



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**INFLUÊNCIA DOS FLUIDOS DIELÉTRICOS NAS MODIFICAÇÕES  
SUPERFICIAIS DO AÇO ABNT M2 USINADO POR ELETROEROSÃO**

**ANTÔNIO JOSÉ FERRÃO MORGADO**

SISBI/UFU



1000215805

Uberlândia, 29 de junho de 2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MDH  
621.9.04  
1.849J  
TES/mem

**INFLUÊNCIA DOS FLUIDOS DIELÉTRICOS NAS MODIFICAÇÕES  
SUPERFICIAIS DO AÇO ABNT M2 USINADO POR ELETROEROSÃO**

Dissertação apresentada

à Universidade Federal de Uberlândia por:

**ANTÔNIO JOSÉ FERRÃO MORGADO**

como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em  
Engenharia Mecânica

Aprovada por:

Prof. Dr. Alberto Arnaldo Raslan – (UFU) – Orientador

Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello – (UFU)

Prof. Dr. Wisley Falco Sales – (PUC – MG)

Uberlândia, 29 de junho de 2004



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
Av. João Naves de Ávila, 2121 - 38400-902 Fone: 0XX(34)32394149 Ramal 42  
FAX: 0XX(34)32394282 - Campus Santa Mônica - Uberlândia MG



**ALUNO:** Antônio José Ferrão Morgado

**NÚMERO DE MATRÍCULA:** 5012601-3

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Materiais e Processos de  
Fabricação

**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA:** NÍVEL MESTRADO

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:**

*“Influência dos Fluidos Dielétricos nas Modificações Superficiais do Aço ABNT M2 Usinado por Eletroerosão.”*

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Alberto Arnaldo Raslan

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro do Bloco X, Campus Santa Mônica, em 29 de junho de 2004, às horas 09:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME		ASSINATURA
Alberto Arnaldo Raslan, Prof. Dr.	FEMEC / UFU	
José Daniel Biasoli de Mello, Prof. Dr	FEMEC/ UFU	
Wisley Falco Sales, Prof. Dr.	PUC - MG	

Uberlândia, 29 de junho de 2004.

A Deus acima de todas as coisas, a minha querida esposa Ivone, a minha filha Maria Clara, aos meus queridos pais Carlos Morgado e Esmerinda Morgado, aos meus irmãos Paulo e Fatinha, a esposa de meu irmão Paula e seu filho Paulinho.

## AGRADECIMENTOS

Ao órgão financiador da pesquisa CAPES, pelos dois anos de bolsa;

Ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) pela parceria no desenvolvimento da pesquisa, em especial ao professor e orientador Alberto Arnaldo Raslan;

Ao amigo e colega doutorando Luciano José Arantes pelo apoio profissional e pessoal durante o desenvolvimento do trabalho;

Aos estagiários de iniciação científica Silvia do Nascimento Rosa e Jorge Francisco Costa Brasil pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho;

Aos professores, Márcio Bacci da Silva, Rafael Ariza e Evaldo Malaquias pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho;

Aos técnicos Angela Maria da S. Andrade, Eunice Helena Nogueira e da Oficina Mecânica da FEMEC/UFU porque, sem a sua ajuda, não conseguiria realizar este trabalho;

Aos colegas que fazem parte do grupo de pesquisa do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) Leandro Jacomine, Flavio José da Silva e Francisco Francelino Ramos Neto;

À Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), à coordenação e aos professores do Curso de Pós-Graduação pelos conhecimentos compartilhados.

A todos que de algum modo colaboraram para que este trabalho se tornasse realidade.

## SUMÁRIO

<b><i>CAPÍTULO I – Introdução</i></b> .....	<b>01</b>
<b><i>CAPÍTULO II – Considerações Gerais sobre o processo EDM</i></b> .....	<b>02</b>
2.1. Processos não tradicionais de usinagem .....	02
2.2. Princípios do processo .....	03
2.3. Polaridade .....	05
2.4. Material da peça e da ferramenta .....	06
2.5. Flúidos dielétricos .....	07
2.6. Desempenho de flúidos dielétricos .....	10
2.7. Camada refundida .....	11
2.8 Textura e integridade superficial .....	12
<b><i>CAPÍTULO III – Procedimento experimental</i></b> .....	<b>14</b>
3.1. Equipamento .....	14
3.2. Variáveis de usinagem .....	17
3.3. Material e geometria da ferramenta.....	17
3.4. Flúidos dielétricos testados .....	18
3.5. Parâmetros avaliados .....	19
3.5.1. Preparação metalográfica.....	19
3.5.2. Número e comprimentos de trincas .....	19
3.5.3. Rugosidade e morfologia da superfície .....	20
<b><i>CAPÍTULO IV – Resultados e discussão</i></b> .....	<b>21</b>
4.1. Numero de trincas .....	21
4.2. Comprimentos de trincas .....	23
4.3. Espessura da camada refundida .....	25
4.4. Rugosidade .....	27
4.5. Morfologia da superfície .....	28
4.6. Irregularidades dos flúidos aquosos .....	29

<b><i>CAPÍTULO V – Conclusões</i></b> .....	<b>35</b>
<b><i>CAPÍTULO VI – Sugestões</i></b> .....	<b>36</b>
<b><i>CAPÍTULO VII – Referências Bibliográficas</i></b> .....	<b>37</b>

## Índice de figuras

Figura 2.1. Esquema dos principais elementos construtivos de um equipamento EDM .....	3.
Figura 2.2. Fusão do material da peça ( $T_{on}$ ) .....	5.
Figura 2.3. Implosão do material fundido ( $T_{off}$ ) .....	5.
Figura 2.4. Mecanismo de lavagem das partículas (Cruz <i>et al.</i> , 1999) .....	6.
Figura 2.5. Representação esquemática das três camadas distintas no material usinado por eletroerosão.....	12.
Figura 2.6. Efeitos superficiais e sub-superficiais (Field <i>et al.</i> , 1989) .....	13.
Figura 3.1. Esquema de montagem do dispositivo auxiliar de bombeamento de fluido acoplado ao equipamento Engemac 440NC.....	15.
Figura 3.2. Dispositivo auxiliar de bombeamento de fluido acoplado ao equipamento Engemac 440NC .....	15.
Figura 3.3. Detalhes da cuba auxiliar montada no interior da cuba principal. (a) cuba auxiliar no interior da cuba principal fechada; (b) cuba auxiliar no interior da cuba principal aberta; (c) cuba auxiliar com óleo dielétrico; (d) cubas auxiliar e principal com óleo dielétrico.....	16.
Figura 3.4. Geometria da ferramenta de Cobre vazada e de ponta cônica utilizada nos ensaios para avaliação dos fluidos dielétricos .....	18.
Figura 4.1. Número de trincas na seção transversal de amostras usinadas com diferentes fluidos nos regimes de desbaste leve, médio e severo.....	22.
Figura 4.2. Micrografia da seção transversal de amostra usinada com fluido água deionizada no regime de desbaste severo .....	22.
Figura 4.3. Micrografia da seção transversal de amostra usinada com fluido querosene no regime de desbaste severo .....	23.
Figura 4.4. Micrografia da seção transversal de amostra usinada com fluido A no regime de desbaste severo .....	23.
Figura 4.5. Comprimento de trincas geradas na seção transversal de amostras usinadas nos regimes de desbaste leve, médio e severo, para os diferentes fluidos dielétricos.....	24.
Figura 4.6. Espessura de camada refundida na seção transversal de amostras usinadas nos regimes de desbaste leve, médio e severo para os diferentes fluidos dielétricos.....	25.
Figura 4.7. Rugosidade $R_a$ da superfície de amostras usinadas nos regimes de desbaste leve, médio e severo com diferentes fluidos dielétricos.....	28.
Figura 4.8. Morfologias obtidas pelo MEV das superfícies usinadas com fluido A, querosene e fluidos aquosos no regime de desbaste leve .....	30.



Figura 4.9. Morfologias obtidas pelo MEV de superfícies usinadas com fluido A, querosene e fluidos aquosos no regime de desbaste médio .....	31.
Figura 4.10. Morfologias obtidas pelo MEV de superfícies usinadas com o fluido A, querosene e fluidos aquosos no regime de desbaste severo .....	32.
Figura 4.11. Variação da densidade do fluido dielétrico água deionizada .....	33.
Figura 4.12. Variação do tempo de usinagem com o número de furos.....	33.
Figura 4.13. Formação de estalagmite ao usar-se com ferramenta não vazada .....	33.
Figura 4.14. Desgaste irregular da peça (a e b) e do eletrodo (b e c) ao se utilizar o fluido água deionizada .....	34.

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1. Características físicas dos materiais de ferramentas .....	7.
Tabela 3.1. Parâmetros empregados nos testes.....	17.
Tabela 3.2. Composição aproximada do aço-rápido ABNT M2 em (%).....	18.
Tabela 3.3. Características químicas dos fluidos dielétricos .....	19.
Tabela 4.1. Número médio de trincas, com o respectivo desvio padrao (D.P.) e coeficiente de variação, encontrados na seção transversal de amostras usinadas nos regimes de desbaste leve, médio e severo.....	21.
Tabela 4.2. Comprimento médio de trincas, desvio padrao (D.P.) e coeficiente de variação encontrados na seção transversal de amostras usinadas nos regimes de desbaste leve, médio e severo .....	7.
Tabela 4.3. Espessura de camada refundida, desvio padrão (D.P.) e coeficiente de variação, encontrados na seção transversal de amostras usinadas nos regimes de desbaste leve, médio e severo .....	25.
Tabela 4.4. Valores de rugosidade na superfície de amostras usinadas nos regimes de desbaste leve, médio e severo.....	27.

## Lista de Abreviaturas

AD	- Água Deionizada;
AS	- Acabamento Superficial;
ADPI	- Água Deionizada com polaridade invertida;
EDM	- Electrical Discharge Machining;
G + AD	- Glicerina + Água Deionizada;
RD	- Relação de desgaste;
R <sub>a</sub>	- Rugosidade Média Aritmética;
Si	- Silício
SiC	- Carbetto de Silício;
t <sub>on</sub>	- Tempo de duração de cada descarga [μs];
t <sub>off</sub>	- Tempo inativo de cada descarga [μs];
TRM	- Taxa de Remoção do Material;
ZAC	- Zona Afetada pelo Calor;
Z <sub>max</sub>	- Posição máxima da ponta da ferramenta;
Z	- Posição instantânea da ponta da ferramenta;

Morgado, A. J. F., "Influência dos Fluidos Dielétricos nas Modificações Superficiais do Aço ABNT M2 Usinado por Eletroerosão", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, maio de 2004.

## Resumo

O fluido dielétrico utilizado no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) exerce grande influência sobre vários aspectos no comportamento do processo, já que este possibilita diferentes condições de usinagem e de operação. O objetivo principal deste trabalho é o estudo do desempenho de nove diferentes tipos de fluidos dielétricos em três regimes de operação na usinagem por eletroerosão: desbaste severo, acabamento e condição intermediária. Para isto, como material testado, utilizou-se o aço-ferramenta ABNT M2, que apresenta grande versatilidade, combinando excelente tenacidade, dureza e resistência à abrasão. Como eletrodo (ou ferramenta de usinagem), usou-se Cobre eletrolítico. Verificou-se que a utilização de diferentes fluidos dielétricos no processo, mantendo-se constantes todas as demais condições de operações, implicam em comportamentos diferenciados com relação ao número de microtrincas, comprimento das microtrincas e espessura de camada refundida, entre outros aspectos.

Morgado, A. J. F., "The Effect of the Dielectric Fluid in the Surface Modifications of the ABNT M2 Steel Machined by EDM Process". M.Sc. Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brazil, may 2004.

### **Abstract**

The dielectric fluid used on the electrical discharge machining process (EDM) has great influence on the development and spark control of the process because it provides different conditions on the machining operation. The main objective of this work is the study of the performance of nine different dielectric fluids used in EDM in three parameter conditions. This research tested traditional and nontraditional dielectric fluids as deionized water and glycerin. A discuss of the most important factors that can produce changes on performance is presented, especially in terms of finish surface quality. The material used was the ABNT M2 high – speed steel that has great tenacity, hardness and abrasion resistance. Cooper was used as material of the EDM tool, was noticed different performance between the fluids, that includes the number of microcraks, length of microcraks and recast layer.

---

*Keywords: Dielectric fluids, microcraks, recast layer, EDM, machining.*

# CAPÍTULO I

## Introdução

A necessidade de conformar novos materiais como aços-liga, superligas, cerâmicas finas, compósitos, etc., levou ao desenvolvimento de métodos não tradicionais de usinagem. Adicionalmente, novas geometrias e formas complexas e diminutas estão sendo exigidas pelo mercado.

A Usinagem por Descargas Elétricas, Usinagem por Eletroerosão ou EDM (*Electrical Discharge Machining*) é um processo de usinagem que tem por objetivo, usinar peças com formas e características predeterminadas de materiais duros e/ou condutores de eletricidade.

Os fluidos dielétricos especificamente desenvolvidos para o processo são os óleos hidrocarbonetados altamente refinados ou sintéticos. As características físico-químicas dos fluidos para eletroerosão podem ou não influenciar no processo. Um fator de grande importância para a escolha do fluido é a segurança deste quanto ao armazenamento e o uso nas operações de EDM. Um fluido pode até proporcionar uma elevada qualidade no acabamento da superfície usinada e altas Taxas de Remoção de Material (TRM), mas ser nocivo à saúde (Intech EDM, 1996).

Apesar de existirem inúmeras marcas e fabricantes de fluidos dielétricos, não foi encontrada, na literatura consultada, uma análise comparativa sobre o desempenho dos mesmos (Ho and Newman, 2003). Uma exceção é o trabalho desenvolvido por Arantes (2001). O que se tem, na prática é a recomendação para o uso de água deionizada na EDM a fio e a substituição do querosene por óleos dielétricos na EDM por penetração.

