



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

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE FLUIDOS DIELÉTRICOS NO PROCESSO DE  
USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS**

**LUCIANO JOSÉ ARANTES**

Uberlândia, dezembro de 2001

A Deus acima de tudo, pois,  
entrega o teu caminho ao Senhor,  
confia Nele, e o mais Ele fará (Salmo de Davi).

Aos meus pais, Lúcio e Arlene, minha  
namorada e minhas irmãs.

## AGRADECIMENTOS

↪ À Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia e à Coordenação do Curso de Pós-Graduação pelo apoio e infra-estrutura;

↪ Ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), ao professor Dr. Álisson Rocha Machado e em especial ao professor Dr. Márcio Bacci da Silva, por todo apoio e dedicação de um grande amigo;

↪ Ao MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), Boston, MA, EUA; pelo acesso livre às suas bibliotecas para realização da revisão bibliográfica;

↪ Ao professor Dr. Alberto Arnaldo Raslan, pela brilhante orientação e interesse;

↪ Ao Laboratório de Usinagem Não Tradicional, ao professor Dr. Evaldo Malaquias da Silva, pela paciência e respeito e em especial ao professor Dr. Claudionor Cruz, pela amizade, incentivo, apoio, força e por acreditar no meu trabalho e potencial;

↪ Ao órgão financiador da pesquisa, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelos dois anos de bolsa;

↪ A todos os professores da Pós-graduação, por compartilharem seus conhecimentos e experiências;

↪ As empresas Engemaq, Texaco, Iorga, Archem e Microquímica que contribuíram com apoio técnico e material;

↪ Aos técnicos Geraldino Martins (UÑT) e Ângela Maria S. Andrade (LTM) pela colaboração e atenção dispensada; aos colegas de Laboratório os doutorandos João Cirilo da Silva Neto e Carlos Alberto D. Ramos pelo apoio e companheirismo;

↪ Ao colega e companheiro Antônio Ferrão Morgado, pelo interesse e aplicação; ao colega e amigo Anderson Clayton Alves Melo, pela excepcional ajuda no MEV e todos que de alguma forma colaboraram com a realização dessa pesquisa.

# AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE FLUIDOS DIELÉTRICOS NO PROCESSO DE USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS

## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>01</b>
<b>Capítulo 2</b>	<b>Processo EDM – Considerações Gerais.....</b>	<b>04</b>
	2.1- Princípios do processo.....	07
	2.2- Parâmetros de Usinagem.....	11
	2.3- Material da peça.....	12
	2.4- Material da ferramenta.....	12
	2.5- Regime de operação.....	12
	2.6- Corrente.....	13
	2.7- Freqüência.....	14
	2.8- Ferramental.....	16
	2.9- Taxa de Remoção de Material (TRM).....	17
	2.10- Relação de Desgaste (RD).....	19
	2.11- Textura e Integridade Superficial.....	20
	2.12- Camada Refundida.....	21
	2.13- Desgaste da Ferramenta.....	22
<b>Capítulo 3</b>	<b>Fluidos Dielétricos.....</b>	<b>24</b>
	3.1- Propriedades Principais.....	25
	3.2- Tendências Mundiais.....	30
	3.3- Manutenção Preventiva.....	31

3.4- Fluidos Dielétricos: Óleo ou Água?.....	33
<b>Capítulo 4 Procedimento Experimental.....</b>	<b>37</b>
4.1- Seleção dos Parâmetros.....	38
4.1.1- Equipamento EDM.....	38
4.1.2- Variáveis de Usinagem.....	39
4.1.3- Material e geometria da peça.....	40
4.1.4- Ferramental empregado.....	41
4.1.5- Dispositivo auxiliar.....	42
4.2- Testes Preliminares.....	45
4.3- Testes Definitivos.....	45
4.4- Avaliação dos Resultados.....	46
4.4.1- Taxa de remoção de material (TRM).....	46
4.4.2- Relação de Desgaste (RD).....	47
4.4.3- Rugosidade Média Aritmética (Ra) e Topografias das Superfícies Usinadas (MEV).....	47
4.4.4- Características dos Óleos Testados.....	48
<b>Capítulo 5 Análise e Discussão dos Resultados.....</b>	<b>51</b>
5.1- Taxa de Remoção de Material (TRM).....	51
5.2- Relação de Desgaste (RD).....	54
5.3- Rugosidade Média Aritmética (Ra) e Topografias (MEV).....	57
<b>Capítulo 6 Conclusão.....</b>	<b>66</b>
<b>Capítulo 7 Referências Bibliográficas.....</b>	<b>68</b>
<b>Anexo Testes Preliminares.....</b>	<b>71</b>

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1: Molde, ferramentas de Cobre e Grafite .....	04
Figura 2.2: Exemplos de produção com o processo EDM .....	05
Figura 2.3: Curva de variação do preço e da velocidade de usinagem .....	05
Figura 2.4: Qualidade das superfícies usinadas .....	06
Figura 2.5: Diagramas Tensão e Corrente .....	08
Figura 2.6: Fusão do Material da Peça ( $T_{on}$ ) .....	10
Figura 2.7: Implosão do Material Fundido ( $T_{off}$ ) .....	10
Figura 2.8: Lavagem das Partículas.....	10
Figura 2.9: Esquema dos principais elementos construtivos de um equipamento EDM. ....	11
Figura 2.10: Representação dos níveis de potência e duração do pulso no processo EDM .....	13
Figura 2.11: Baixa Frequência/Desbaste .....	15
Figura 2.12: Frequência Moderada/Semi-acabamento .....	15
Figura 2.13: Alta Frequência /Acabamento .....	15
Figura 2.14: Sistemas de lavagem no processo EDM .....	17
Figura 2.15: Variação da TRM para os valores calculados e obtidos experimentalmente .....	19
Figura 2.16: Efeitos Superficiais e Sub-superficiais .....	20

Figura 2.17: Representação esquemática das três camadas distintas no material usinado por eletroerosão .....	21
Figura 2.18: Diferenças Drásticas no Desgaste das Ferramentas de Cobre e Grafite .....	22
Figura 3.1: Características importantes na seleção de um Fluido Dielétrico para EDM .....	25
Figura 4.1: Esquema sob diagrama de blocos para a metodologia .....	37
Figura 4.2: Equipamento EDM por penetração – ENGEMAQ 440 NC .....	39
Figura 4.3: Painel de controle e Display com parâmetros de desbaste .....	40
Figura 4.4: A geometria da ferramenta de cobre .....	41
Figura 4.5: Esquema de montagem do dispositivo auxiliar acoplado à ENGEMAQ 440NC..	42
Figura 4.6: Dispositivo auxiliar acoplado à ENGEMAQ 440NC .....	43
Figura 4.7: Cuba auxiliar montada no interior da cuba ENGEMAQ 440NC.....	44
Figura 4.8: Esquema de medição do parâmetro Ra para acabamento superficial .....	48
Figura 5.1: TRMs geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Acabamento.....	52
Figura 5.2: TRMs geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Semi-Desbaste.....	52
Figura 5.3: TRMs geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste.....	52
Figura 5.4: RDs geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em	

regime de Desbaste Leve.....	55
Figura 5.5: RDs geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Médio.....	55
Figura 5.6: RDs geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Severo.....	55
Figura 5.7: Ferramentas de cobre antes da usinagem (a) e (b). Ferramentas depois da usinagem com RD baixa (c) e (d).....	57
Figura 5.8: Rugosidades Ra geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Leve.....	59
Figura 5.9: Rugosidades Ra geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Médio.....	59
Figura 5.10: Rugosidades Ra geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Severo.....	59
Figura 5.11: Topografias obtidas por MEV (aumento de 100x) das superfícies usinadas por EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Leve.....	60
Figura 5.12: Topografias obtidas por MEV (aumento de 300x) das superfícies usinadas por EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Leve.....	61
Figura 5.13: Topografias obtidas por MEV (aumento de 100x) das superfícies usinadas por EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Médio.....	62
Figura 5.14: Topografias obtidas por MEV (aumento de 300x) das superfícies usinadas por EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Médio.....	63
Figura 5.15: Topografias obtidas por MEV (aumento de 100x) das superfícies usinadas por EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Severo.....	64

