfície especular com uma área acima de 500 cm^2.

O "gap" relativamente grande garante descargas elétricas estáveis e consequentemente dispersas sobre uma extensa área da peça. A Figura 4.3, mostra a relação entre a distância do "gap" e a dispersão das descargas.

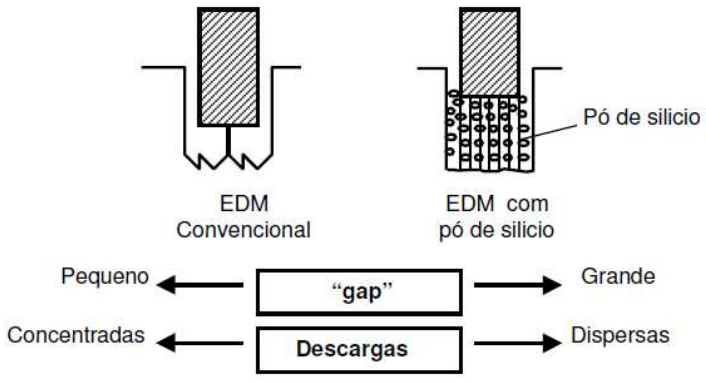

Figura 4.3 Relação entre o "gap" e a dispersão das descargas (KOBAYASHI 1995).

O processo de usinagem por descargas elétricas com fluido misturado com pó de silício permite uma maior dispersão das descargas, além de reduzir a capacitância no "gap" pelo aumento do seu comprimento em aproximadamente 5 vezes em relação a EDM convencional, tornando a superfície mais polida. Em operações de acabamento com o fluido convencional, a distância entre eletrodo e peça é tão pequena, que descargas anormais ocorrem várias vezes. (KOBAYASHI et al, 1989). A figura 4.4 mostra a relação entre rugosidade superficial e área usinada.

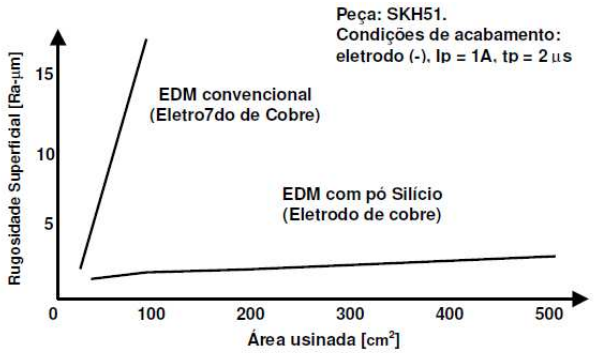

Figura 4.4 Relação entre a rugosidade superficial média (Ra) e a área usinada (KOBAYASHI 1995).

OKADA e UNO (1997), investigaram experimentalmente o efeito da mistura de pó de silício no mecanismo de geração de superfície. Estes analisaram a forma da cratera gerada por uma descarga de um único pulso, o impacto da força agindo na peça e a rugosidade.

Os resultados obtidos por OKADA e UNO (1997), quando estes investigavam as formas das crateras, podem ser visualizados na Figura 4.5. Ao utilizar querosene sem adição de pó, observou-se uma cratera bastante irregular. Por outro lado, com fluido misturado com pó de Si, observou-se uma cratera circular bem definida e com diâmetro menor apresentando-se como extensão de ondas circulares. Nesse caso, a superfície apresentou-se levemente ondulada.

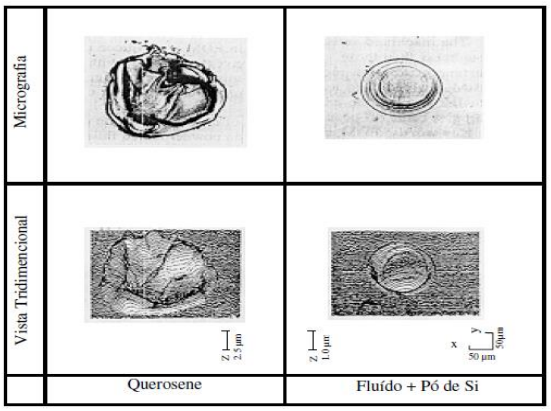

Figura 4.5 Aspecto superficial e vistas tridimensionais das crateras geradas por uma descarga de um único pulso (OKADA E UNO, 1997)

Na Figura 4.6, mostra o aspecto superficial e a secção de crateras geradas no aço SK3 obtida por OKADA e UNO (1997). A parte branca mostrada na superfície da amostra é usualmente denominada de camada branca.