O principal objetivo deste trabalho é analisar o desempenho de alguns fluidos dielétricos utilizados no processo de EDM, para complementar informações obtidas em trabalho anterior (Arantes, 2001), com análises relativas à formação de microtrincas (quantidade e tamanho) e espessura da camada refundida. Adicionalmente, será analisado o desempenho de fluidos aquosos, no que diz respeito à velocidade de usinagem, espessura de camada refundida, acabamento superficial, número e comprimento de trincas. Espera-se, desta forma, disponibilizar informações aos fabricantes de fluidos dielétricos no aprimoramento da qualidade dos mesmos e aos usuários, na melhor escolha dos fluidos a serem empregados nos seus equipamentos de EDM por penetração.

## CAPÍTULO II

### Considerações gerais sobre o processo EDM

#### 2.1. Processos não tradicionais de usinagem

Os processos não tradicionais de usinagem diferem dos métodos tradicionais pela forma de energia empregada e pelos mecanismos de retirada de material da peça. Entre esses processos, pode-se citar as usinagens a laser, por EDM, por abrasão ultrasonora, química, eletroquímica, por jato de água, etc. Também é comum a combinação de processos, como a retificação eletroquímica, jato de água abrasivo, fotoquímica, etc. Dentre todos, a EDM é um dos mais disseminados. Ao se selecionar um processo, deve-se levar em conta:

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

O processo EDM apresenta suas maiores aplicações na fabricação de matrizes para estampagem, forjamento, extrusão, fieiras para trefilação, moldes de injeção de plástico e na afiação de ferramentas ultraduras (CBN – nitreto cúbico de Boro e PCD – diamante policristalino), a fim de atender aos processos tradicionais de usinagem ou para o setor de ferramentaria em geral. Os tipos de máquina EDM usados nos dias atuais são dois: por penetração e a fio.

A máquina de eletroerosão a fio difere da EDM por penetração pelo uso de um fio como eletrodo (com diâmetro entre 0,05 - 3,0 mm). Outra diferença é que a peça a ser usinada nem sempre está submersa no fluido dielétrico. Este processo é usado, basicamente, para recortes em chapas ou blocos. Como o processo não requer a fabricação de ferramentas de forma, pois o fio é a própria ferramenta, isto se torna um dos aspectos mais positivos do mesmo, em comparação com a EDM por penetração. O fluido dielétrico é, normalmente, a água deionizada, com baixa viscosidade e um grande poder de refrigeração. As vantagens da baixa viscosidade são as de facilitar a remoção de material, gerar camadas refundidas finas e a de aumentar a precisão no corte da peça. O óleo tem sido preferido, ultimamente, por apresentar menor corrosividade e não exigir o deionizador necessário para produzir a água deionizada. Mas, em virtude do diâmetro do fio usado ser pequeno, a capacidade de conduzir corrente é limitada. Devido a esta limitação, as fontes de eletroerosão a fio raramente são construídas para fornecer mais de 20 A de corrente. As máquinas de eletroerosão à fio quase sempre

trabalham com polaridade negativa, ou seja, o fio é negativo e a peça é positiva. As TRM's são altas e o eletrodo é constantemente renovado. Logo, o desgaste do eletrodo não é considerado.

A máquina de EDM por penetração compõe-se de uma mesa, coluna, base, cabeçote e uma cuba, adaptada à mesa de trabalho. Outros compartimentos específicos da EDM fazem parte do equipamento, como o circuito dielétrico, circuito eletro-hidráulico, que comanda o avanço da ferramenta em relação à peça, e uma fonte de energia pulsada, que controla os parâmetros de energia do pulso e a forma do pulso. O circuito dielétrico é o responsável pela chegada do dielétrico à região de usinagem livre de resíduos de usinagem e funciona com vazão e pressão controladas. As máquinas EDM por penetração podem usar tanto polaridade positiva (ferramenta ligada no polo positivo) quanto negativa, dependendo da aplicação. Mas a maioria das operações são realizadas com o eletrodo positivo.

## 2.2. Princípios do processo

Na figura 2.1 são mostradas as principais partes constitutivas de um equipamento para EDM.

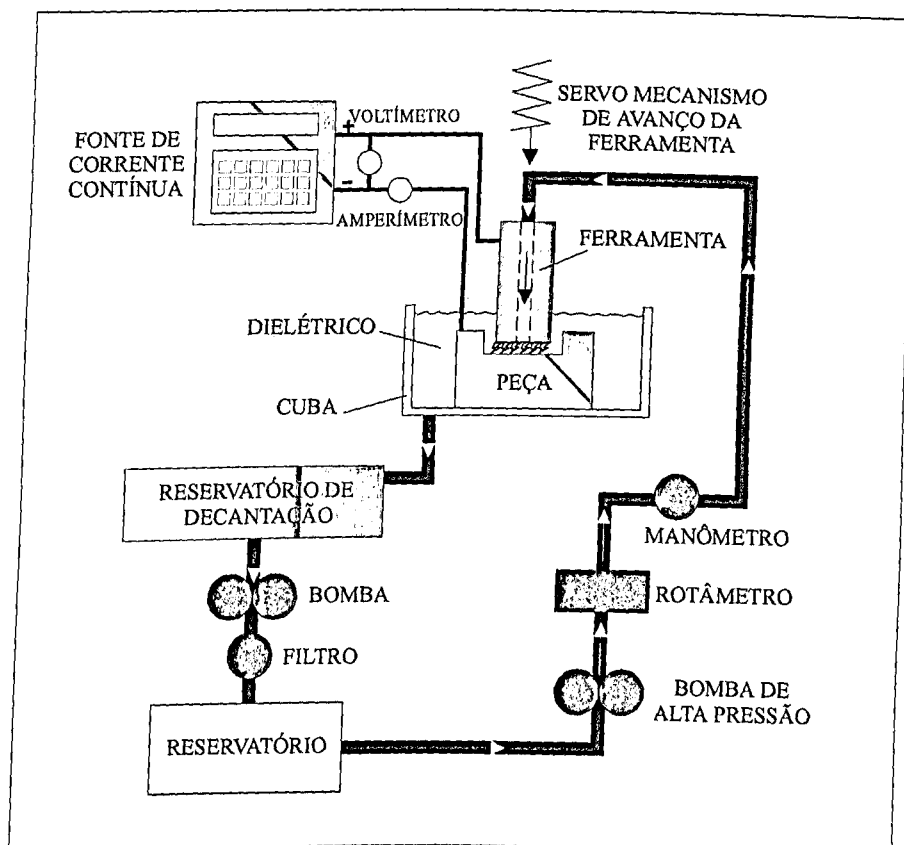


Figura 2.1. Esquema dos principais elementos construtivos de um equipamento EDM



O princípio fundamental do processo EDM é a remoção do material pelo efeito térmico das descargas. Ao se aplicar, através de uma fonte de potência, uma diferença de potencial entre duas placas condutoras de eletricidade, chamadas de eletrodo e peça, separadas por uma pequena distância, ocorre eletroerosão entre elas. É neste espaço entre a peça e o eletrodo que circula o fluido dielétrico, que se torna eletrolítico na forma gasosa. O fluido dielétrico é bombeado e filtrado de um reservatório até a região de usinagem (McGeough, 1988).

No instante da descarga, 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  $1000 \text{ W/m}^2$  e a temperatura até  $15.000^\circ\text{C}$ . Assim, o fluido dielétrico evaporará, tornando-se eletrolítico e no meio gasoso a pressão poderá alcançar as marcas de até 200 atm (McGeough, 1988).

A faísca procura a menor distância entre a ferramenta e a peça. Torna-se, assim, necessário o controle da voltagem entre os eletrodos através da fonte, a qual gera sinal para o servo-mecanismo avançar, de forma automática, a ferramenta em direção a peça. Para controlar esta energia elétrica sob forma de arco voltaico, é preciso que as descargas sejam pulsadas pois, se o arco fosse contínuo, o aquecimento e, conseqüentemente, a fusão e a vaporização da peça seria desordenada. Neste contexto, o dielétrico tem um papel fundamental no processo, por controlar a potência de abertura da descarga.

A descarga elétrica dura alguns milionésimos de segundo e este período é denominado de  $T_{on}$ . Cessada a descarga elétrica inicia-se, por alguns milionésimos de segundo, o período  $T_{off}$ . Nele, ocorrerá a ejeção dos gases eletrolíticos. Os espaços ocupados pelo gás serão preenchidos pelo fluido dielétrico em temperatura muito baixa. Com esse choque térmico, irão ocorrer micro-explosões e o desagregamento das partículas fundidas da peça. Este é o ponto de início do processo de usinagem propriamente dito (Kaminski e Capuano, 1999).

A velocidade de erosão, ou seja, a Taxa de Remoção de Material (TRM) da peça, é o volume de material removido da peça pelo tempo de usinagem, onde a unidade é  $[\text{mm}^3/\text{min}]$ . A TRM depende de uma série de fatores, tais como:

- Intensidade de corrente e tensão aplicada (potência);
- Características físicas do material (ponto de fusão, condutibilidade elétrica, microestrutura, etc.);
- Duração do pulso ( $T_{on}$ ) e da pausa ( $T_{off}$ ), ou seja, a frequência de aplicação da corrente;
- Geometria da ferramenta/eletrodo;

- Material da ferramenta;
- Processo de lavagem;
- Tempo de pausa para limpeza.

### 2.3. Polaridade

A polaridade representa qual lado da descarga é positiva ou negativa. Com isto, pode-se alterar a velocidade de remoção de material, acabamento e estabilidade (Guitral, 1997).

Geralmente, a peça fica ligada ao pólo positivo (ânodo). Ela recebe os impactos dos elétrons, ao passo que a ferramenta, ligada ao pólo negativo (cátodo), recebe os impactos dos íons positivos, sendo estes mais pesados que os elétrons. Porém, os íons positivos têm muito menos energia cinética que os elétrons. Logo, eles transferem uma energia de impacto muito menor à ferramenta. Desta forma, muito menos calor é gerado na ferramenta e menor será a remoção de material. Os pulsos elétricos gerados estão na faixa de alguns microsegundos a alguns milissegundos. Nesta fração de tempo, ocorre a abertura do arco elétrico, a formação do canal de plasma, o fechamento do arco e a implosão de partículas retiradas da peça, principalmente. Aliás, o fechamento do arco é o responsável pela geração da referida implosão, tão importante no processo EDM na retirada de partículas do par ferramenta-peça (Arantes, 2001). O que caracteriza o regime de corte é a potência elétrica e a duração do pulso elétrico. Logo, têm-se maiores TRM's para maiores potências e durações de pulso e melhores acabamentos são obtidos com menores potências e menores durações de pulso. Sobre a Relação de Desgaste ( $RD = \text{desgaste da peça} / \text{desgaste da ferramenta}$ ), pode-se dizer que ela também aumenta no mesmo sentido da TRM, na maioria dos casos. Nas figuras 2.2 a 2.4, estão esquematizados os detalhes da sequência dos vários momentos de um pulso elétrico (Cruz et al., 1999).

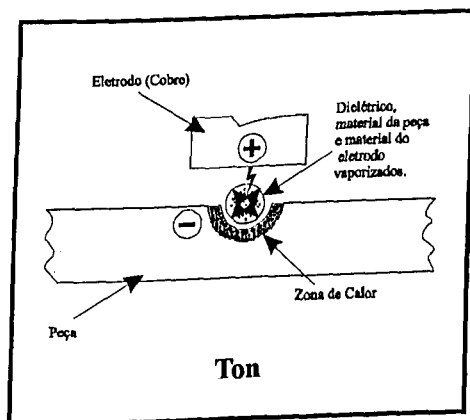


Figura 2.2. Fusão do material da peça ( $T_{on}$ )

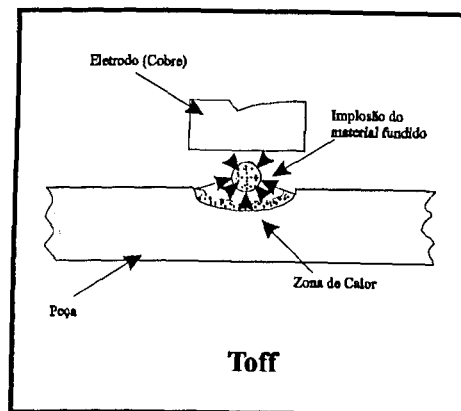


Figura 2.3. Implosão do material fundido ( $T_{off}$ )

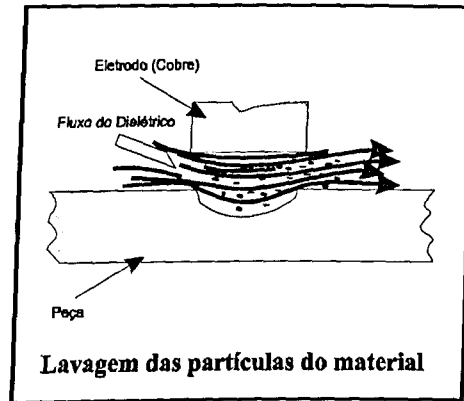


Figura 2.4. Mecanismo de lavagem das partículas (Cruz et al., 1999).

#### 2.4. Material da peça e da ferramenta

Quanto maior for o ponto de fusão e vaporização do material da peça, menor é a TRM, a Relação de Desgaste e a qualidade da superfície. Alguns materiais como Alumínio, Chumbo, Magnésio e suas ligas são fáceis de serem usinados por eletroerosão, por apresentarem baixos ponto de fusão e vaporização. O mesmo não ocorre com o Tungstênio, Titânio, Ósmio e suas ligas, que têm elevados pontos de fusão e vaporização. Outra propriedade do material bastante influente é a condutibilidade elétrica, pois quanto melhor condutor elétrico o material, maior a TRM (Arantes, 2001).