- Figura 5.16: Topografias obtidas por MEV (aumento de 300x) das superfícies usinadas por EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Severo..... 65
- Figura 8.1: Teste preliminar para avaliação da variação dos parâmetros de usinagem em função da TRM para o Óleo A..... 71

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1:	TRM experimentais e TRM calculadas para uma determinada liga.....	18
Tabela 2.2:	Aplicações Típicas de Eletrodos e Resultados Aproximados.....	23
Tabela 3.1:	Especificações importantes para Fluidos Dielétricos populares no mundo.....	30
Tabela 4.1:	Parâmetros empregados nos testes definitivos.....	39
Tabela 4.2:	Composição do aço-rápido ABNT M2 em (%).....	41
Tabela 4.3:	Propriedades físicas e elétricas do cobre eletrolítico.....	42
Tabela 4.4:	Características Típicas do Fluido A.....	49
Tabela 4.5:	Características Típicas do Fluido B.....	49
Tabela 4.6:	Características Típicas do Fluido C.....	49
Tabela 4.7:	Características Típicas do Fluido D.....	49
Tabela 4.8:	Características Típicas do Fluido QUEROSENE.....	50
Tabela 4.9:	Preços de mercado para os fluidos testados.....	50
Tabela 8.1:	Parâmetros utilizados nos testes preliminares para o Óleo A.....	72

**LISTA DE ABREVIATURAS**

Cu	-Cobre eletrolítico;
EDM	-Electrical discharge machining;
Gr	-Grafite;
LTM	-Laboratório de tribologia e materiais;
MEV	-Microscópio eletrônico de varredura;
NFD	-Número de fluidos dielétricos;
NR	-Número de repetições;
NTE	-Número total de ensaios;
NTE	-Número total de ensaios;
UÑT	-Laboratório de usinagem não tradicional;
RD	-Relação de desgaste;
TRM	-Taxa de remoção de material [mm <sup>3</sup> /min];
ZAC	-Zona afetada pelo calor.

**LISTA DE SÍMBOLOS**

I	-Corrente Elétrica [A];
Ra	-Rugosidade média aritmética [ $\mu\text{m}$ ];
T <sub>off</sub>	-Tempo inativo de cada descarga [ $\mu\text{s}$ ];
T <sub>on</sub>	-Tempo de duração de cada descarga [ $\mu\text{s}$ ];
V	-Tensão elétrica [V];
V <sub>f</sub>	-Volume de material gasto da ferramenta [ $\text{mm}^3$ ];
V <sub>p</sub>	-Volume de material removido da peça [ $\text{mm}^3$ ];
$\Delta m_f$	-Diferença entre a massa inicial e final da ferramenta [g];
$\Delta m_p$	-Diferença entre a massa inicial e final do material da peça [g];
$\gamma_f$	-Massa específica do material da ferramenta [ $\text{g}/\text{mm}^3$ ];
$\gamma_p$	-Massa específica do material da peça usinada [ $\text{g}/\text{mm}^3$ ];
D <sub>T</sub>	-Percentual relativo entre T <sub>on</sub> e T <sub>off</sub> ;
T <sub>S</sub>	-Intensidade de corrente ajustável da máquina.

Arantes, L. J., 2001, “Avaliação do Desempenho de Fluidos Dielétricos no Processo de Usinagem por Descargas Elétricas”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG.

## Resumo

O processo de Usinagem por Descargas Elétricas é muito utilizado na usinagem de materiais de elevada dureza, que são difíceis de serem usinados por processos convencionais, além de permitir a confecção de geometrias bem complexas e de dimensões diminutas. Um dos materiais que são largamente usinados por EDM (*Electrical Discharge Machining*) é o aço-ferramenta ABNT M2, que apresenta grande versatilidade, combinando excelente tenacidade, dureza e resistência a abrasão, muito indicado para confecção de matrizes de estampagem profundas e outras ferramentas de deformação plástica à frio. O objetivo principal deste trabalho é o estudo do desempenho de diferentes tipos de fluidos dielétricos em três regimes pré-estabelecidos com relação à rugosidade média aritmética ( $R_a$ ), taxa de remoção de material (TRM), relação de desgaste (RD) e rugosidade; além de discutir e analisar os mais importantes fatores que influenciam no processo de usinagem por descargas elétricas. Os diversos fluidos dielétricos utilizados possibilitam diferentes condições de usinagem e muito pouco se sabe sobre qual o fluido mais indicado para operações de acabamento ou desbaste. Foram feitos ensaios com 5 tipos diferentes de fluidos dielétricos e com uma ferramenta de cobre. Verificou-se que há diferenças importantes quando usina-se com fluidos diferentes, mantendo-se constantes todas as demais condições de operação. Notou-se que quando utilizando-se um determinado fluido a peça apresentou uma menor rugosidade e também uma maior TRM em alguns casos. Já em outros casos, uma maior TRM ocasionou em contrapartida uma Camada Refundida menos uniforme. Porém, a maior conclusão desse trabalho foi a de que o querosene, apesar de ser até 3 vezes mais barato que os demais fluidos, apresentou piores acabamentos superficiais e TRM não tão grandes quanto o esperado, além de maiores riscos ao operador.

**Palavras-chave:** EDM, Fluidos Dielétricos, TRM, Topografia e Rugosidade.

Arantes, L. J., 2001, "Evaluation of Performance of Dielectric Fluids for Electrical Discharge Machining Process", Master's Dissertation, Federal University of Uberlândia, MG.

### **Abstract**

The Electrical Discharge Machining process is very useful while machining very hard materials, which are very difficult to be machined by traditional processes, while can make complex geometries and minimum dimensions. One of the materials that are used in this process is high-speed steels, which are very hard and has a high mechanical resistance. The main objective of this work is the study of performance of different dielectric fluids used in EDM in different cut conditions in terms or metal removal rate (MMR) and wear ratio (WR) roughness parameter (Ra). A discuss of the most important factors that can produce different performance when machining with this process is presented. Five tests with different types of dielectric fluids using a cooper tool were carried out. Was noticed different performance between the fluids, which all the other conditions of operation were unchanged. According to the fluid the workpiece presented less roughness and a higher MMR in some cases. In other cases, a higher MMR produced in the other hand a recast layer less uniform. The most important conclusion of this work is about kerosene, which costs 3 times less than the specific dielectric fluids for EDM, presented worst finishing surfaces and not too high MMR as expected, despite all the risks for the operator.