A microestrutura final consiste de martensita, austenita retida e carbonetos não dissolvidos. A mesma figura mostra, que utilizando-se somente querosene, o metal fundido que encontra-se dentro de uma cratera, é impulsionado para os lados devido ao impacto da força da descarga elétrica. No caso da mistura (fluido + pó de Si), esse efeito não foi observado.

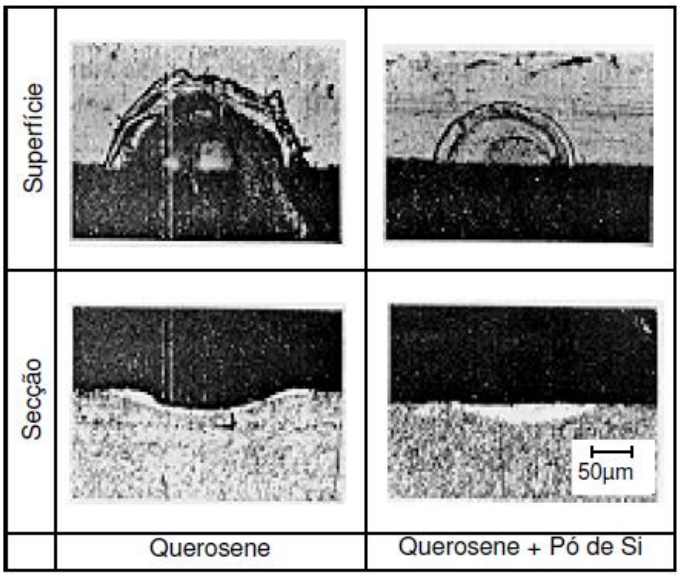

Figura 4.6 Aspecto superficial e secção transversal das crateras obtidas pelo processo EDM (OKADA E UNO, 1997)

Na figura 4.7 apresenta-se o diagrama esquemático da distância entre o eletrodo e a peça quando ocorre a descarga de único pulso sugerido por estes autores. É mostrado na figura, que o "gap" teve um comprimento de 92µm ao se utilizar do fluido misturado com pó de silício, enquanto para querosene a distância foi 17µm sob as mesmas condições. Isto é devido à diferença de resistividade dos fluidos dielétricos e também à influência de detritos em movimento no "gap". Portanto o impacto da força ocorre devido às diferenças de descargas elétricas, que diferem entre os dois casos, por causa da diferença no "gap". (OKADA e UNO, 1997)

Estudos realizadas por OKADA e UNO (1997), mostram que a diferença da propagação de calor entre o metal de base e o carboneto, causado pela rápida elevação da temperatura devido às descargas elétricas, induz o crescimento da trinca. Os mesmos autores julgaram que a rugosidade superficial após a EDM com fluido misturado com pó de silício, depende de como os carbonetos precipitados estão distribuídos no material

da peça, visto que os carbonetos desaparecem devido ao impacto térmico durante a EDM, provocando assim o surgimento de pequenas depressões na superfície.

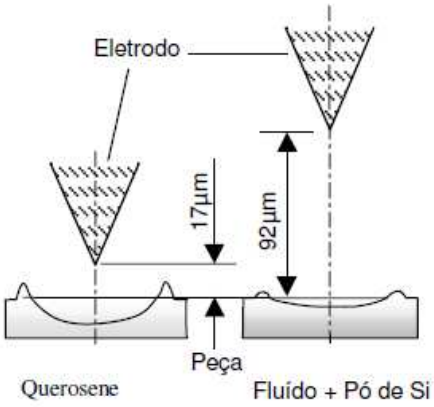

Figura 4.7 Diagrama esquemático do "gap" (OKADA E UNO, 1997).

KOBAYASHI et al. (1989) destacam que a obtenção de uma superfície bem acabada por EDM é dificultada quando a área do eletrodo torna-se grande. Isto se deve à alta capacidade eletrostática da área entre o eletrodo e a peça. Tem-se constatado uma efetiva solução para este problema, pelo uso de eletrodo de silício sinterizado. Este método produz uma superfície finamente acabada e altamente resistente à corrosão e ao desgaste. Porém, como o Si é muito duro e frágil torna-se difícil, portanto, a fabricação de um eletrodo-ferramenta. O próprio autor afirma que a adição de silício no fluido dielétrico é uma solução viável, levando-se em consideração o fato de haver uma grande quantidade de pó de silício fora do eletrodo na região do "gap". Este afeta o acabamento, mesmo com o uso de eletrodo de cobre.