Os melhores materiais para produção de eletrodos são aqueles que apresentam um elevado ponto de fusão e são bons condutores de eletricidade. De um modo geral, os materiais para eletrodos agrupam-se em duas categorias: metálicos e não-metálicos. Entre os materiais metálicos tem-se: Cobre eletrolítico, Cobre-Tungstênio e Cobre sinterizado. Estes materiais caracterizam-se por apresentarem ótimo acabamento e mínimo desgaste durante o processo de eletroerosão. Entre os materiais não-metálicos, o grafite é o principal. Este é um material de fácil usinagem, porém é muito frágil. Os eletrodos de grafite são insensíveis aos choques térmicos, conservam suas qualidades mecânicas a altas temperaturas, praticamente não se deformam e são leves. Entretanto, são abrasivos, não podem ser moldados ou conformados e não são possíveis de sofrerem redução por ácidos (Lima, 1997). Os materiais mais usados como eletrodos em EDM são o Cobre e o grafite, com algumas de suas propriedades mostradas na tabela 2.1.

Os melhores valores são obtidos com o grafite, pelo ponto de fusão mais alto desse material. Mas por se tratar de um material que se contamina com muita facilidade e se apresenta com diferentes porosidades, muitas vezes pode apresentar baixo desempenho

quanto à relação desgaste da peça/desgaste do eletrodo (RD). Por isso, geralmente é utilizado o Cobre, pela sua melhor condutibilidade elétrica (Benedict, 1987).

Tabela 2.1. Características físicas dos materiais de ferramentas.

Propriedades	Cobre	Grafite
Ponto de Fusão [° C]	1083	3727
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	8.9	2.1
Resistividade (μΩcm)	2	10

## 2.5. Fluidos dielétricos

O aumento das exigências tecnológicas e do cumprimento das legislações ambientais, a busca das empresas por certificação ambiental, como as ISO's, têm incentivado as indústrias a buscarem formas de atualizar e otimizar os seus sistemas de gestão ambiental. Com isso, vêm sendo desenvolvidos fluidos dielétricos atóxicos e ecológicos, visando a diminuição de riscos para a saúde do operador e danos ao meio ambiente (Tanio, 2002).

O fluido dielétrico controla a potência de abertura da descarga, promove a lavagem das partículas erodidas e promove o arrefecimento do sistema. O fluido dielétrico pode ser o querosene, água (destilada ou deionizada), glicerina e fluidos à base de hidrocarbonetos. O arrastamento das partículas é de grande importância no processo. Conforme as partículas são erodidas, elas são retiradas e transportadas para fora da região de trabalho. Um melhor arrefecimento permite que as partículas retiradas não se refundam e continuem incorporadas à superfície da peça (Fuller, 1989).

Com a evolução no desenvolvimento dos fluidos, consegue-se obter famílias de fluidos especiais para eletroerosão, em substituição aos fluidos comuns. Pode-se, desta forma, minimizar ou eliminar odores desagradáveis e riscos de incêndio, como é o caso da utilização do querosene e similares.

De acordo com a Intech EDM (1996), as principais características dos fluidos são:

**Rigidez dielétrica:** quanto maior for a rigidez dielétrica, menor a distância entre a ferramenta e a peça. Logo, maior será a precisão da usinagem.

**Tempo de deionização:** consiste no tempo para os íons e elétrons se recombinarem depois de uma descarga. Quanto menor for este tempo, menor será o tempo para pulsos subsequentes. Assim, este é um dos fatores que acarretam em altas taxas de remoção de material.

**Viscosidade:** se o fluido apresenta uma alta viscosidade, a retirada dos produtos de erosão da interface ferramenta-peça é prejudicada. É recomendada, também, uma baixa viscosidade para

os casos que requeiram uma boa precisão dimensional e em usinagem de acabamento fino, onde existe a necessidade do fluido circular com facilidade por folgas e orifícios diminutos.

**Calor específico:** quanto maior for o calor específico, maior será o aporte de energia térmica, sem grande aumento de temperatura.

**Condutividade térmica:** quanto maior a condutividade térmica do fluido, menor será o tempo necessário para solidificar e refrigerar as gotas de metal expelidas da zona de erosão.

**Ponto de ebulição:** quanto maior for o ponto de ebulição do fluido dielétrico, mais estável se mantém o fluido em temperaturas elevadas, sem perder as suas propriedades originais. Há, também, uma perda menor de componentes pela evaporação seletiva das frações mais voláteis.

**Ponto de fulgor:** quanto maior for o ponto de fulgor, maior será a segurança operacional. Com isso, diminuem-se os riscos de incêndios e segurança no manuseio e estocagem.

**Perigo à saúde:** o fluido deve ser quimicamente neutro, para evitar a corrosão de partes construtivas da máquina, como a pintura e tubulações de borracha, bem como não agredir a pele do operador. A maior parte do gás produzido com estes tipos de fluido é vapor de água. Naturalmente, eles não são prejudiciais à saúde e não causam problemas ambientais.

Para executar suas funções, o fluido isolante deve manter a mesma qualidade na operação de campo. Sistemas de filtragem adequados são necessários para reduzir Carbono, água e partículas metálicas, reduzir custo de operação e manutenção, manter a resistência dielétrica do óleo alta e reduzir a degradação do fluido.

Dentre as características que os fluidos devem apresentar, o arrastamento adequado e a capacidade de resfriamento é de grande importância. Um arrastamento adequado é o grande responsável pela presença de uma camada refundida mais ou menos profunda. Um arrefecimento adequado permite um resfriamento rápido das partículas erodidas, evitando-se um aumento de partículas que voltarão a se solidificar e integrar o material construtivo da camada refundida. Caso isso ocorra, a integridade superficial da peça ficará prejudicada (Arantes et al., 2003).

O óleo dielétrico pode mudar as características superficiais do material de base, pela geração de um de tratamento térmico sobre o qual não se tem muito controle. Após o superaquecimento, que é indesejável mas inevitável, tem-se o resfriamento, durante o  $T_{off}$ . As altíssimas temperaturas craqueiam as moléculas do óleo dielétrico, decompondo-o em hidrocarbonetos e resinas. O metal fundido reage com os átomos de Carbono do óleo e, depois, se depositam na camada refundida, criando uma superfície carbonetada. Mesmo quando usinando materiais pré-endurecidos, a camada refundida pelo óleo vai ser geralmente bem mais dura que o material de base (Field et al., 1989).

Superfícies usinadas por dielétrico aquoso podem ser menos duras que o material de base. Isso se deve aos óxidos que são produzidos pela vaporização da água. Essa oxidação, com a eletrólise, pode retirar Carbono, Cobalto e outros átomos do material da superfície. Isso pode fazer da rebarbação uma operação mais difícil no Alumínio, Molibdênio e outros materiais, porque a redução das forças usadas na retirada da camada refundida não pode sempre romper o crescimento da resistência da superfície oxidada. Por outro lado, átomos de Cobre que foram liberados da ferramenta podem ser assimilados pelas partes fundidas do material da peça. Esses átomos podem incorporar-se à camada refundida, contribuindo para um processo de liga não controlado e influenciando no material de base (Guitral, 1997).

A camada refundida na presença de óleo tende a ser mais carbonetada, dependendo da afinidade do material da peça com o Carbono. Na água, o calor da descarga decompõe a água em Hidrogênio e Oxigênio. A superfície externa produzida pela eletroerosão com dielétrico aquoso é tipicamente um óxido do material de base, produzido pela área rica em oxigênio em volta da descarga. Alguns materiais com afinidade com o Hidrogênio, tendem a absorvê-lo. Isso provoca a "fragilização por Hidrogênio", prejudicando a estrutura e a integridade da camada superficial da peça.

Logo abaixo da camada branca encontra-se a chamada "Zona Afetada pelo Calor" (ou ZAC). Essa área foi parcialmente afetada pelas altas temperaturas da eletroerosão. A espessura da camada refundida e da ZAC, imediatamente abaixo, depende da corrente e da frequência usadas durante a usinagem e da capacidade do material de conduzir e transferir calor para fora da área usinada. Dependendo tanto do material quanto das temperaturas atingidas, a ZAC pode ser bem mais dura do o material de base. Tanto a camada refundida quanto a ZAC podem afetar a estrutura e/ou a integridade da superfície eletro-erodida (Guitral, 1997).

Em casos de severa influência superficial ou partes sensíveis estruturalmente, a remoção da camada branca e/ou um tratamento para alívio de tensões de algumas partes pode ser necessária. A redução ou remoção pode ser feita por algum polimento, por usinagem por fluxo abrasivo (AFM) ou usinagem eletroquímica (ECM). A camada refundida, com dureza muito alta e frágil, pode apresentar trincas na superfície usinada. Isso contribui para uma fadiga prematura da peça. Durante anos, esse tem sido um assunto muito importante para a indústria aeroespacial. Entretanto, com os contínuos melhoramentos e refinamentos das fontes modernas de EDM, a aceitação de partes usinadas por eletroerosão por essas indústrias tem se tornado cada vez maior.

Em qualquer caso, EDM por penetração ou a fio, toda usinagem será bem mais rápida usando-se água como dielétrico. O fluxo de água é muito mais eficiente, por ser mais refrigerante e menos viscoso que o óleo. Ao invés de reter calor na região da descarga,

dielétricos aquosos não apenas retiram calor de forma muito mais rápida (e é quase sempre resfriado ou refrigerado), mas também escoa melhor. Isso é porque a água é naturalmente mais fluida que o óleo e produz no processo uma melhor penetração no espaço entre os eletrodos (Guitral, 1997).

Os dielétricos aquosos especiais usados nessas operações de usinagem são muito caros. Pelo fato de evaporarem muito mais rapidamente, devem ser trocados com maior frequência que os óleos dielétricos. Infelizmente, as altas TRM's atingidas com o uso de fluido aquoso no processo EDM por penetração não compensa a alta taxa de desgaste do eletrodo, pobre acabamento superficial e altos custos de operação e manutenção. Esses aspectos negativos têm tornado esse tipo de usinagem proibitiva em termos de custos e a produção de máquinas usando água ao invés de óleo não conseguiu conquistar o mercado mundial.

## 2.6. Desempenho de fluidos dielétricos

O desenvolvimento dos fluidos dielétricos utilizados no processo tem-se tornado cada vez mais importantes para o desempenho do processo em EDM, proporcionando um melhor acabamento, maiores velocidades de usinagem e uma melhor qualidade do trabalho dos operadores (Guitral, 1997).

Field *et al.* (1998), estudando o efeito de meios de trabalho a base de água (Glicerina + água) e dielétricos hidrocarbonetados, verificaram que a refrigeração dos dielétricos a base de água leva a um melhor desempenho do processo de EDM por penetração. Todas as propriedades observadas do fluido a base de água apresentaram melhor rendimento, verificando assim uma taxa de remoção superior quando comparado com outro fluido à base de hidrocarbonetos.

Em um trabalho realizado por Fernandes (1999), foi estudada a adição de pós de Silício e carbeto de Silício (SiC), com diferentes granulações e concentrações, adicionados a três diferentes fluidos dielétricos comerciais. Foram investigadas as taxas de remoção de material, o desgaste de ferramenta e dois aspectos avaliando a qualidade da superfície usinada a espessura da camada refundida e o perfil de microdureza. Os resultados indicaram que a adição de carbeto de SiC é mais benéfica que a adição de Silício nos testes com querosene. Os testes realizados com a adição de SiC, com 15  $\mu\text{m}$  (600 mesh) e na concentração de 30 g/l, indicaram uma melhora significativa nas taxas de remoção de material e desgaste da ferramenta, além de não haver alteração apreciável no perfil de microdureza em comparação com os testes realizados sem adição de SiC.

Rodrigues (1999), estudando o efeito do pó de Silício diluído em 3 fluidos dielétricos, verificou que houve uma melhora da textura superficial de aço ABNT M2, quando comparadas

com as texturas obtidas por EDM convencional. Ele observou, ainda, uma redução nas imperfeições geradas nas superfícies como glóbulos ou partículas esféricas, "chaminés", crateras e trincas resultantes do processo de usinagem com a adição de pó de SiC. Durante o processo de usinagem, verificou-se que a adição de SiC no fluido dielétrico não conduziu a reduções significativas no comprimento médio das microtrincas. Mas, a adição do pó reduziu a densidade de microtrincas, obtendo-se valores relativamente baixos e próximos entre si, em relação à EDM convencional.

Arantes (2003) avaliou as superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão de aço ABNT M2. Este trabalho tinha por objetivo principal o estudo das superfícies usinadas pelo processo de eletroerosão utilizando-se diferentes tipos de fluidos dielétricos em três regimes de usinagem. Foram notadas diferenças importantes quando usina-se com fluidos diferentes, mantendo-se constantes todas as demais condições de operação. Ocorreram grandes alterações na qualidade da peça usinada, variando-se apenas o fluido dielétrico. Porém, a maior conclusão deste trabalho foi a de que o querosene apresentou piores acabamentos superficiais, com grande formação de crateras e trincas durante o processo. Porém, o querosene seria indicado no caso de usinagem de desbaste severo, pois os demais fluidos não obtiveram melhora significativa em relação à este. No regime de desbaste leve, notou-se uma diferença de rugosidade. Porém, nas morfologias os óleos não apresentaram uma considerável diferença visual, enquanto que o querosene mostrou-se com morfologia inferior, com um número muito alto de bolhas de metal redepositado. Através deste trabalho pode-se concluir que os fluidos dielétricos apresentaram uma grande inconsistência no desempenho nos 3 diferentes regimes de usinagem. Isso mostra uma considerável diferença entre os mesmos, apesar de todos apresentarem propriedades próximas, dentro de uma mesma faixa, tal como viscosidade e densidade.

## 2.7. Camada Refundida

No processo de eletroerosão é produzida uma centelha que superaquece a superfície do material dentro do campo de descarga, fundindo-a. Estima-se que a temperatura na região da centelha possa variar entre 12.000°C e 15.000°C (Medeiros, 1985).

O processo de erosão ocorre simultaneamente na peça e no eletrodo. Com ajustes convenientes da máquina, é possível controlar a erosão, de modo que se obtenha até 99,5% de erosão na peça e 0,5% no eletrodo.

As partículas fundidas, desintegradas na forma de minúsculas esferas, são removidas da região por um sistema de limpeza e, no seu lugar, fica uma pequena cratera.



A camada refundida é intrínseca ao processo EDM e, apesar das novas tecnologias empregadas controlarem-na a um grau bem fino, a natureza térmica do processo EDM impede a sua total eliminação. Na figura 2.5 é mostrado a disposição das três camadas distintas de um material usinado por eletroerosão.