**Keywords:** EDM, Dielectric Fluids, MMR, Roughness and Topography.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

A usinagem por descargas elétricas, ou EDM (*Electrical Discharge Machining*), ou como é conhecido ainda na indústria, usinagem por eletroerosão, é um processo indicado na usinagem de formas complexas em materiais condutores elétricos, especialmente aqueles de alta dureza, difíceis de serem usinados por processos tradicionais. Suas maiores aplicações são: fabricação de matrizes para estampagem, forjamento, fieiras para trefilação, extrusão, moldes de plástico, enfim, para o setor de ferramentaria em geral (Cruz et al, 1999).

Apesar de ser considerado um processo “não tradicional” de usinagem, a usinagem por descargas elétricas têm substituído processos ditos tradicionais como furação, fresamento, retificação e outras operações de usinagem em muitas indústrias no mundo. Desde seus primeiros dias, esse processo foi criado para operações que não poderiam ser feitas por processos convencionais, mas hoje tornou-se uma das tecnologias de usinagem mais avançadas, usando equipamentos CNC (Controle Numérico Computadorizado) de 6 eixos programáveis, com sofisticadas tecnologias, tanto nas fontes de energia quanto no controle das descargas. Tais melhoramentos tornaram possíveis a execução de superfícies espelhadas e dentro de apertadas tolerâncias (Guitral, 1997).

Os grandes avanços tecnológicos em EDM têm sido alcançados devido às pesquisas realizadas principalmente pelos fabricantes de equipamentos EDM e por pesquisadores de centros de pesquisa. Dentre esses avanços, destaca-se o acentuado desenvolvimento dos fluidos dielétricos utilizados no processo, que se tornaram cada vez mais importantes para o desempenho do processo, melhorando acabamento, velocidades de usinagem e qualidade do trabalho dos operadores (Guitral, 1997).

O fluidos dielétricos especificamente desenvolvidos para o processo EDM são óleos hidrocarbonetos altamente refinados ou sintéticos. Existem inúmeras características físicas e químicas que podem ser usadas para definir e identificar o desempenho de cada fluido. Neste trabalho serão abordadas as características mais importantes no processo, mas aquelas que são fornecidas pelos fabricantes, já que não se trata de um trabalho com análises químicas, mas sim de desempenho.

As características físico-químicas dos fluidos para EDM podem ou não influenciar o desempenho do processo. Dentre as características que têm influência decisiva estão: resistividade dielétrica, viscosidade, ponto de fulgor, estabilidade à oxidação. Outras características com pouca ou nenhuma influência no desempenho do processo são: odor, cor e ponto de fluidez. Atualmente, um fator importante quanto à escolha do fluido é a segurança quanto ao armazenamento e uso nas operações de EDM. Um fluido pode apresentar características químicas que proporcionam elevada qualidade no acabamento da superfície usinada e altas Taxas de Remoção de Material (TRM), mas ser nocivo à saúde do operador. A questão da qualidade do ambiente de trabalho e da saúde ocupacional deve ser levado em consideração devido à legislação ambiental e trabalhista, uma vez que os fluidos dielétricos mais tóxicos podem causar problemas sérios de dermatites e intoxicações pela inalação do produto evaporado (Intech EDM, 1996).

O principal objetivo deste trabalho é discutir e analisar alguns dos fatores mais importantes que influenciam no processo de usinagem por descargas elétricas, tais como rigidez dielétrica, densidade, viscosidade, etc.; além disso, avaliar o desempenho de alguns fluidos dielétricos comerciais no Brasil, suas características e possíveis aplicações, já que existem poucos trabalhos relacionados especificamente quanto ao estudo dos fluidos dielétricos.

A principal justificativa para realização deste trabalho se baseia no fato de existir a necessidade de uma literatura voltada para a indústria no sentido de orientar qual o fluido dielétrico mais indicado para cada aplicação (acabamento, desbaste, semi-acabamento, tipo diferente de material). Isso se comprovou durante a procura por artigos sobre o assunto, onde foi grande a dificuldade de se encontrar trabalhos restritos ao uso do fluido dielétrico na usinagem por eletroerosão. Alguns trabalhos já foram realizados sobre o desempenho de fluidos dielétricos, porém, com adição de pó de carboneto de silício, por Fernandes, 1999 e Rodrigues, 1999, o que não será realizado nesse trabalho. Portanto, espera-se que esse trabalho contribua tanto para a indústria quanto para orientação de novos estudos acadêmicos.

No Capítulo 2, apresenta-se as considerações gerais sobre o processo EDM, alguns exemplos de aplicação, evolução dos custos e velocidade de usinagem, qualidade das superfícies, etc. Encontra-se também alguns esclarecimentos quanto aos princípios básicos do processo, alguns conceitos importantes, a importância da voltagem, corrente e frequência de aplicação das descargas, o efeito da polaridade e os parâmetros de usinagem.

No Capítulo 3 é destacada a importância dos fluidos dielétricos, com a finalidade de informar a importância dos fluidos no desempenho do processo e esclarecer algumas dúvidas sobre o assunto, abordando suas principais características, tais como viscosidade, densidade,

rigidez dielétrica, limite de fluidez, cor, etc. Apresenta-se também a importância de cada uma dessas características para o processo, juntamente com as novas tendências mundiais, manutenção, vida dos óleos, e diferenças entre óleo e água deionizada.

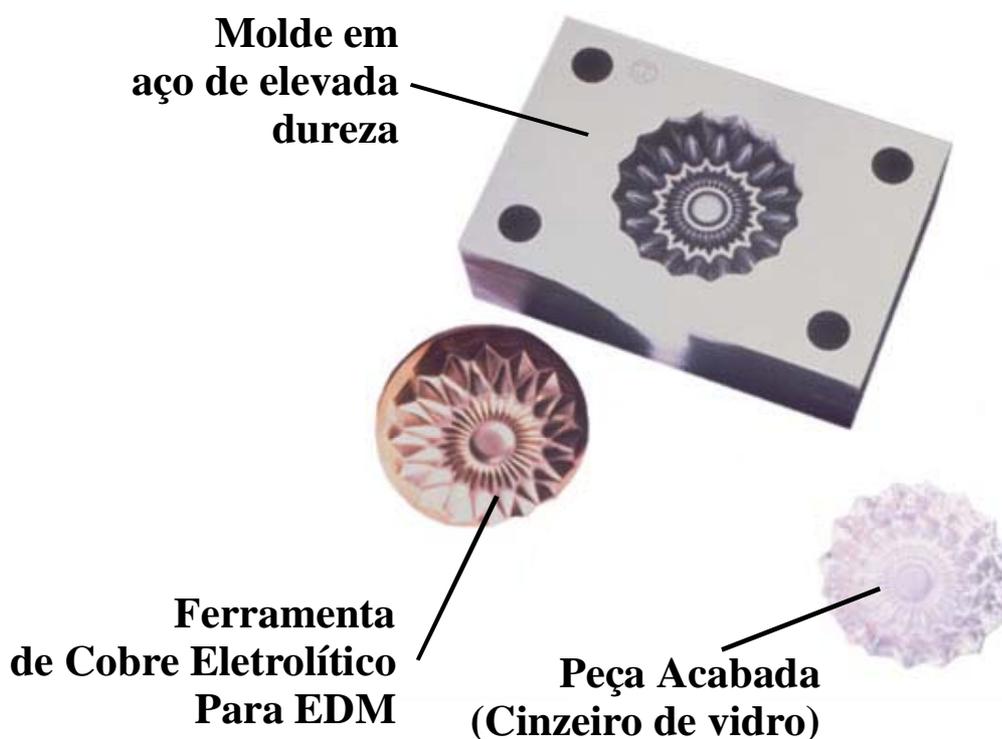
O Capítulo 4 apresenta o procedimento experimental, o qual foi dividido em 4 etapas: seleção dos parâmetros, testes preliminares, testes definitivos e avaliação dos resultados. Na primeira etapa, foi selecionado o equipamento EDM, o material e geometria da peça, ferramental a ser empregado e dispositivo auxiliar de recirculação de fluido dielétrico. Na etapa seguinte, realizou-se testes para escolha dos parâmetros mais adequados para a pesquisa. Nos testes definitivos foram feitos ensaios com 5 fluidos dielétricos diferentes, cada um em 3 regimes de usinagem, e cada ensaio foi repetido 5 vezes para que se pudesse ter uma boa média dos resultados. Na etapa final foram definidos quais seriam e como seriam feitas as análises dos resultados. Estes foram avaliados em função de vários fatores, tais como velocidade de usinagem, desgaste da ferramenta, rugosidade e análise de topografias das superfícies usinadas.