Constatou-se pelos resultados dos experimentos realizados por KOBAYASHI et al (1989), que a utilização de diversos tipos de pós, tais como silício (Si), alumínio (Al) e grafite (Gr), adicionados em um óleo hidrocarbonos é bastante efetiva no sentido de se conseguir um fino acabamento em curto tempo de usinagem. Pós de Al, Gr produzem uma superfície mais uniforme do que uma por Si (Silício) sobre as mesmas condições de usinagem. Isso torna o processo EDM com pós adicionados no fluido altamente atrativo na indústria, uma vez que superfícies com melhores características técnicas podem ser obtidas. Os pós misturados no fluido dielétrico melhoram o acabamento superficial e reduzem a quantidade microtrincas sob a superfície usinada.

KOBAYASHI et al. (1989). Afirmam que em um processo EDM convencional, o tempo de usinagem para a operação de acabamento é extremamente superior a de um desbaste. Portanto, o tempo de usinagem para operação de acabamento é um dos problemas mais importantes no processo EDM. A adição de pó de alumínio no fluido

dielétrico é muito mais eficiente e capaz de melhorar o tempo de usinagem alcançando assim um alto nível de acabamento para um mesmo tempo de operação, quando comparado com o EDM convencional algumas vantagens são obtidas devido a uma maior distância do "gap" durante a produção de uma superfície finamente acabada: facilidade de remoção dos produtos de erosão pela ação lavagem do dielétrico e estabilização da movimentação do eletrodo. Além das vantagens acima, os mesmos autores abordam outras obtidas durante a dispersão descarga que podem ser:

- Produção de uma superfície uniforme;
- Prevenção quanto a ocorrência de descargas de arcos concentrados;
- Redução do tempo de usinagem em regime de acabamento.

De acordo com MING e HE (1995), a resistência à fadiga de uma superfície usinada por EDM é sempre menor que aquela usinada por processos convencionais. Os pós adicionados no fluido dielétrico, podem reduzir a queda de voltagem do fluido dielétrico, aumentar a distância do "gap" e permitir descargas uniformes. Portanto, as tensões térmicas e a formação de microtrincas podem ser reduzidas consideravelmente. Com a adição de pós pode-se reduzir a perda de elementos de liga, porém a quantidade de carbono continua a crescer. Na mesma investigação, os referidos autores obtiveram os outros resultados:

Aumento a quantidade de martensita e reduzir a quantidade de austenita retida e cementita remanescentes na superfície usinada. As descargas atuam em maiores quantidades e a superfície da amostra será aquecida mais uniformemente, com isso tem-se uma camada refundida e resolidificada mais fina e bem distribuída sobre a região usinada, e as trincas serão pequenas e em pouca quantidade.

Devido à existência de mais martensita na camada, propiciando o aumento da microdureza, mudança nas características de ionização e desionização do líquido, permitindo uma grande quantidade de descargas elétricas por unidades de tempo. O aumento na frequência da descarga está diretamente relacionado com a queda da voltagem quando ocorre a descarga elétrica.

Experimentos realizados adicionando-se pó de níquel no fluido dielétrico durante a usinagem de moldes de ligas metálicas de alumínio e bronze mostram que a espessura da camada de material refundido e resolidificado, além de apresentar-se rica em níquel, tornou-se fina e uniformemente distribuída adquirindo uma dureza maior e mais resistente ao desgaste abrasivo, além de ter uma melhora significativa no acabamento superficial. (UNO et al 1997).

5. CONSIDERAÇÃO FINAL

Nos capítulos anteriores foram abordados os princípios do processo de Usinagem por Descargas Elétricas. E também já foi mostrada a importância do fluido e da adição de pó no processo, detalhada suas principais características.

Nesse capítulo, serão analisados seus efeitos em relação à rugosidade superficial nas peças do aço ferramenta usinadas por eletroerosão.

Fazer uma revisão teórica sobre as variáveis com maior influência no processo usinagem por eletroerosão como: material da peça - ferramenta, fluidos de corte, fluidos de corte e dielétricos, operações de acabamento e fino desbaste e a adição de pós no acabamento superficial.