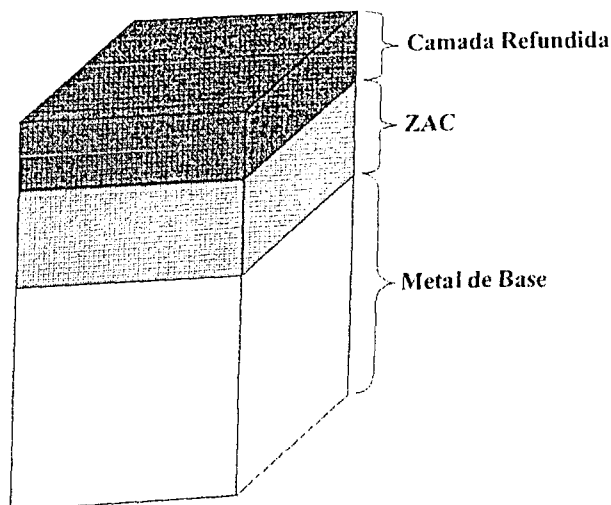


Figura 2.5. Representação esquemática das três camadas distintas no material usinado por eletroerosão.

Após uma descarga, ocorre a formação de uma cratera e uma certa quantidade de material fundido vai se redepositar na superfície da cratera devido à tensão superficial e efeitos de resfriamento. Esse material vai se resfriar devido às paredes frias da cratera e ao poder de refrigeração do fluido dielétrico. Essa camada tende a ser bem carbonetada e é chamada de "camada branca". Abaixo dela fica a chamada "zona afetada pelo calor" (ZAC), onde esta é apenas parcialmente afetada pelas altas temperaturas. A dureza da camada refundida e da ZAC, imediatamente abaixo, dependem da corrente e da frequência usadas durante a usinagem, além 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 (Miller e Guha, 1999).

## 2.8. Textura e integridade superficial

Conforme Fuller (1989), em um processo que envolve a remoção de material são produzidas alterações superficiais e sub-superficiais na região usinada. Alterações estas que influem no desempenho da peça de trabalho, principalmente aquelas que estão sujeitas a

esforços dinâmicos, as que devem resistir a altos esforços estáticos além das expostas a ambientes agressivos. Estas alterações, em geral, se subdividem em alterações nos aspectos da textura superficial e integridade superficial.

Diferentes processos produzem diferentes alterações. Os processos térmicos influenciam bastante nas alterações de fase e nas propriedades delas decorrentes. Os processos mecânicos, em geral, produzem tensões residuais e os processos químicos podem produzir ataques intergranulares (Fernandes, 1999).

De acordo com Field *et al.* (1989), as principais alterações acham-se agrupadas na figura 2.6. Estas alterações decorrem das altas temperaturas geradas no processo e de possíveis reações químicas que poderão ocorrer na micro-região de usinagem.

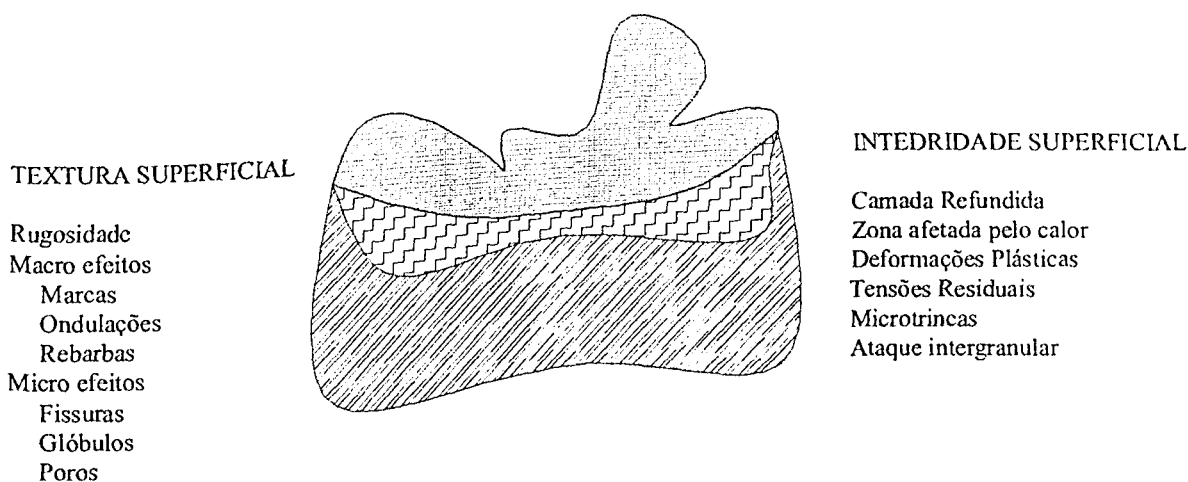


Figura 2.6. Efeitos superficiais e sub-superficiais (Field *et al.*, 1989).

## CAPÍTULO III

### Procedimento Experimental

#### 3.1. Equipamento

As operações de usinagem foram realizadas em um equipamento EDM por penetração modelo Engemac 440NC. Trata-se de um equipamento com gerador de controle de pulso e que opera automaticamente após seleção dos níveis de operações. Os ciclos das descargas são o balanço entre os tempos ativo e inativo. Portanto, inúmeros regimes de trabalhos podem ser selecionados de forma isolada.

Acoplado ao equipamento EDM existe um dispositivo desenvolvido por Fernandes (1999) e Rodrigues (1999) com o objetivo de diminuir a quantidade de fluido a ser utilizado nos ensaios experimentais. O equipamento EDM tem capacidade para armazenar cerca de 420 litros de fluido, enquanto o dispositivo desenvolvido permite trabalhos com apenas 40 litros. Com isso, viabilizou-se trabalhos experimentais para avaliação de desempenho de diferentes fluidos dielétricos.

No dispositivo auxiliar, uma bomba centrífuga de potência de 1/3 de CV e 2840 rpm é usada para impulsionar o fluido através de tubulações rígidas e flexíveis para dentro da cuba de dimensões 250 x 250 x 250 mm, como mostra a figura 3.1.

O funcionamento baseia-se, como mostra a figura 3.2, no controle do fluxo do fluido no porta-ferramenta e ferramenta. O fluxo é controlado por meio de válvulas. O sistema de filtragem é baseado em magnetismo, com a colocação de ímãs nas paredes da cuba. Isso permite a retenção de resíduos ferromagnéticos. O retorno do fluido ao reservatório se faz por gravidade.

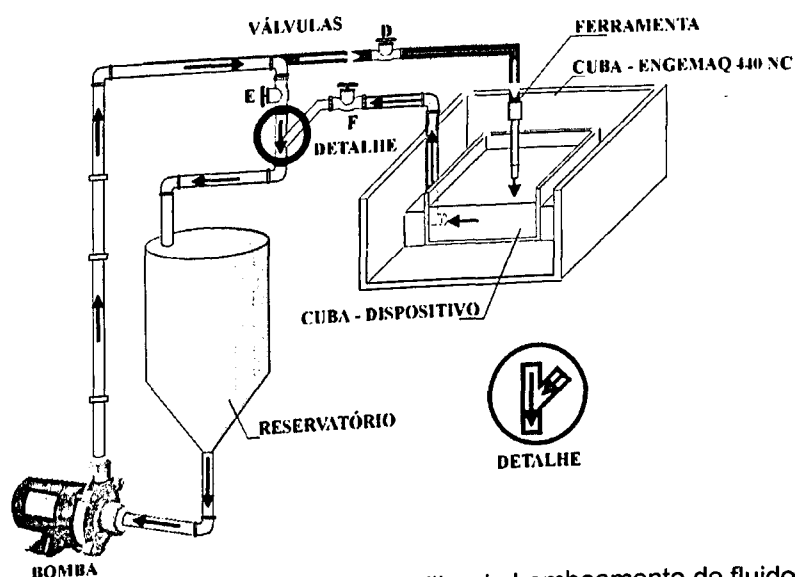


Figura 3.1. Esquema de montagem do dispositivo auxiliar de bombeamento de fluido acoplado ao equipamento Engemac 440NC.

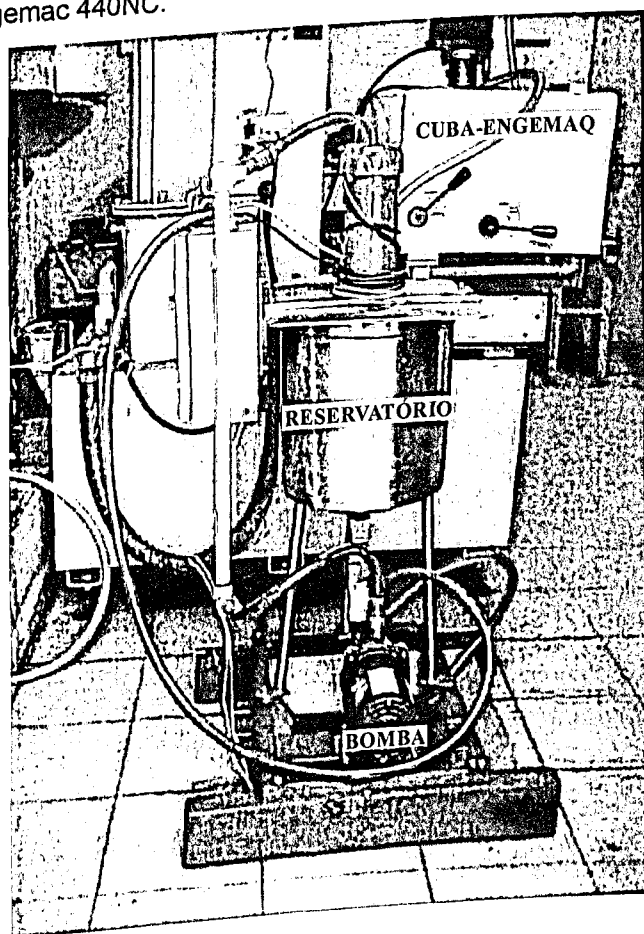
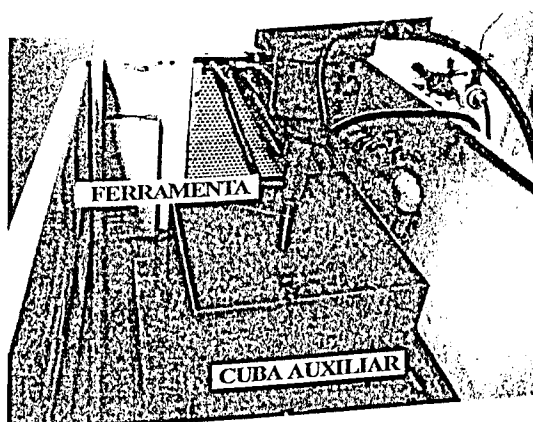
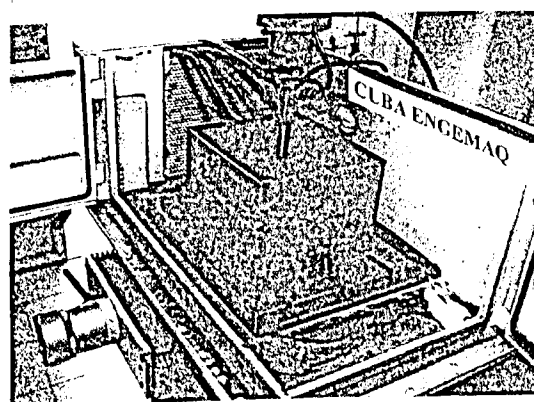


Figura 3.2. Dispositivo auxiliar de bombeamento de fluido acoplado ao equipamento Engemac 440NC.

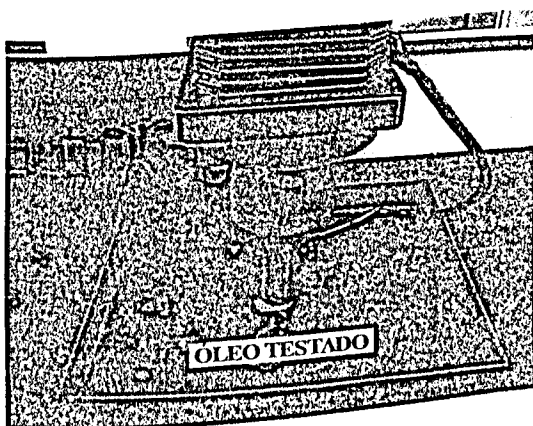
Pela figura 3.3 (a), pode-se observar o posicionamento da cuba auxiliar em relação à cuba principal da máquina e ferramenta. Na figura 3.3 (b) a cuba principal encontra-se aberta. As figuras 3.3 (c) e 3.3 (d) mostram o conjunto em condições operacionais. Nota-se que o fluido do reservatório principal continua ativo no sistema, uma vez que o equipamento não funciona sem um nível mínimo de segurança do óleo contido em seu reservatório.



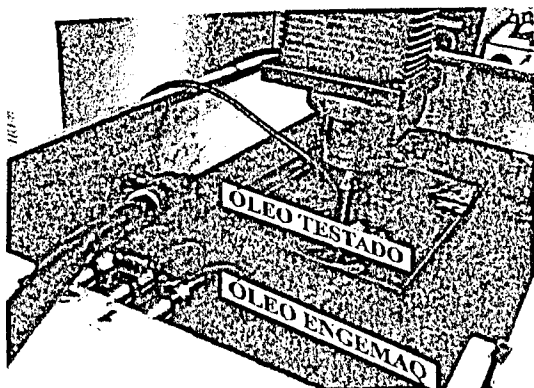
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.3. Detalhes da cuba auxiliar montada no interior da cuba principal. (a) cuba auxiliar no interior da cuba principal aberta; (b) cuba auxiliar no interior da cuba principal fechada; (c) cuba auxiliar com óleo dielétrico; (d) cubas auxiliar e principal com óleo dielétrico.