Algumas empresas contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa, dentre elas pode-se citar a Engemaq Equipamentos para Petróleo S/A, que forneceu apoio técnico à pesquisa, assim como parte dos fluidos dielétricos usados nos ensaios. A empresa demonstrou enorme interesse no assunto, pois como já foi dito, não existe no Brasil um estudo detalhado sobre avaliação de fluidos dielétricos usados em EDM. Contamos também com o apoio da Iorga Produtos Químicos Ltda., Archem Química, Micro Química Indústria e Comércio Ltda. e a Texaco, fabricantes de óleos lubrificantes e óleos para eletroerosão, que gentilmente doaram seus óleos para a realização dos ensaios.

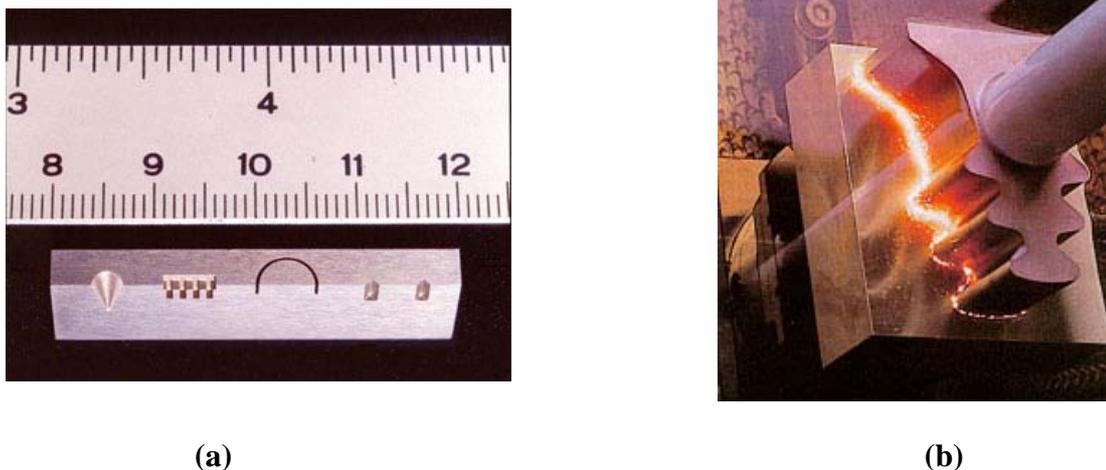
## CAPÍTULO 2

### CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O PROCESSO EDM

A usinagem por descargas elétricas, ou eletroerosão, ou EDM como é conhecido internacionalmente, é um dos mais populares processos não tradicionais de usinagem, um dos primeiros a surgir. EDM é um processo que permite a usinagem de furos, ranhuras e superfícies, com formas das mais complexas ou dimensões diminutas e materiais de elevada dureza, que seriam dificilmente usinados por processos convencionais, desde que condutores elétricos. Na Figura 2.1 e 2.2 são ilustrados alguns exemplos de operações e produtos feitos pelo processo EDM. Na Figura 2.1 é mostrada uma ferramenta de cobre, que deverá formar o molde para a fabricação de um cinzeiro de vidro, por exemplo. Na Figura 2.2 a, mostra-se orifícios e formas de dimensões muito pequenas e na Figura 2.2 b, mostra-se mais uma forma complexa para fabricação de moldes.

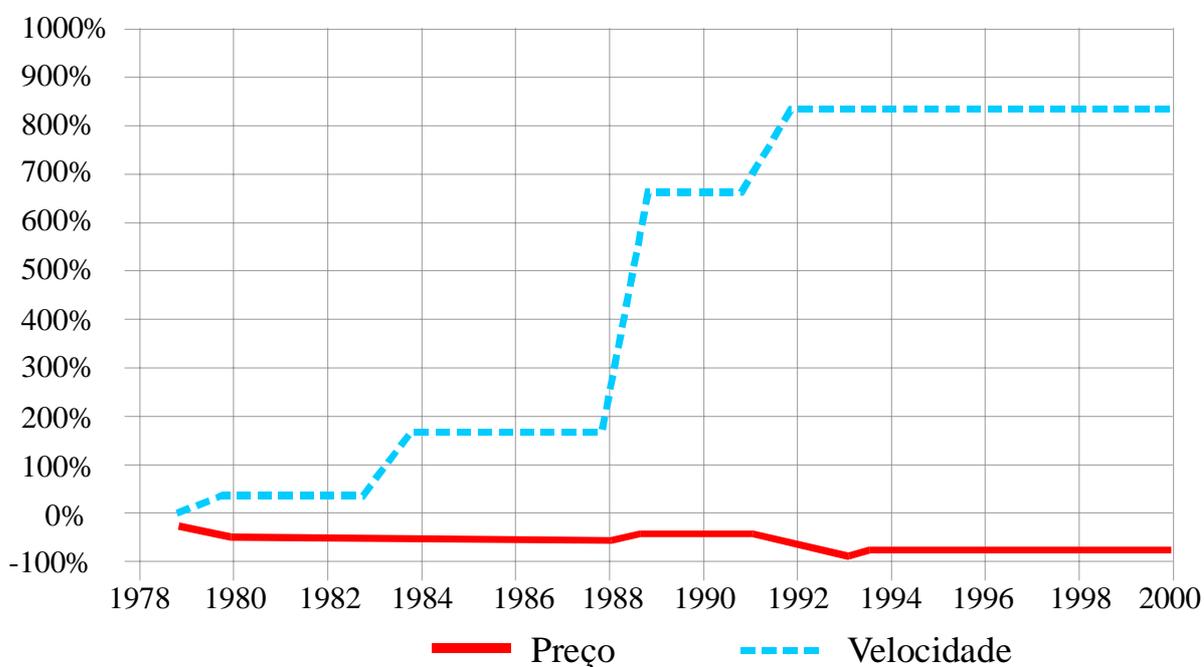


**Figura 2.1 – Molde, ferramentas de Cobre e Grafite para fabricação de cinzeiro (Allison, 2000).**



**Figura 2.2 – Exemplos de produção com o processo EDM: (a) pequenas dimensões e (b) peças de grande porte e geometria complexa (Intech EDM, 1996).**

Os principais fatores que contribuíram para o crescimento do processo EDM nos últimos anos foi a considerável queda do custo dos equipamentos e o aumento significativo das velocidades de fabricação, como mostra a Figura 2.3.