Demonstrar como as variáveis citadas acima se relacionam com a rugosidade e como este acabamento superficial se torna relevante para o desempenho das peças produzidas com o uso desse processo de fabricação mecânica.

Desenvolver e disseminar um estudo que possa servir como referencial aos estudantes, futuros engenheiros, dentro de suas atividades profissionais.

É importante ressaltar que é recomendável o uso de fluidos dielétricos que foram especificamente desenvolvidos para a eletroerosão, como os fluidos parafínicos, pois, infelizmente, óleos minerais ainda são usados e são, sem exceção, cancerígenos.

Portanto, deve-se escolher um fluido que vai ser compatível não somente com a operação a ser realizada, mas, também com seus operadores. Apenas porque “funciona” ou produz superfícies acabadas de melhor qualidade não necessariamente quer dizer que é seguro.

Isso não faz a escolha do fluido a ser utilizado mais fácil ou mais difícil, mas vai reduzir o campo de escolhas consideravelmente.

Quanto às questões de saúde no trabalho, é importante lembrar que os operadores de EDM estão constantemente respirando os vapores emitidos durante as operações e tendo muito contato com a pele.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar outros pós a serem adicionados a um fluido dielétrico no processo de EDM.
- Estudar a rugosidade superficial de peças usinadas pelo processo de EDM.
- Estudar o desempenho de fluidos dielétrico no processo EDM.

REFERÊNCIAS

ABBAS, N. M.; SOLOMON, D. G; BAHARI, MD. F. **A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, n° 47 p. 1214 à 1228. 2007.

AMORIM, F. L. **Tecnologia da eletroerosão por penetração da liga de alumínio AMP 8000 e da liga de cobre CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos**. Tese Doutorado em Engenharia Mecânica. UFSC. Florianópolis. 2002.

ARANTES, L. J. **Desenvolvimento e Avaliação do Processo Híbrido de Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo (AJEDM).** 117 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2007.

ASPINWALL, D.K. et al. **Hybrid high speed machining (HSM): system design and experimental results for grinding/HSM and EDM/HSM**. CIRP Annals Manufacturing Technology. Vol. 50 p. 145-148. 2001.

BEDDOES, J.; BIBBY, M. J. **Principles of metal manufacturing processes.** Elsevier Butterworth-Heinemann. 326 pgs. Massachussetts. 2003

BENEDICT, G. F. **Nontraditional Manufacturing Process**, New York, Marcel Dekker. 1987.

BHATTACHARYYA, A. **New Technology, The institution of Engineers** (India). 1973.

CRUZ, C., MALAQUIAS, E. S. & FERNANDES, L. A., 1999, **Introdução á Usinagem Não Tradicional**, DEEME, UFU, Uberlândia-MG

CUSANELLI G. *et al*, **Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique**. Journal of Materials Processing Technology, n.149, p. 289–295, 2004

DUNIB, N. e S. 1979 *Apud* YOUSSEF, H. A.; EL-HOFY, H. **Machining technology: machine tools and operations.** CRC Press. 633p. Florida. 2008.

ENGEMAC. **Manual de instalação, operação e manutenção: EDM 200 NC e EDM 440 NC**. Caxias do Sul. 2002

FERNANDES L. A. **Efeito da Adição de SiC em Pó no Fluido Dielétrico, Sobre o Desempenho da Usinagem por Descargas Elétricas do Aço-Rápido ABNT M2**, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG. 1999.

FIELD, M.; KAHLES, J. F.; KOSTER, W. P. **Surface Finish and Surface Integrity Machining**,. Metcut Research Associates Inc., Metals handbook – 9 ed: v.16, p. 19-36. 1989.

FIELD, M and KAHLES, J. F. **Review of Surface Integrity of Machined Components**, Metcut Research Associates, Cincinatti, OH. 1982.

FONDA, P. et al. **A fundamental study on Ti-6Al-4V'S thermal electric properties and their relation to EDM productivity**. Journal of materials processing technology. Vol. 202; p. 583 à 589. 2008.

FULLER, J. E. **Electrical Discharge Machining**. Metals Handbook, 9ª Ed. Vol.16, Machining. . 1989.

FUKUZAWA, Y. et al. **Electrical discharge machining properties of noble crystals**. Journal of Materials Processing Technology Vol. 149; p. 393 à 397. 2004.

GUITRAL, E. P. **The EDM Handbook**. Hansen Gardner Publications. Cincinnati, OH. 306 p. 1997.