### 3.2. Variáveis de usinagem

Para avaliar a influência dos parâmetros de usinagem sobre o número de trincas, comprimentos de trincas, espessura da camada refundida, rugosidade e morfologia de superfície, optou-se por três regimes de usinagem: desbaste severo, desbaste médio e desbaste leve. Os parâmetros adotados para os três regimes estão mostrados na tabela 3.1.

Tabela 3.1. - Parâmetros empregados nos testes

REGIME	$T_{on}$ [ $\mu$ s]	$D_T$ [%]	$T_s$	Corrente [A]	Tensão [V]
Desbaste Severo	400	95	6	20	60
Desbaste Médio	200	95	4	15	50
Desbaste Leve	75	90	3	10	40

O  $T_{on}$  representa o tempo ativo da corrente, o  $D_T$  representa um percentual relativo entre  $T_{on}$  e  $T_{off}$ , segundo a formulação a seguir:

$$D_T = \frac{(T_{ON} \times 100)}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad (3.1)$$

A intensidade de corrente,  $T_s$ , é ajustável na máquina. No mostrador da máquina Engemac, faz-se a leitura da corrente e da tensão da descarga aplicadas. Foram fixados também alguns parâmetros importantes, tais como: o afastamento periódico da ferramenta em 0,4 mm e o tempo de erosão por afastamento em 6 s. É mostrado também o  $Z_{max}$  (posição máxima da ponta da ferramenta) e  $Z$  (posição instantânea da ponta da ferramenta) e o HE (Horímetro de Erosão, ou tempo total de usinagem).

### 3.3. Material e geometria da ferramenta

Foram utilizados dois tipos de ferramentas de Cobre. Para avaliar o fluido dielétrico foi utilizado uma ferramenta vazada e de ponta cônica, como mostrado na figura 3.4. Já para a avaliação do controle de volume dos fluidos aquosos, utilizou-se uma ferramenta cilíndrica não vazada.

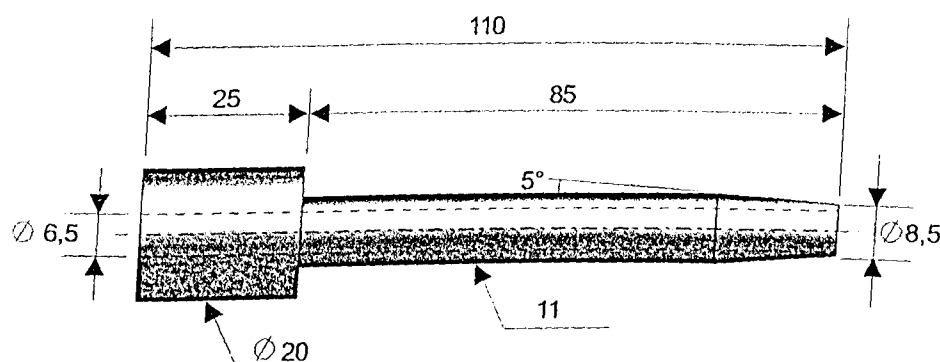


Figura 3.4. Geometria da ferramenta de Cobre vazada e de ponta cônica utilizada nos ensaios para avaliação dos fluidos dielétricos.

O material da peça utilizado para este trabalho foi o aço rápido ABNT M2. Este material apresenta grande versatilidade combinada com tenacidade, com dureza entre 64 e 66 RC. Apresenta ainda uma grande uniformidade nas suas características físicas e estruturais. Por sua elevada resistência ao desgaste, é indicado para confecção de ferramentas de corte para tornos, brocas, fresas, machos e coccinets, estampos de corte, punções, matrizes de estampagem profunda, bem como outras ferramentas de deformação plástica a frio. Por ser considerado um material de difícil usinagem por processos convencionais, adequa-se à usinagem por EDM.

As amostras utilizadas foram barras de seção quadrada (60 mm x 10 mm), com entalhe semi-cilíndrico. A composição química do aço rápido ABNT M2 está descrita na tabela 3.2 abaixo:

Tabela 3.2. – Composição aproximada do aço-rápido ABNT M2 em (%).

Carbono	Cromo	Vanádio	Tungstênio	Molibdênio	Ferro
0,82	4,30	1,90	6,40	5,00	81,55

### 3.4. Fluidos dielétricos testados

Este trabalho foi feito em conjunto com algumas empresas que forneceram os óleos dielétricos comerciais Texaco, Microquímica, Iorga e Archem. Foram ainda analisados mais dois fluidos não comerciais para usinagem: água deionizada e glicerina. Algumas características químicas desses fluidos estão descritas na tabela 3.3.

Tabela 3.3. – Características químicas dos fluidos dielétricos.

Características	Fluidos						
	Óleo A	Óleo B	Óleo C	Óleo D	Querosene	Glicerina	Água deionizada
Cor ASTM	L 0,5	L1	L1	L1	L1	Transparente	Transparente
Densidade a 20°C	0,84	0,76	0,78	0,84	0,82	1,26	1
Viscosidade cSt, 40°C	3,7	2,5	2,54	2,8	1-2	*	*
Ponto de Fulgor, °C	130	110	110	100	40	*	*
Ponto de Fluidez, °C	-12	*	3	*	*	*	*

### 3.5. Parâmetros avaliados

Para análise das peças usinadas de aço ABNT M2, foram avaliados o desempenho dos fluidos dielétricos, o número e o comprimento de trincas, a espessura da camada refundida, a rugosidade e a morfologia de superfície, através de microscopia ótica, eletrônica de varredura e interferometria laser.

#### 3.5.1. Preparação metalográfica

No processo de preparação as peças foram cortadas na seção transversal, utilizando-se disco abrasivo Arotec, modelo AA-3, em equipamento Discotom. Após o corte as amostras foram embutidas em uma máquina Struers Tempopress 2. As amostras foram, então, lixadas usando lixas d'água com granulometria de 80 a 600 mesh. O polimento foi feito em politriz Struers Dap-7 utilizando-se pastas de diamante com granulometrias 3 $\mu$ m, 6 $\mu$ m, 9 $\mu$ m e 1/4 $\mu$ m. O ataque químico foi feito com reativo químico Nital 2%.

#### 3.5.2. Número e comprimento de trincas

Na contagem do número e comprimento de trincas, foi utilizado um banco metalográfico Zeiss Neophot 21. A leitura foi realizada ao longo de toda a seção transversal e em três amostras de teste.



### 3.5.3. Rugosidade e morfologia da superfície

As amostras, quando levadas ao interferômetro, apresentaram baixa refletividade (em torno 1% a 3%), o que impossibilitou o uso da técnica de interferometria, pois a reflexão é um dos seus princípios básicos. A solução deste problema foi a de recobrir as amostras com uma fina camada de Ouro. Para isto, foi utilizado um equipamento Emitech K550. Este processo não afeta os resultados ou parâmetros de rugosidade da superfície, pois a espessura da camada depositada está na ordem de nanômetros (equivalente a  $10^{-6}$  mm) e a resolução do interferômetro utilizado está em micrômetros (equivalente a  $10^{-3}$  mm).

O equipamento utilizado para análise de rugosidade foi um interferômetro a laser UBM Microfocus Expert IV. Foram feitas leituras de área com os parâmetros: área de 1:1 [mm] e uma resolução de 2000 pontos/mm (na direção x) e 20 pontos/mm (na direção y).

A observação e análise da morfologia da superfície foi feita em microscópio eletrônico de varredura Zeiss, modelo Leo 940 A.

## CAPÍTULO IV

### Resultados e Discussão

As figuras 4.2 a 4.4 mostram o aspecto típico da seção transversal de superfícies usinadas por eletroerosão. Nota-se a presença de trincas, camada branca e bolhas.

#### 4.1. Número de Trincas

Os dados obtidos para o número de trincas com operação em regime de desbaste leve, médio e severo são mostrados na tabela 4.1 e figura 4.1. Onde, observa-se no desbaste leve, entre os fluidos hidrocarbonetados, que o óleo A teve um melhor desempenho que os demais fluidos. Observa-se também que o número de trincas nos fluidos aquosos é inferior às dos fluidos hidrocarbonetados.

Tabela 4.1. Número médio de trincas, com o respectivo desvio padrao (D.P.) e coeficiente de variação, encontrados na seção transversal de amostras usinadas nos regimes de desbaste leve, médio e severo.

Fluido	Leve			Médio			Severo		
	Média	D.P.	Coeficiente de Variação	Média	D.P.	Coeficiente de Variação	Média	D.P.	Coeficiente de Variação
A	9	10	0.90	21	10	0.48	91	8	0.09
B	11	8	1.38	51	15	0.29	42	10	0.24
C	42	15	2.80	33	14	0.42	41	10	0.24
D	16	10	1.60	65	13	0.20	70	7	0.10
Querosene	35	21	1.67	51	13	0.25	147	15	0.10
G + AD	5	5	1.00	7	3	0.43	5	3	0.60
AD	4	8	0.50	3	5	1.67	2	6	3.00
ADPI	1	3	0.33	2	3	1.50	1	3	3.00

Para regime de desbaste médio, o comportamento em termos do número de trincas formadas mostrou-se semelhante ao observado no regime de desbaste leve, ou seja, a supremacia dos fluidos aquosos em relação aos hidrocarbonetados. E, entre os hidrocarbonetados, um melhor desempenho do óleo A e um desempenho ruim da querosene.

No regime de desbaste severo, os fluidos aquosos continuam apresentando menos trincas que os hidrocarbonetados. Entre os hidrocarbonetados, o número de trincas é elevado e o fluido dielétrico A deixa de ter supremacia sobre os demais.

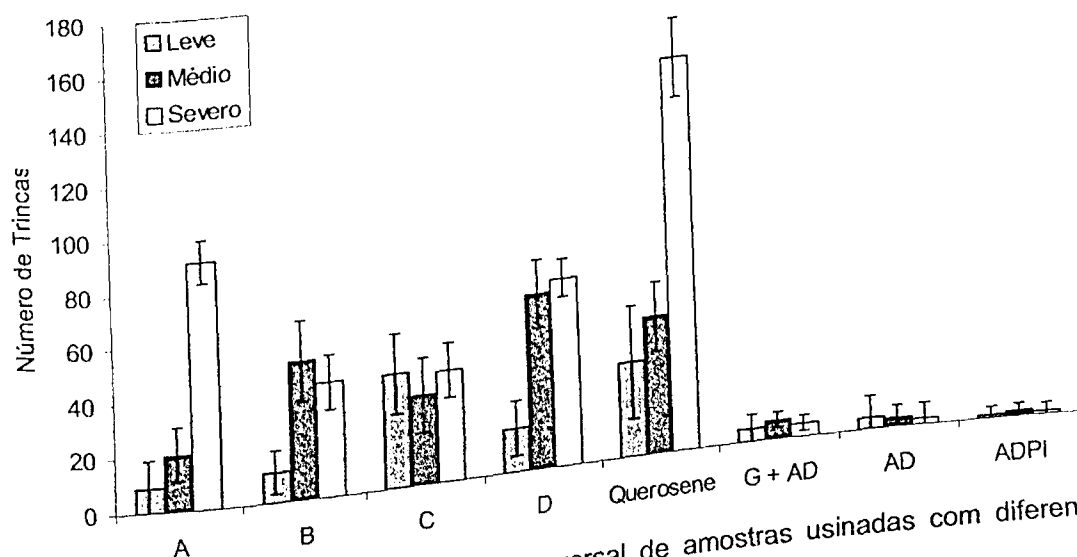


Figura 4.1. Número de trincas na seção transversal de amostras usinadas com diferentes fluidos nos regimes de desbaste leve, médio e severo.

Abaixo é mostrado a Micrografia da seção transversal de amostras usinadas com os fluidos água deionizada, querosene e Fluido A no regime de desbaste severo

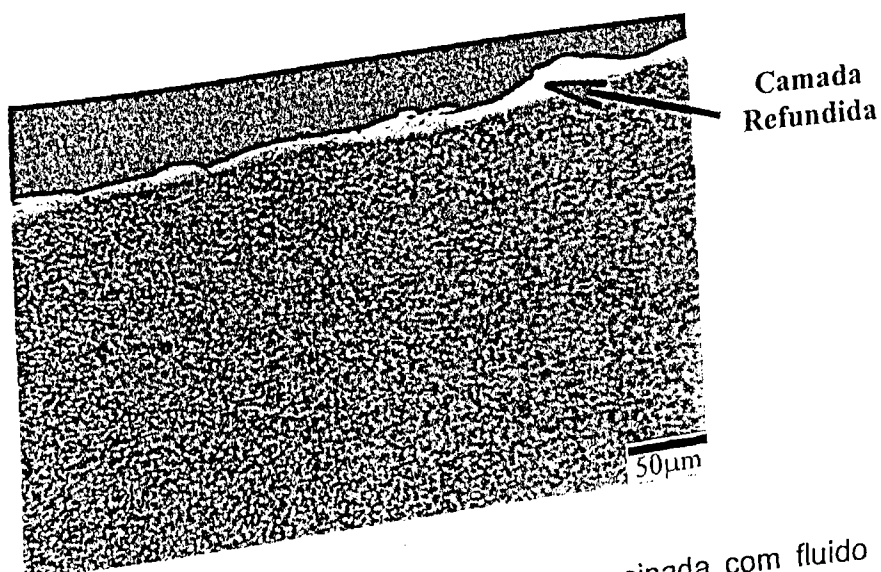


Figura 4.2. - Micrografia da seção transversal de amostra usinada com fluido água deionizada no regime de desbaste severo