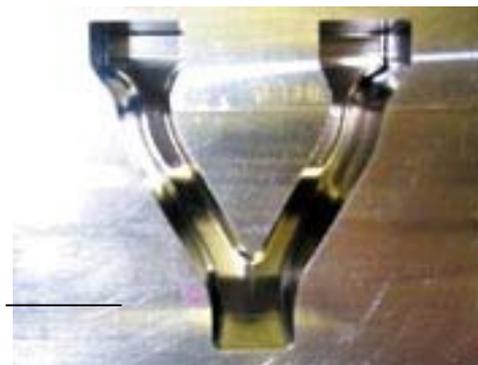


**Figura 2.3 – Curva de variação do preço e da velocidade de usinagem: 1978 -1999 (EDM Today Magazine, 1999).**

Outro grande avanço do processo EDM na última década foi a melhoria significativa da qualidade da superfície acabada, principalmente devido ao aumento da eficiência dos controladores das descargas elétricas e o avanço da qualidade dos fluidos dielétricos utilizados para o processo. Na Figura 2.4 mostra-se a qualidade da superfície usinada por EDM, em 2.4a uma superfície espelhada, e em 2.4b superfície com geometria complexa e de alta qualidade.



(a)



(b)

**Figura 2.4 – Qualidade das superfícies usinadas: (a) superfície espelhada e (b) geometria complexa com ótimo acabamento; ambas em aço de elevada dureza (Intech EDM, 1996).**

Outro aspecto positivo do processo EDM é o de viabilizar a usinagem de peças previamente tratadas. Isso evita os desvios de forma ou empenamentos que os tratamentos térmicos normalmente produzem e ainda reduz o número de operações no processo de fabricação. Apesar do processo de remoção de material ser de natureza térmica, o EDM é um processo relativamente “frio”, a nível macroscópico, pois a geração de calor fica restrita a regiões micrométricas muito localizadas. Outro benefício adicional é que, por não haver contato entre a ferramenta e a peça, não há geração de forças de corte. Este é um recurso valioso para usinagem de peças extremamente frágeis sem nenhum risco de fratura.

## 2.1 – Princípios do Processo

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. Na verdade, 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  $1000 \text{ W/m}^2$ , 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).

Esta descarga elétrica durará alguns milionésimos de segundo. Este período é denominado de  $T_{\text{on}}$ . Cessada a descarga elétrica, inicia-se, por alguns milionésimos de segundo, o período  $T_{\text{off}}$ , período que ocorrerá a emersão dos gases eletrolíticos. Os espaços ocupados pelo gás serão preenchidos pelo fluido dielétrico em temperatura menor que a região em usinagem, assim, com o choque térmico, ocorrerá uma micro-explosão e o desagregação das partículas fundidas da peça, dando início ao processo de usinagem (Kaminski & 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 por unidade de tempo de usinagem, medida em  $\text{mm}^3/\text{min}$ , depende de uma série de fatores, tais como:

- ↪ Intensidade de corrente e tensão aplicada (Potência);
- ↪ Características físicas do material (ponto de fusão, condutibilidade elétrica, micro-estrutura etc.);
- ↪ Duração do pulso ( $T_{\text{on}}$ ) e da pausa ( $T_{\text{off}}$ ), ou seja, a frequência de aplicação da corrente;
- ↪ Geometria da ferramenta/eletrodo;
- ↪ Material da ferramenta;
- ↪ Tipo de lavagem;
- ↪ Tempo de pausa para limpeza.

Os diagramas da Figura 2.5 demonstram a evolução da corrente e da tensão durante um ciclo de usinagem, onde:

$V$ - Tensão para abertura de arco;  $V_t$ - Tensão média de trabalho;  $V_d$ - Tensão de descarga

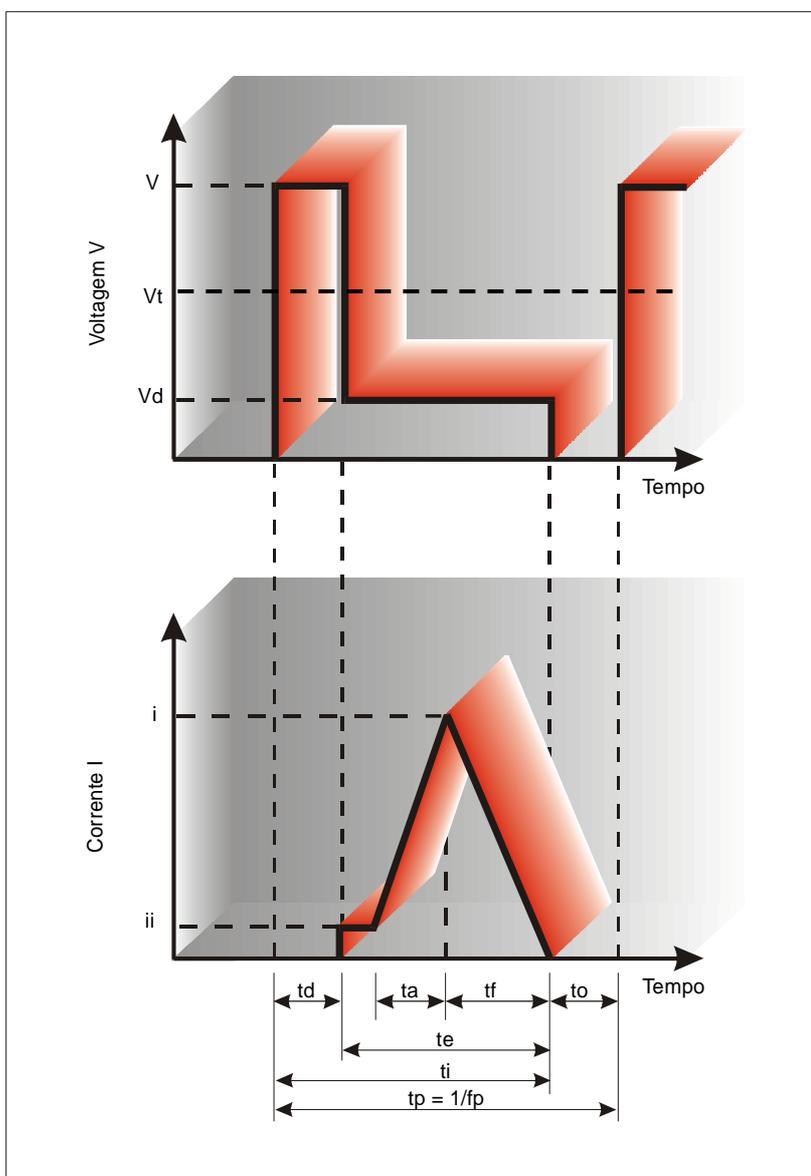
$t_e$ - tempo de descarga;  $t_i$ - tempo para  $T_{on}$ ;  $t_o$ - tempo de intervalo entre pulso  $T_{off}$

$t_p$ - ciclo total de pulso

$f_p$ - frequência

$t_a$ - período de elevação da corrente;  $t_d$ - período de retardo da ignição

$i_i$ - corrente de ignição;  $i$  - pico de corrente



**Figura 2.5 – Diagramas Tensão e Corrente pelo Tempo**

O princípio fundamental do processo EDM é a remoção de material da peça pelo efeito térmico das descargas provocadas pela abertura de arco de plasma (ionização do dielétrico), como já foi dito anteriormente. O calor gerado em cada descarga funde e até vaporiza partes micrométricas dos materiais mais próximos à região do “*gap*”, ou seja, região entre a peça e a ferramenta. Portanto, como na maioria dos processos de usinagem, a ferramenta também se desgasta (Benedict, 1987).