HAN, F.; KUNIEDA, M. **Development of parallel spark electrical discharge machining**. Precision Engineering; Vol. 28, p. 65 à 72. 2004.

HO, K.H.; NEWMAN, S.T. **State of the art electrical discharge machining (EDM)**.International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 43 p. 1287 à 1300. 2003.

INTECH EDM. **A Guide to Understanding and Selecting EDM Dielectric Fluids.** Broadview, IL, 1996.

KIYAK, M.; ÇAKIR, O. **Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel**. Journal of Materials Processing Technology Vol. 191 p. 141 à 144. 2007

KÖNIG & DAUW, D. F. **Estudo de um Sistema por Penetração em Meio Aquoso.** São Paulo, Revista Máquinas & Metais, Aranda Editora – Ano XXXIV, nº. 395, p. 20-27, 1998

KOBAYASHI, K. et al. **EDM by Powder Suspended Working Fluid**. Toyota Technological Institute and Mitsubishi Electrical Corporation, Nagoya/Japan. 1989.

KOBAYASHI, K**. The Present and Future Developments of EDM and ECM**. ISEM XI International Symposium for Electromaching, Lausanne. 1995.

LEE L.C., LIM, L. C., NARAYANAN, V. e VENKATESH V. C. **Quantification of Surface Damage of Tool Steels After EDM.** International Journal Tools Manufacture, p. 359-372, vol. 28, nº 4. 1987.

MEDEIROS, J. T. N. **Aspectos Termodinâmicos do Processo de Usinagem por Eletroerosão**, VIII COBEM, S. J. Campos, SP, 1985.

MAMALIS, A. G, VOSNIAKOS, N. M. e VAXEVANIDIS N. M. **Macroscopic and Microscopic Phenonena of Electro-Discharge Machined Steel Surfaces: An Experimental Investigation.** Journal of Mechanical Working Technology, nº 15, pg. 335 – 356. 1987.

MARAFONA, J. **Black layer characterisation and electrode wear ratio in electricaldischarge machining (EDM)**. Journal of Materials Processing Technology, nº 184 p. 27 à 31.2007.

McGEOUGH, J. A. **Advanced Methods of Machining**. Chapman and Hall, London. 1988.

MING, Q. Y. e HE L. Y. **Powder-Suspension dielectric Fluid for EDM**. Journal of Materials Processing Technology, nº 52, pg. 44-54. 1995.

MOHRI, N. et al. **Electrode wear process in electrical discharge machining**. Annals of the ClRP Vol. 44, 1995.

OKADA A. e UNO Y. **Surface Generation Mechanism in Electrical Discharge Machining with Silicon Powder Mixed Fluid**, International Journal of Electrical Machining, N º 2, 1997.

RAMASAWMY, H. e BLUNT, L. **Effect of EDM process parameters on 3D surface topography**. Journal of Materials Processing Technology 148 p. 155 à 164. 2004.

RODRIGUES, J.R.P**. Efeito da Adição de Carboneto de Silício em Pó na Geração de Microtrincas e na Topografia da Superfície na Usinada por Descargas Elétricas do Aço-Rápido ABNT M2**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 1999.

SIMAO, J.; LEE, H.G.; ASPINWALL, D. K.; DEWES, R. C.; ASPINWALL, E. M. **Workpiece surface modification using electrical discharge machining.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 p 212-128. 2003.

SINGH, S.; MAHESHWARI, S.; PANDEY, P. C. **Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials.** Journal of Materials Processing Technology 149 p 272-277. 2004.

TARNG, Y. S.; MA, S.C.; CHUNG, L. K. **Determination of optimal cutting parameters inwire electrical discharge machining**. Int. J. mach. Tools Manufact. Vol. 35. No. 12 p. 1693-1701. 1995.

TSAI, H.C.; YAN, B.H.; HUANG, F.Y. **EDM performance of Cr/Cu-based composite electrodes**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 p. 245 à 252. 2003.

WEINGAERTNER, Walter L. **Tecnologia de fabricação volume 3**. Material didático da disciplina EMC 6316. POSMEC. UFSC. Florianopolis. 301p. 1998.

WONG, Y.S.; LIM, L.C.; LEE, L.C. **Effects of flushing on electro-discharge machined surfaces**. Journal of Materials Processing Technology 48 p. 299 à 305. 1995.