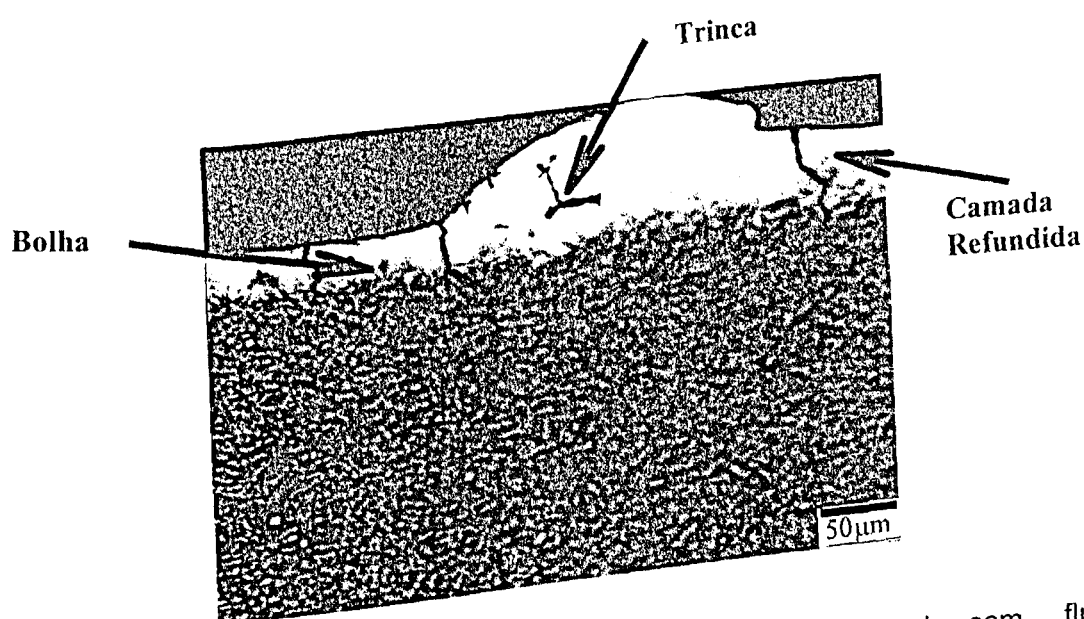


Figura 4.3. - Micrografia da seção transversal de amostra usinada com fluido querosene no regime de desgaste severo

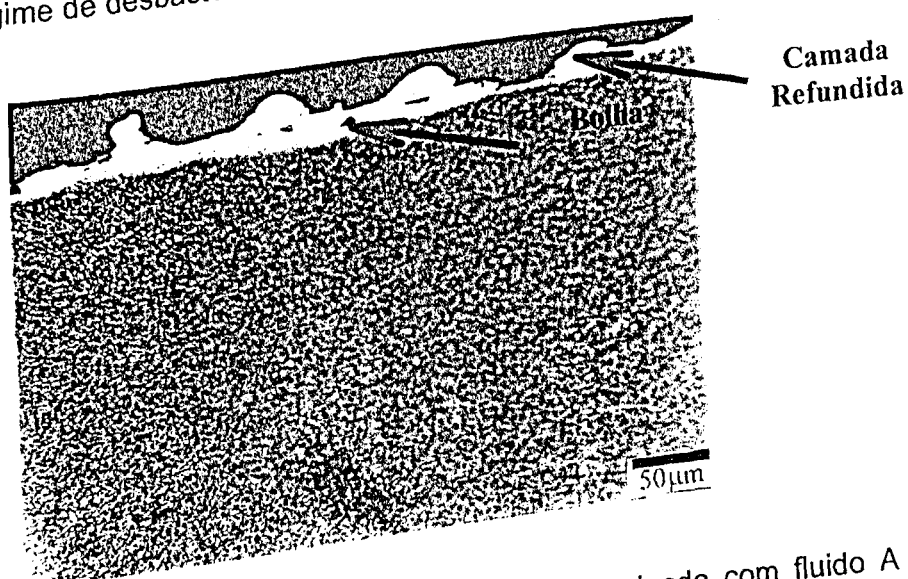


Figura 4.4. - Micrografia da seção transversal de amostra usinada com fluido A no regime de desgaste severo

#### 4.2. Comprimento de Trincas

Os resultados obtidos para o comprimento das trincas são mostrados na tabela 4.2 e figura 4.5.

Tabela 4.2. Comprimento médio de trincas, desvio padrão (D.P.) e coeficiente de variação encontrados na seção transversal de amostras usinadas nos regimes de desbaste leve, médio e severo.

Fluido	Leve			Médio			Severo		
	Média	D.P.	Coeficiente de Variação	Média	D.P.	Coeficiente de Variação	Média	D.P.	Coeficiente de Variação
A	13	0.3	0.02	29	0.4	0.01	55	0.5	0.01
B	22	1.1	0.05	58	8	0.14	36	0.01	0.00
C	10	0.9	0.09	20	0.9	0.05	27	0.3	0.01
D	15	1.8	0.12	22	2.9	0.13	27	1.3	0.05
Querosene	9	0.2	0.02	14	0.7	0.05	52	26	0.50
G + AD	5	1.1	0.22	25	4.3	0.17	13	1.8	0.14
AD	9	3.7	0.41	14	5.6	0.40	10	6	0.60
ADPI	4	1.3	0.33	9	2.4	0.27	4	2	0.50

A análise desses dados mostra que, no geral, os fluidos hidrocarbonetados estão nivelados em termos de comportamento. O comprimento das trincas aumenta com a severidade do regime de usinagem empregado. Os fluidos aquosos apresentam melhores características do que os hidrocarbonetados.

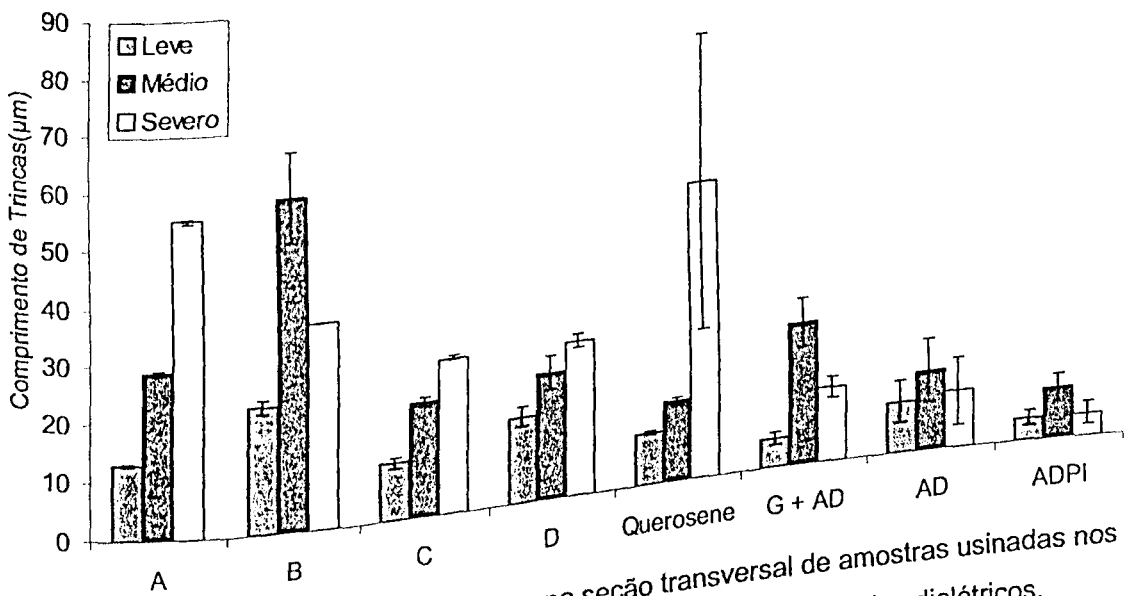


Figura 4.5. Comprimento de trincas geradas na seção transversal de amostras usinadas nos regimes de desbaste leve, médio e severo, para os diferentes fluidos dielétricos.

### 4.3. Espessura da Camada Refundida

Os resultados obtidos para a espessura da camada refundida são mostrados na tabela 4.3 e pela figura 4.6. Aparentemente, os regimes de operação não tem uma influencia significativa sobre a espessura da camada refundida. Os fluidos aquosos também não mostram um comportamento superior aos fluidos hidrocarbonetados.

Tabela 4.3. Espessura de camada refundida, desvio padrão (D.P.) e coeficiente de variação, encontrados na seção transversal de amostras usinadas nos regimes de desbaste leve, médio e severo.

Fluido	Leve			Médio			Severo		
	Média	D.P.	Coeficiente de Variação	Média	D.P.	Coeficiente de Variação	Média	D.P.	Coeficiente de Variação
A	7	5	0.71	18	5	0.28	19	15	0.79
B	10	8	0.80	7	5	0.71	12	8	0.67
C	12	9	0.75	12	9	0.75	42	23	0.55
D	13	9	0.69	17	15	0.88	18	15	0.83
Querosene	14	9	0.64	4	2	0.50	13	10	0.77
G + AD	9	7	0.78	17	10	0.59	29	27	0.93
AD	9	5	0.56	7	5	0.71	9	5	0.56
ADPI	11	5	0.45	15	11	0.73	9	7	0.78

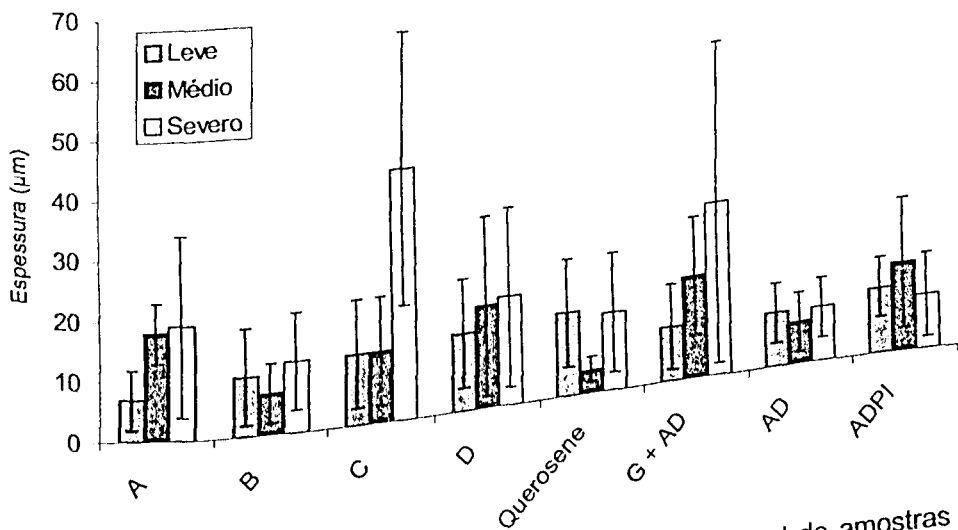


Figura 4.6. Espessura de camada refundida na seção transversal de amostras usinadas nos regimes de desbaste leve, médio e severo para os diferentes fluidos dielétricos.

Nos fluidos aquosos, o número e o comprimento das trincas foi significativamente pequeno, comparando-se com os demais fluidos. Observa-se também que não há uma

elevação destes parâmetros com o aumento da severidade do regime de operação. Esse comportamento se deve, provavelmente, ao fato de que as descargas elétricas produzidas com fluidos aquosos despendem muito menos energia na peça. Esse menor aporte térmico gera uma menor diferença de temperatura entre os tempos  $T_{on}$  e  $T_{off}$ . Assim, forma-se uma camada refundida com muito menos trincas. De acordo com Field *et al.* (1998), a energia de ebulição específica em meios aquosos é mais elevada e os fenômenos de ebulição ocorrem a um nível mais baixo de temperatura. Como consequência, o processo de erosão nos meios a base de água possuem uma estabilidade térmica mais elevada e podem suprir mais energia.

Em termos de propriedades físico-químicas, o fluido A se diferencia do demais pela maior viscosidade e maior ponto de fulgor (tabela 3.3). A querosene se situou entre os que tiveram desempenho ruim. E, pela tabela 3.3, pode-se notar que ela possui viscosidade mais baixa e menor ponto de fulgor. Contudo, os dados fornecidos pelos fabricantes são muito incompletos, o que impossibilita a realização de uma análise mais consistente sobre a influência das características físico-químicas destes fluidos sobre os parâmetros analisados.

É importante notar que em todos os regimes, a água deionizada com polaridade invertida (ADPI) apresentou os menores valores de número e comprimento de trincas. Com a polaridade invertida, os íons negativos se chocam contra a peça. Desta forma, a energia liberada na peça é menor. As diferenças entre o  $T_{on}$  e  $T_{off}$  tornam-se menores, o que explica a formação de um número menor de trincas e de menores comprimentos.

De acordo com Guiral (1997), a lavagem das partículas influencia diretamente na formação da camada refundida. Como todos os ensaios foram realizados com um mesmo sistema de lavagem, pode-se considerar normal o fato de não ter havido grandes diferenças entre os fluidos na espessura da camada refundida. E o fato também de não ter havido influência significativa do regime de operação.

A formação de camadas refundidas menos espessas não significa, necessariamente, uma vantagem. Caso as trincas formadas sejam compridas, elas podem atingir a matriz e comprometer a integridade da peça. A remoção da camada refundida é uma operação tecnicamente possível e, muitas vezes, realizada na prática. Com o uso de jateamento com partículas abrasivas, por exemplo. Neste caso, as trincas dessa região podem ser removidas. Mas as trincas que se estenderam para o metal de base ficariam residuais. No caso do fluido A, por exemplo, as trincas ficariam restritas à camada refundida. Da mesma forma, nos fluidos aquosos. Já no caso da querosene, elas se estenderiam pela matriz.

#### 4.4. Rugosidade

Na tabela 4.4 e figura 4.7 estão apresentados os valores de rugosidade aritmética média ( $R_a$ ) para os regimes de desbaste leve, médio e severo dos fluidos aquosos, óleo A e querosene.

Pode-se observar que não há diferenças significativas nas rugosidades dos diferentes fluidos usados nos três diferentes regimes. As diferenças são ainda menos significativas quando se compara os regimes de desbaste médio e severo. Talvez pelo fato de as diferenças entre estes regimes não serem significativas a ponto de afetar a rugosidade. Para os fluidos A, Querosene e G + AD, houve aumento da rugosidade com o aumento do regime de leve para médio, corroborando com a tendência de geração de superfícies mais rugosas com a utilização de maiores energias de descarga. Já no caso das superfícies geradas pelos fluidos AD e ADPI ocorreu o contrário. Houve um considerável declínio da rugosidade com o aumento do regime. Esse resultado pode ser explicado pela excessiva geração de bolhas de gases durante a usinagem com AD e ADPI. O fluxo de bolhas que saem da superfície usinada age como jato que impede que grande volume de material fundido volte a se redepositar na superfície usinada. Essa hipótese pode ser reforçada pelo fato de a espessura da camada refundida obtida com os fluidos AD e ADPI ser inferior aos demais fluidos.