### **Polaridade**

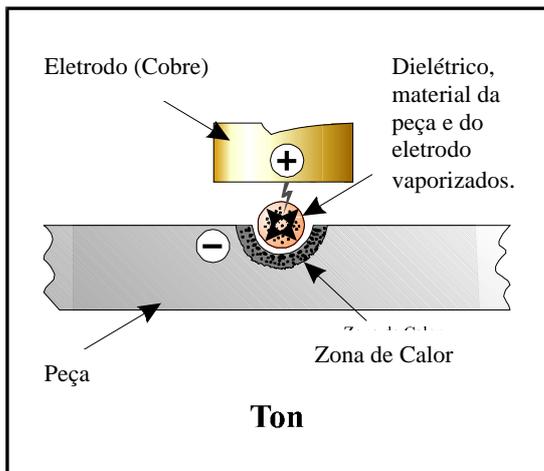
Em EDM, a polaridade representa qual lado da descarga é positiva ou negativa. A polaridade pode afetar a velocidade de remoção de material, ou melhor, Taxa de Remoção de Material (TRM), acabamento e estabilidade (Guitral, 1997).

Máquinas EDM por penetração podem usar tanto polaridade positiva quanto negativa, dependendo mais da aplicação, mas a maioria das operações são realizadas com o eletrodo positivo. Polaridade positiva vai usinar mais lentamente que na polaridade negativa, mas é usado na maioria das vezes para proteger a ferramenta de um desgaste excessivo.

Polaridade negativa é usada para altas taxas de remoção de material quando usando eletrodos de grafite, e pode ser usado quando usinando metal duro, titânio e metais refratários utilizando eletrodos metálicos, no caso mais comum, eletrodos de cobre. Com eletrodos de grafite, polaridade negativa é muito mais rápida que na polaridade positiva (em termos de TRM), chegando a cerca de 50% maior, mas com desgaste bem maior da ferramenta, de 30% à 40% (Guitral, 1997). Essa é uma boa escolha para cavidades grandes ou formas que podem ser retificadas facilmente.

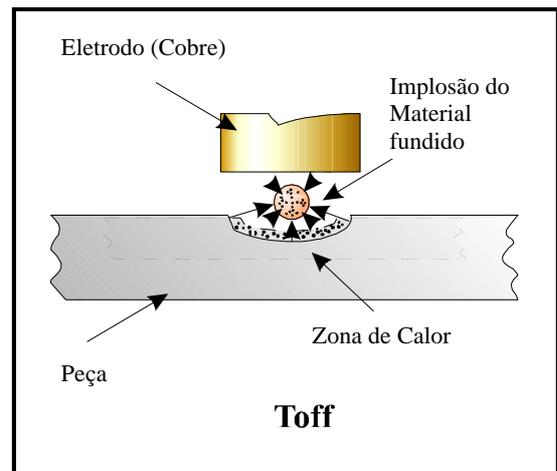
Máquinas de eletroerosão a fio quase sempre operam com polaridade negativa – ou seja, o fio é negativo e a peça positiva. Como na eletroerosão por penetração, as TRMs são altas usando polaridade negativa, mas como o eletrodo (fio) é constantemente renovado, o desgaste do eletrodo não é considerado.

Uma visualização da seqüência de usinagem é apresentado nas Figuras 2.6 a 2.8, onde estão esquematizados os detalhes da seqüência dos vários momentos dentro de um pulso elétrico, cuja duração está na faixa de alguns microsegundos a alguns milisegundos. 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 principalmente da peça. O fechamento do arco é o responsável na geração da referida implosão tão importante no processo EDM na retirada de partículas do par ferramenta-peça (Cruz et al, 1999).



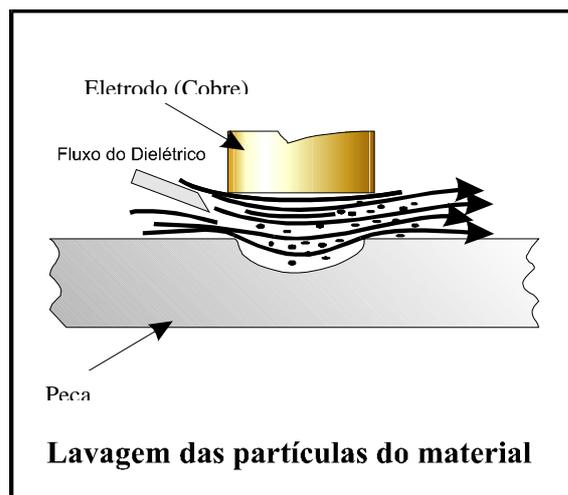
**Figura 2.6- Fusão do Material da Peça**

( $T_{on}$ )



**Figura 2.7- Implosão do Material Fundido**

( $T_{off}$ )