Tabela 4.4. Valores de rugosidade na superfície de amostras usinadas nos regimes de desbaste leve, médio e severo.

Fluido	Rugosidade $R_a$ , $\mu\text{m}$		
	Leve	Médio	Severo
A	6,1	7,2	7,4
Querosene	6,0	6,0	7,7
G + AD	5,0	7,5	7,5
AD	7,3	6,5	6,5
ADPI	6,5	4,6	4,6



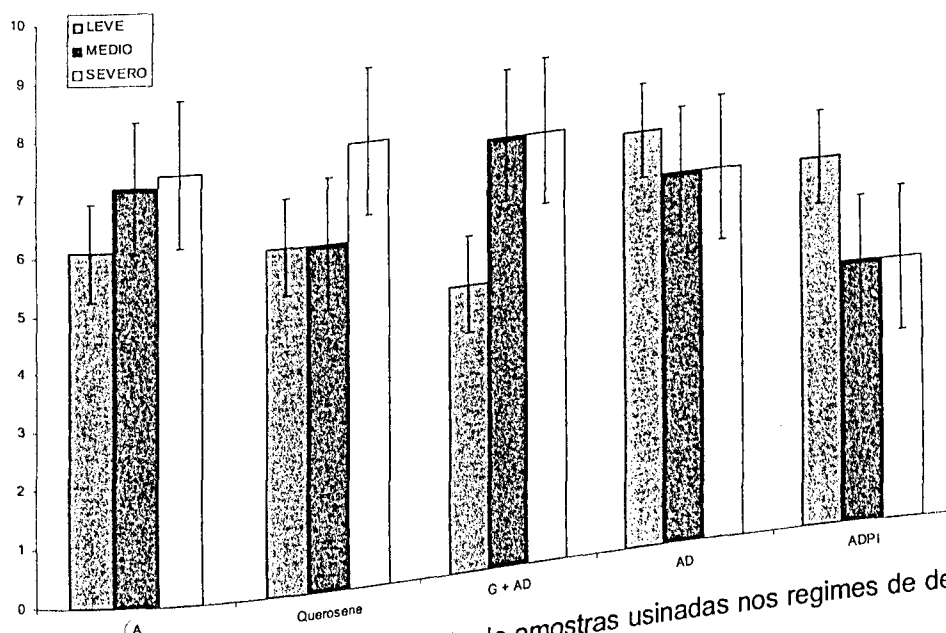


Figura 4.7. Rugosidade  $R_a$  da superfície de amostras usinadas nos regimes de desbaste leve, médio e severo com diferentes fluidos dielétricos.

#### 4.5. Morfologia da Superfície

A morfologia da superfície de amostras usinadas com fluidos dielétricos A, querosene e os fluidos aquosos pode ser observado nas figuras 4.8 à 4.10.

Nota-se que as superfícies geradas pelo fluido A foram inferiores, em todos regimes de desbastes aos fluidos aquosos. Estes apresentaram melhor superfície, devido a sua estabilidade apresentada durante o processo de EDM, de modo contrário também para todos os regimes o fluido E (querosene) foi o que apresentou uma superfície mais irregular com um elevado número de bolhas. Podendo ser explicado pelo fato do querosene apresentar uma maior vaporização o que leva ao surgimento uma maior quantidade de bolhas. Aliado a má qualidade na superfície o querosene, é importante ressaltar que devido a sua vaporização excessiva é prejudicial à saúde do operador.

Avaliando as figuras observou-se que os fluidos aquosos e o fluido A possuem uma camada refundida bem homogênea o que não ocorre com o querosene. Pode se observar ainda que no regime de desbaste severo as superfícies para todos os fluidos dielétricos se apresentam mais brandas que nos outros regimes, este comportamento não esperado sugere maiores estudos para que se possa comparar com estes resultados e também ampliar a discussão sobre o tema abordado.

2

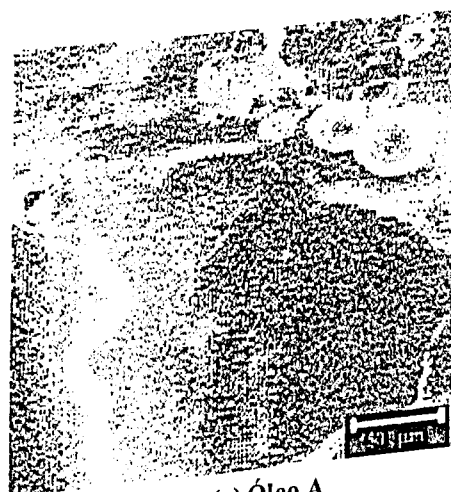
Observa-se, ainda, nas fotomicrografias das figuras 4.1 a 4.3, que o fluido água deionizada apresentou uma camada bem mais uniforme que os demais fluidos dielétricos.

#### 4.6. Irregularidades dos Fluidos Aquosos

Ao utilizar-se a glicerina pura como fluido, não foi possível realizar operações de usinagem. A alta viscosidade da glicerina dificulta o bombeamento pelo dispositivo auxiliar. Apenas após a diluição de água deionizada + 87% de glicerina é que se tornou possível a realização do processo EDM.

A degradação da água deionizada foi testada com a realização de furos sucessivos. Após cada furo, foram realizadas pesagens de um volume fixo extraído da cuba. À medida que se aumentou o número de furos, aumentou-se também a densidade da água (figura 4.11). o aumento da densidade deve-se a partículas sólidas que se desprendem da peça usinada e da ferramenta. Observa-se também um aumento da eficiência do processo, até atingir um valor ótimo. Isso se deve à dispersão das descargas elétricas pela presença de partículas sólidas diluídas no fluido. A partir de então, a eficiência começa a diminuir conforme é mostrado na figura 4.12. Este comportamento deve-se ao excesso de contaminação do fluido por partículas metálicas. Como estas partículas são condutoras elétricas, ocorrerá perda de rigidez dielétrica e, conseqüentemente, perda de eficiência do fluido.

Um problema também observado ao se utilizar o fluido água deionizada foi que este durante a realização de furos utilizando-se uma ferramenta não vazada este apresentava com freqüência o problema de estalagmite (figura 4.13), já que a lavagem não se processava de modo completo.



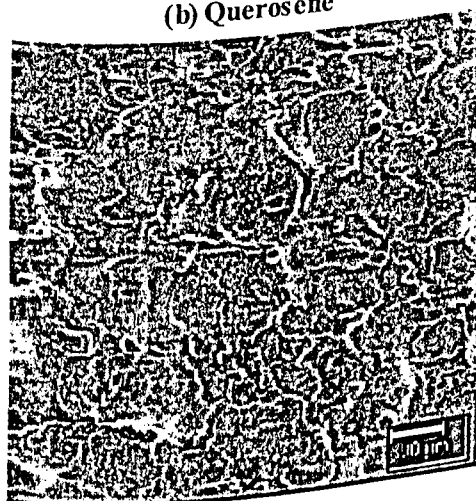
(a) Óleo A



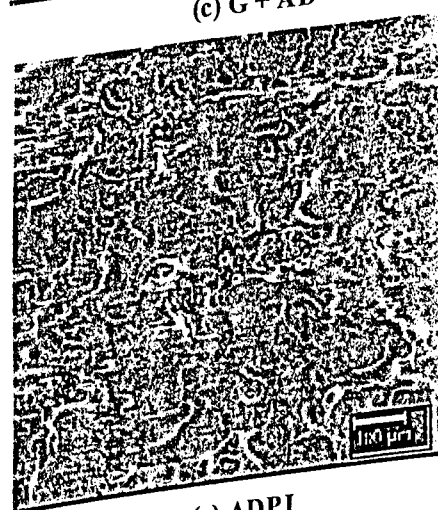
(b) Querosene



(c) G + AD



(d) AD



(e) ADPI

Figura 4.8. Morfologias obtidas pelo MEV das superfícies usinadas com fluido A, querosene e fluidos aquosos no regime de desbaste leve.

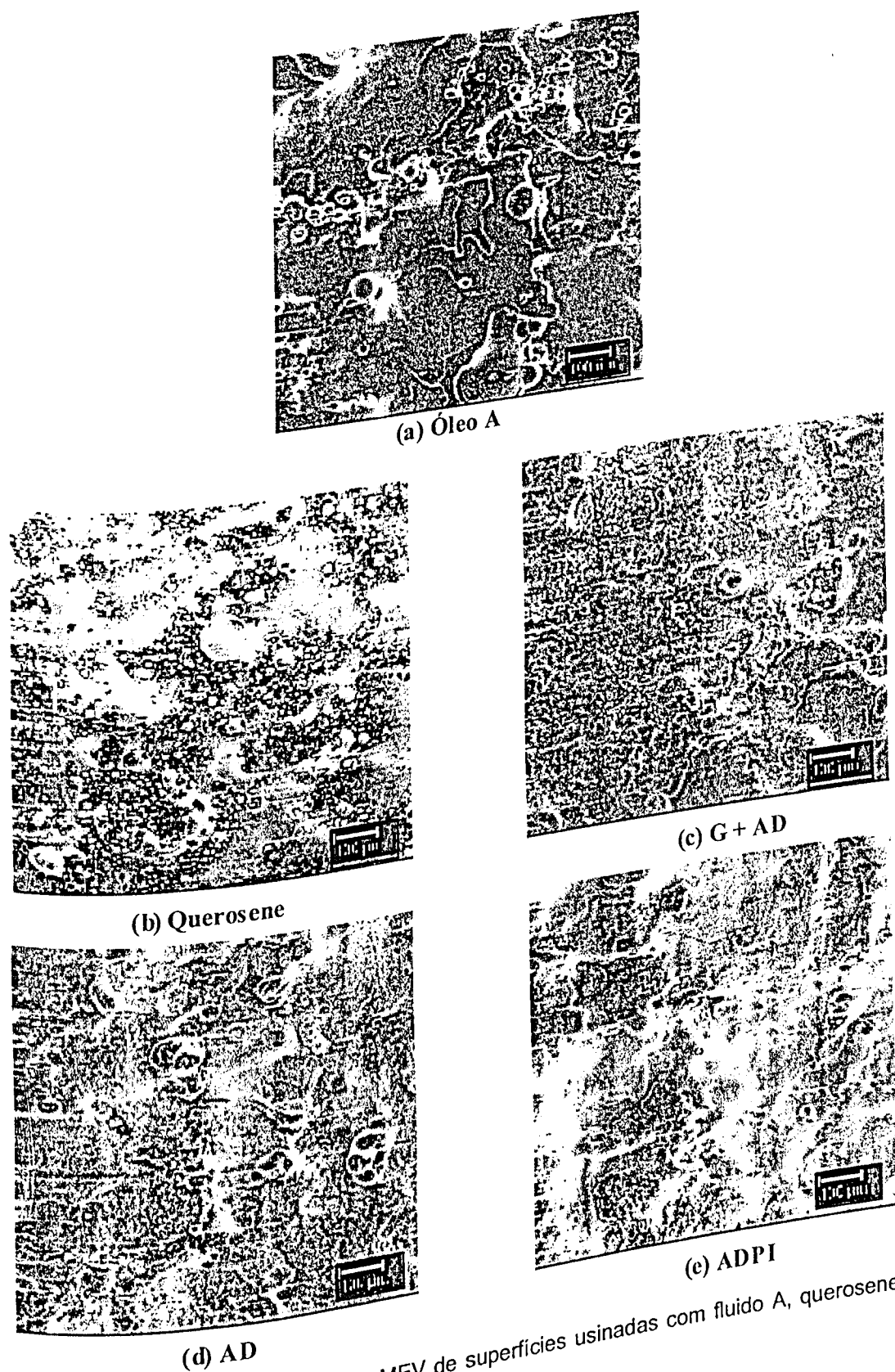


Figura 4.9. Morfologias obtidas pelo MEV de superfícies usinadas com fluido A, querosene e fluidos aquosos no regime de desbaste médio.

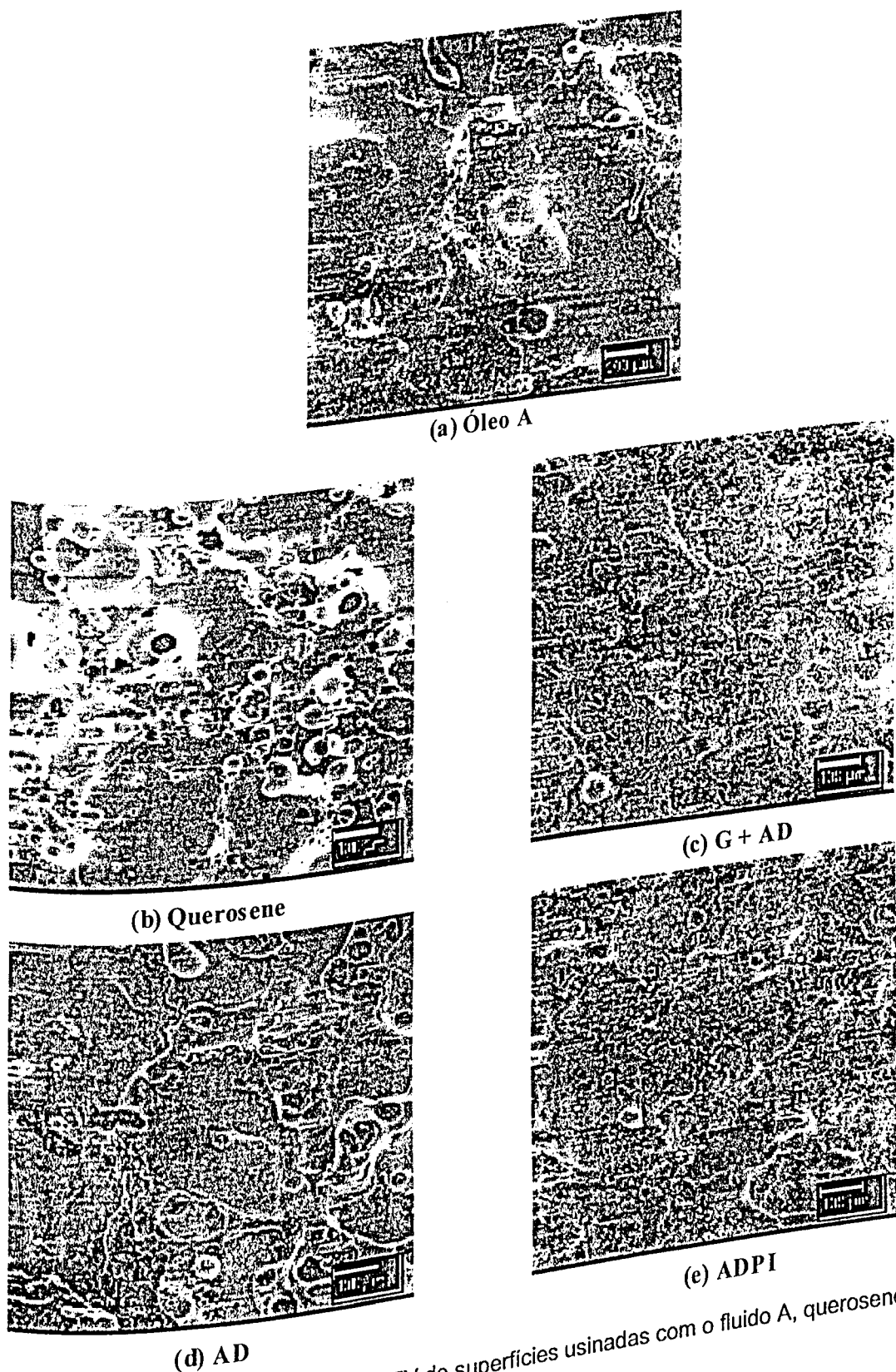


Figura 4.10. Morfologias obtidas pelo MEV de superfícies usinadas com o fluido A, querosene e fluidos aquosos no regime de desgaste severo.

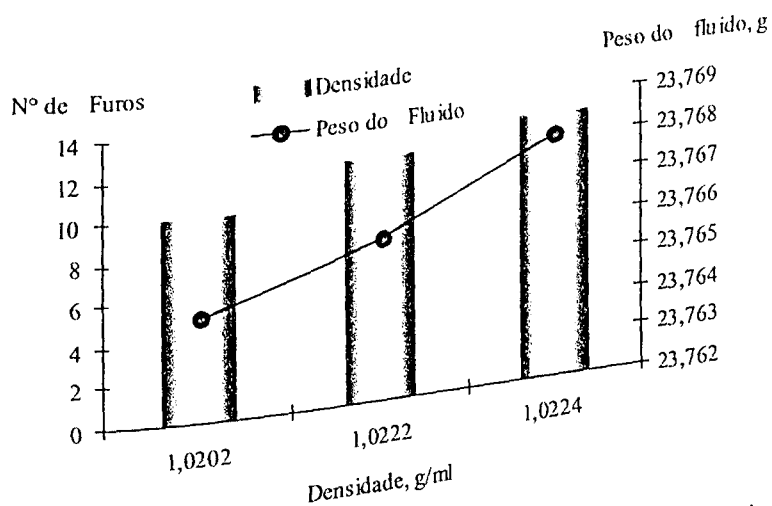


Figura 4.11. Variação da densidade do fluido dielétrico água deionizada.

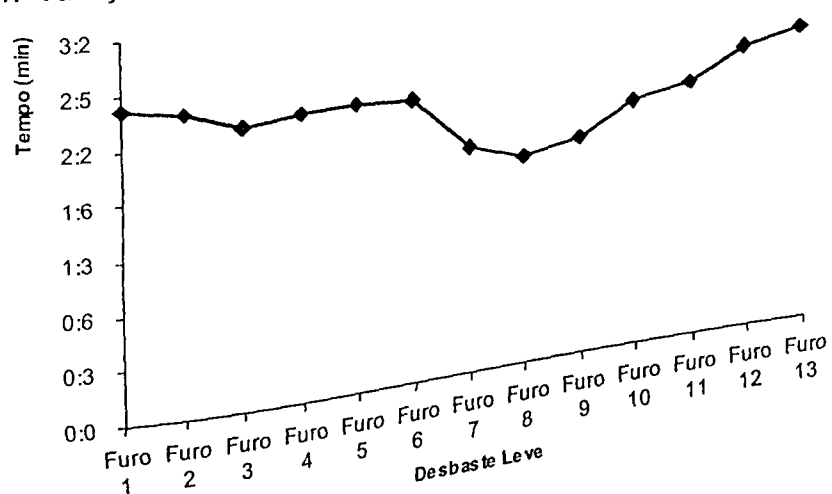


Figura 4.12. - Variação do tempo de usinagem com o número de furos.

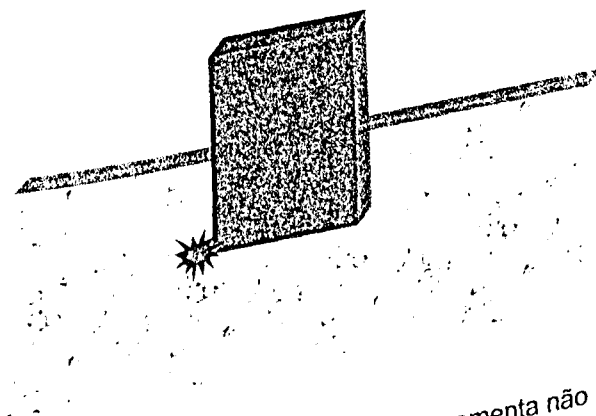


Figura 4.13. Formação de estalagmite ao usinar-se com ferramenta não vazada.

Outro problema observado durante o processo de usinagem por descargas elétricas utilizando-se o fluido dielétrico água deionizada foi a oxidação excessiva e o desgaste irregular da ferramenta o que acarretou na realização de um furo de forma irregular (figura 4.14).

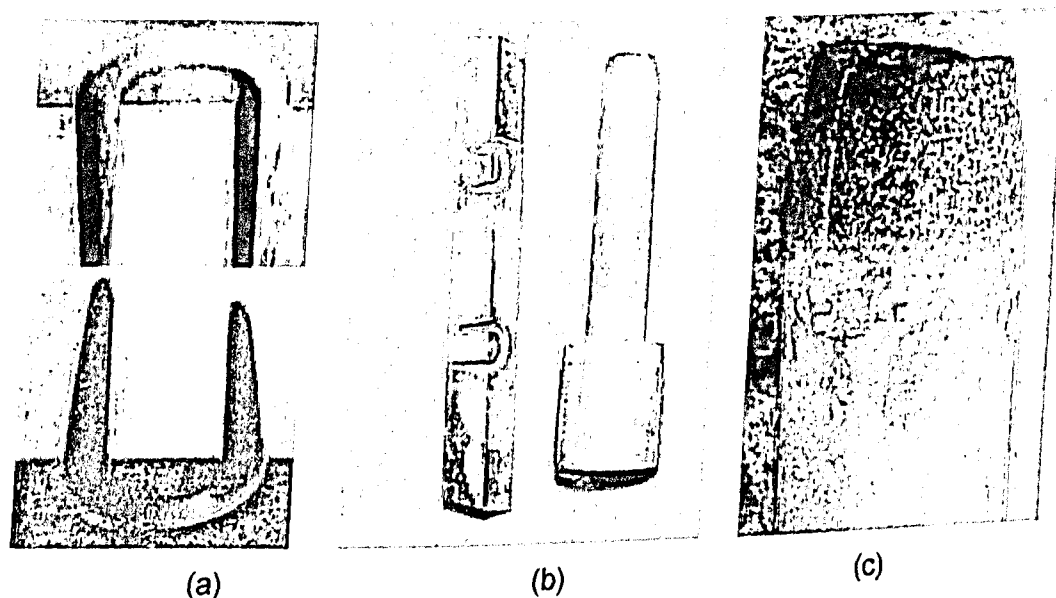


Figura 4.14. Desgaste irregular da peça (a e b) e do eletrodo (b e c) ao se utilizar o fluido água deionizada.

Observou-se, durante o desenvolvimento do trabalho, que invertendo-se a polaridade no processo de EDM para o fluido água deionizada, a ferramenta apresentou um desgaste maior. Porém, este desgaste é mais uniforme.

A superfície da camada refundida para o desbaste leve e médio para água deionizada + 87% de glicerina e somente água deionizada apresentou uma superfície mais uniforme com ausência de porosidades e crateras, comportamento este não observado para o desbaste severo.

## CAPÍTULO V

### Conclusões

Atendo-se estritamente ao aspecto tecnológico de desempenho dos fluidos dielétricos para EDM nas condições testadas, pode-se concluir que:

- ↳ O fluido dielétrico E (querosene), ainda muito utilizado nas indústrias, deixou a desejar em relação aos fluidos específicos para EDM e em alguns aspectos, foi muito inferior até em relação aos fluidos aquosos;
- ↳ Foi confirmada a superioridade do óleo dielétrico A quando comparado com os demais fluidos hidrocarbonetados;
- ↳ Nos fluidos aquosos, o número de trincas foi significativamente pequeno e o comprimento de trincas consideravelmente menor em relação aos demais fluidos;
- ↳ Quanto mais potente o regime de usinagem, maiores as espessuras das camadas refundidas, qualquer que seja o fluido. Os fluidos aquosos apresentaram uma camada bem mais uniforme que os demais fluidos dielétricos;
- ↳ Os fluidos aquosos não apresentaram significativa melhora de rugosidade em relação aos demais fluidos hidrocarbonetados no regime de desgaste leve.



## CAPÍTULO VI

### Sugestões

Para o desenvolvimento de futuros trabalhos, pode-se sugerir:

- ↳ Efetuar a diluição de pós à água para avaliar eventuais melhorarias na EDM por penetração;
- ↳ Estudar o efeito erosivo de pós abrasivos diluídos em água;
- ↳ Avaliar a perda de microdureza pela descarbonetação provocada pelos fluidos aquosos;
- ↳ Efetuar uma análise comparativa de custos e durabilidade dos diferentes fluidos.

## CAPÍTULO VII

### Referências Bibliográficas

- Arantes, L. J., 2001, *Avaliação do Desempenho de Fluidos Dielétricos no Processo de Usinagem por Eletroerosão*, Dissertação de mestrado, UFU, Uberlândia – MG, 72 pp.
- Raslan, A. A., Arantes, L. J.; Silva, M., B.; Silva, E., M., 2003, *Avaliação de Superfícies usinadas por Diferentes Fluidos Dielétricos no Processo de Usinagem por Eletroerosão*. Tecnologia de Informação – Revista ABS – Benicio Biz Editores Associados Ltda. Rio de Janeiro – RJ, v.1, p.78 – 81, 2003.
- Arantes, L. J.; Silva, M., B.; Silva, E., M.; Raslan, A. A., 2003, Superfícies usinadas por Fluidos Dielétricos, *OESP-Metal Mecânica*, Ano 8, Abril/Maio, n° 47.
- Benedict, G. F.; 1987, *Nontraditional Manufacturing Processes*, New York, Marcel Dekker, pp. 207-246.
- Cruz, C., Malaquias, E. S., Fernandes, L. A., 1999, *Introdução à Usinagem não Tradicional*, DEEME, UFU, Uberlândia-MG, pp. 7-19.
- Field, M.; W. König; F. J. Siebers, 1998 Estudo de um Sistema por Penetração em Meio Aquoso. *Editora Aranda*. Ano XXXV, n° 395, pp. 20-27.
- Fernandes, L. A., 1999, *Efeito da Adição de Pó de Carboneto de Silício nos Fluidos Dielétricos Sobre o Desempenho da Usinagem por Descargas Elétricas do Aço ABNT M2*, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 72 pp.
- Field, M., Kahles, J.F., Koster, W.P., 1989, *Surface Finish and Surface Integrity*, Metcut Research Associates Inc., Metals Handbook 9ª Ed., Machining, Vol. 16, pp.19-36.
- Fuller, J.E., 1989, *Electrical Discharge Machining*, Metals Handbook, 9ª Ed. Vol.16, Machining, pp. 557-564.
- Guitral, E. Bud, 1997, *The EDM Handbook*, Hanser Gardner Publication, Cincinnati, 306 pp.

- Ho, K. H. and Newman, S.T., 2003. State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM). *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, pp 1287-1300.
- Intech EDM, 1996, *A Guide to Understanding and Selecting EDM Dielectric Fluids*, Broadview, IL. Internet address: [www.edmtalk.com](http://www.edmtalk.com) -24/08/2004 - 13:00 h.
- Kaminski, P. C.; Capuano, M. N., 1999, *Revista OESP Metal-Mecânica*, Ano 4, n.º 25, OESP Mídia, São Paulo, pp. 42-47.
- Lima, E.F., 1997, *Rugosidade e Integridade Superficial do Aço Rápido ABNT M2 Após Usinagem por Descargas Elétricas*, Dissertação de mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 97 pp.
- McGeough, J. A.; 1988, *Advanced Methods of Machining*, London, Chapman and Hall, pp.128-152.
- Medeiros, J. T. N.; 1985, *Aspectos Termodinâmicos do Processo de Usinagem por Eletroerosão*, VIII COBEM, S. J. Campos, SP, pp.713-716.
- Miller, P.; Guha, A., 1999, Guia dos Fabricantes de Ferramentas de Corte, São Paulo, Revista Máquinas & Metais, Aranda Editora - Ano XXXV, Junho, nº401, pp. 40-51.
- Rodrigues, J.R.P., 1999, *Efeito da Adição de Carboneto de Silício em Pó na Geração de Microtrincas e na Topografia da Superfície Usinada por Descargas Elétricas do Aço Rápido ABNT M2*, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 47 pp.
- Tanio, F., 2002, *IPESI Metal - Mecânica*, Abril/Maio, pp. 16 - 23.