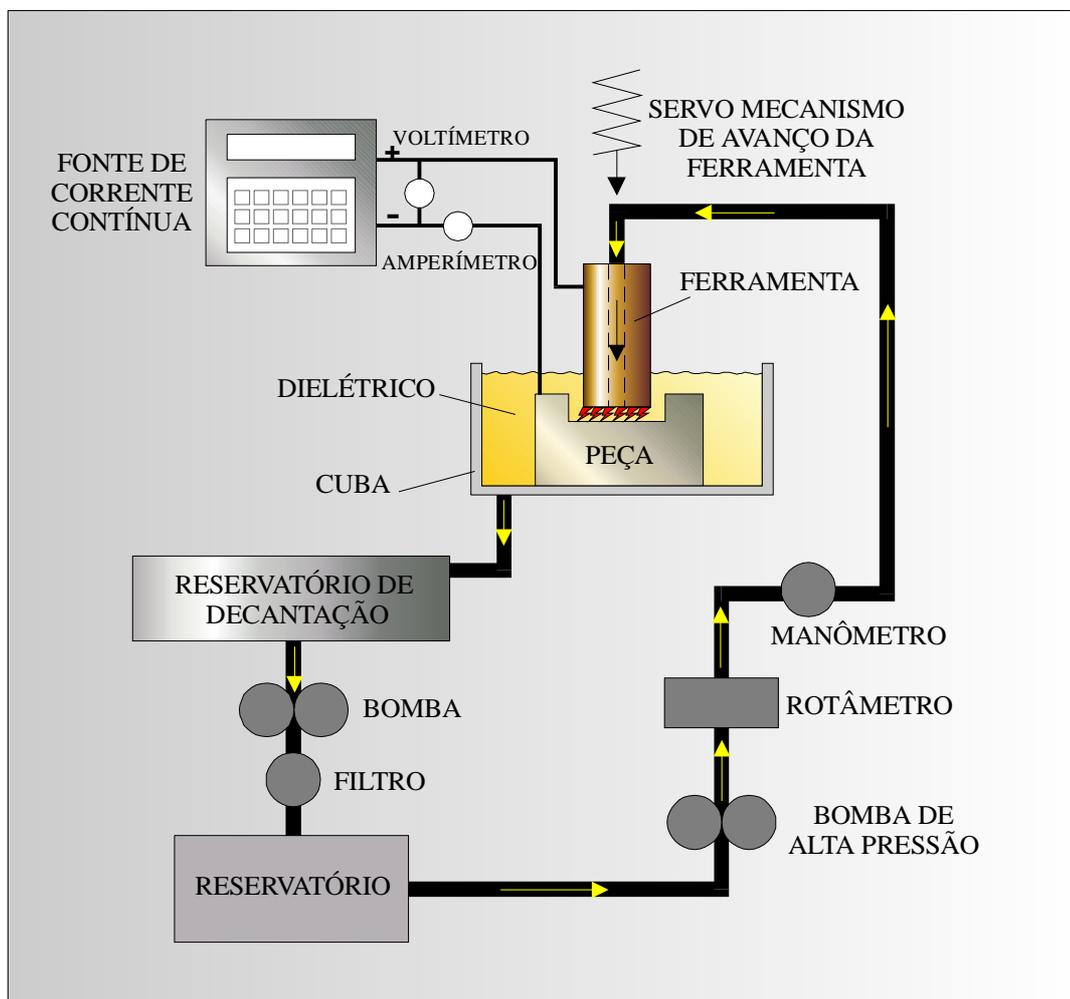


**Figura 2.8- Lavagem das Partículas** (*Cruz et al, 1999*).

A Figura 2.9 mostra esquematicamente as principais partes construtivas de um equipamento EDM por penetração. Nota-se que o eletrodo é colocado próximo à peça a ser usinada, sendo separada por uma distância muito pequena, cujos valores típicos encontram-se na faixa de 0,01 – 0,05 mm (Benedict, 1987).

A distância entre a ferramenta e peça é preenchida pelo fluido dielétrico, bombeado e filtrado de um reservatório até a região de usinagem. O fluido dielétrico tem um papel importante no processo EDM: refrigerar a região de usinagem, conduzir as partículas removidas

e controlar a potência de abertura da descarga (Fuller, 1989). Maiores detalhes serão abordados no Capítulo 3.



**Figura 2.9- Esquema dos principais elementos construtivos de um equipamento EDM.**

## 2.2 – Parâmetros de Usinagem

Os principais parâmetros do processo são, Taxa de Remoção de Material (TRM), acabamento superficial (AS), que normalmente são os principais parâmetros de avaliação de qualquer processo de usinagem; outro parâmetro importante em EDM é a Relação de Desgaste (RD), ou seja, a relação entre o volume de material removido da peça e o volume de material desgastado da ferramenta. Um processo EDM é melhor quanto maiores forem a TRM e a RD e quanto menores forem os valores da rugosidade. Entretanto, estes parâmetros de avaliação são influenciados por algumas variáveis do processo, apresentadas a seguir:

### 2.3 – Material da peça

Quanto maior for o ponto de fusão e vaporização do material da peça, menores serão a TRM, a RD e melhor o AS. Materiais como alumínio, chumbo, magnésio e suas ligas são fáceis de serem usinados pelo EDM, por causa dos seus baixos ponto de fusão e vaporização. O contrário ocorre para materiais como o ósmio, titânio e suas ligas que tem elevados pontos de fusão e vaporização. Outra propriedade do material bastante influente é a condutividade elétrica. Quanto melhor condutor elétrico for o material, maior a TRM.

### 2.4 – Material da ferramenta

Há uma extensa lista de materiais empregados para ferramentas de EDM, porém os mais usados são cobre e grafite. As principais características de cada um desses materiais são:

**Cobre:** excelente condutor e grande facilidade de fabricação de ferramentas de pequenas dimensões.

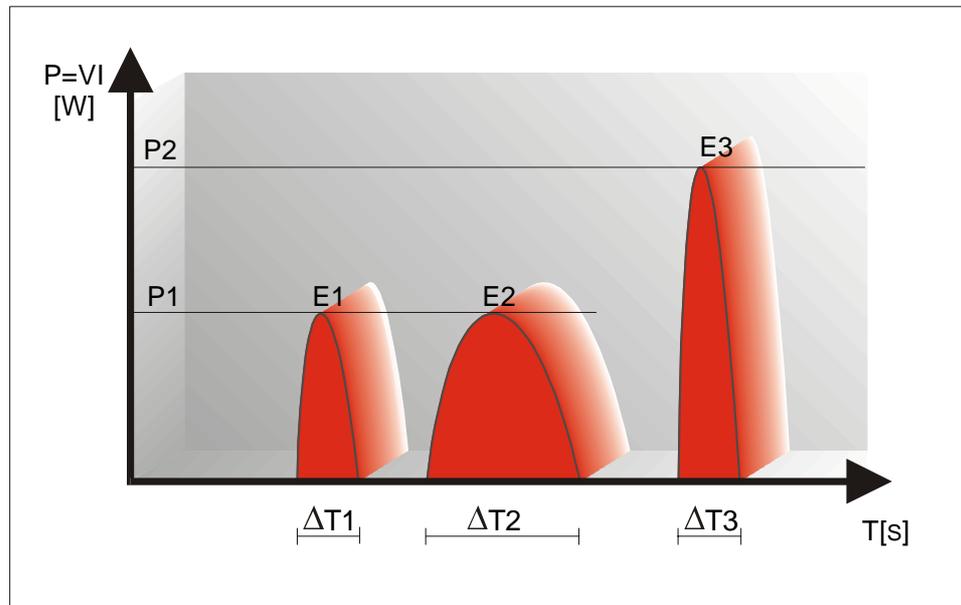
**Grafite:** alto ponto de fusão e dificuldade para fabricação de ferramentas de pequenas dimensões por ser relativamente frágil.

Normalmente, os melhores valores são obtidos com o grafite, pelo ponto de fusão mais alto desse material. No entanto, como o grafite é um material que se contamina com muita facilidade e se apresenta com diferentes porosidades, muitas vezes pode apresentar baixo desempenho quanto à RD. Por isso, geralmente é utilizado o cobre pela sua melhor condutibilidade elétrica (Benedict, 1987).

### 2.5 – Regime de operação

O que caracteriza o regime de corte é a potência elétrica  $P = VI$  (voltagem  $\times$  corrente) e a duração do pulso elétrico, como ilustra a Figura 2.10. No caso, ilustram-se três situações com dois níveis de potência ( $P_1$  e  $P_2$ ) e dois níveis de duração do pulso ( $\Delta t_1$  e  $\Delta t_2$ ). Para  $P_1$  e  $\Delta t_1$  tem-se pequena TRM. Para  $P_1$  e  $\Delta t_2$  tem-se maior TRM que na situação anterior. Se a energia do pulso (dada pela integral  $E = \int P dt$ ) for a mesma (o que ocorreria, por exemplo, se  $E_2 = P_1 \cdot \Delta t_2$  fosse igual a  $E_3 = P_2 \cdot \Delta t_1$ ), a TRM também se mantém.

Tem-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.



**Figura 2.10 – Representação dos níveis de potência e duração do pulso no processo EDM (Cruz et al, 1999).**

## 2.6 – Corrente

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. Quanto maior a área da superfície, maior a força ou corrente a ser aplicada pela descarga. Maiores correntes são usadas em cavidades ou detalhes com grandes áreas de superfície.

Para aplicação de penetração, a máxima intensidade de força ( $I_{\text{máx}}$ ) é aproximadamente 0,1 ampères por milímetro quadrado da seção do eletrodo. Essa fórmula simples pode ser baseada na área superficial ( $A_{\text{sup}}$ ) do eletrodo multiplicada pela constante 0,1 A/mm<sup>2</sup>, ou seja:

$$I_{\text{máx}} = 0,1 \times A_{\text{sup}} \text{ [A]} \quad (2.1)$$

Por exemplo, a máxima amperagem para um eletrodo quadrado de 10mm de lado poderia ser calculada pela multiplicação de um lado pelo outro 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.

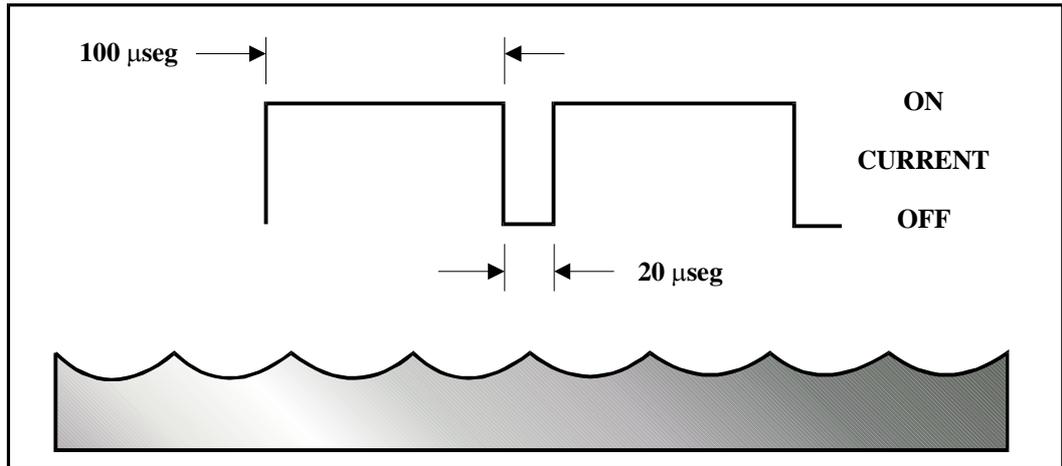
## 2.7 – Frequência

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. Operações de acabamento, nos quais tem-se  $T_{on}$  e  $T_{off}$  bem menores, haverá vários ciclos por segundo e poderia ser considerado uma regulagem de alta frequência. Muitas vezes pode-se realmente escutar uma mudança de frequência quando mudando os tempos  $T_{on}$  e  $T_{off}$  durante a usinagem. As Figuras 2.11 a 2.13 mostram as formas das superfícies usinadas por EDM, de forma simplificada, em diferentes frequências, e os efeitos representativos no perfil superficial.

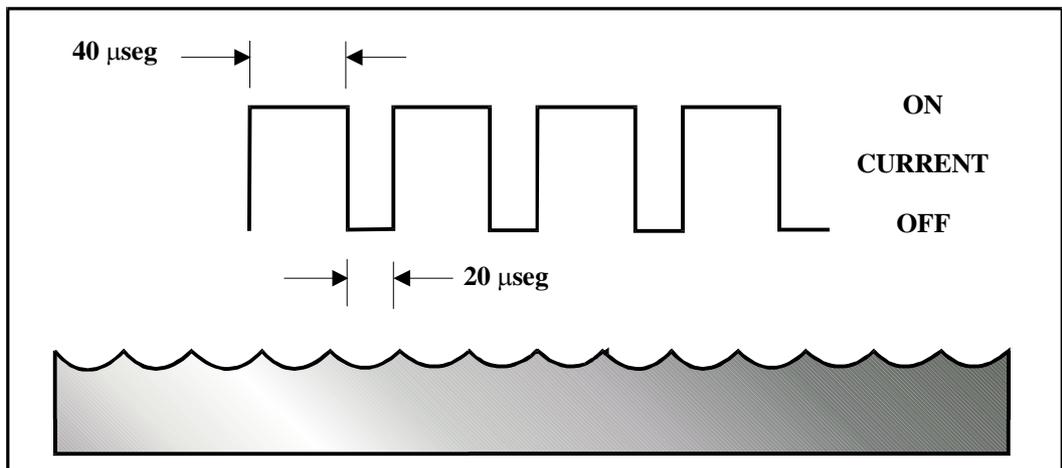
A Figura 2.11 mostra que o acabamento com  $T_{on}$  longo é bem grosseiro. Isso é devido ao fato de que longa duração da descarga é suficiente para fundir uma grande cratera. Em contra partida, a camada refundida vai ser consideravelmente mais espessa com uma ZAC (Zona Afetada pelo Calor) potencialmente mais profunda. Isso pode representar problemas quanto à integridade da superfície usinada a não ser que seja feita uma segunda operação de acabamento pelos processos EDM, ECM (Usinagem Eletroquímica), AFM (Usinagem por Fluxo Abrasivo), ou até mesmo polimento manual.

Na Figura 2.12, 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.

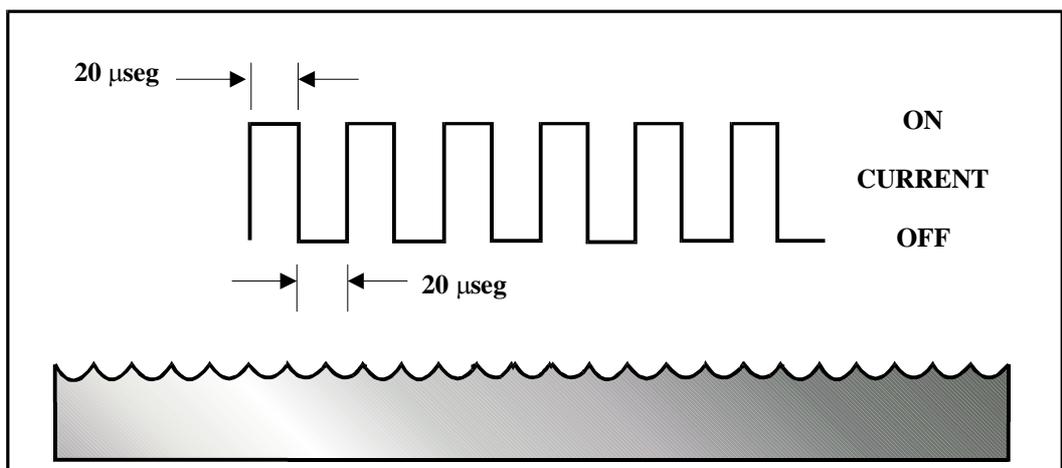
A Figura 2.13 apresenta a característica da superfície em operações de acabamento. Pode-se ver que o perfil de descarga é muito mais denso, com uma intensidade de descargas maior pela mesma unidade de tempo. Com descargas de curta duração, há muito pouco material erodido, como se pode ver pelas pequenas crateras. Esse é o método usado para operações de acabamento em EDM, diminuindo-se a força e o  $T_{on}$  antes de se obter a forma final.



**Figura 2.11 – Baixa Frequência/Desbaste** (*Guitral, 1997*).



**Figura 2.12 – Frequência Moderada/Semi-acabamento** (*Guitral, 1997*).



**Figura 2.13 – Alta Frequência /Acabamento** (*Guitral, 1997*).

## 2.8 – Ferramental

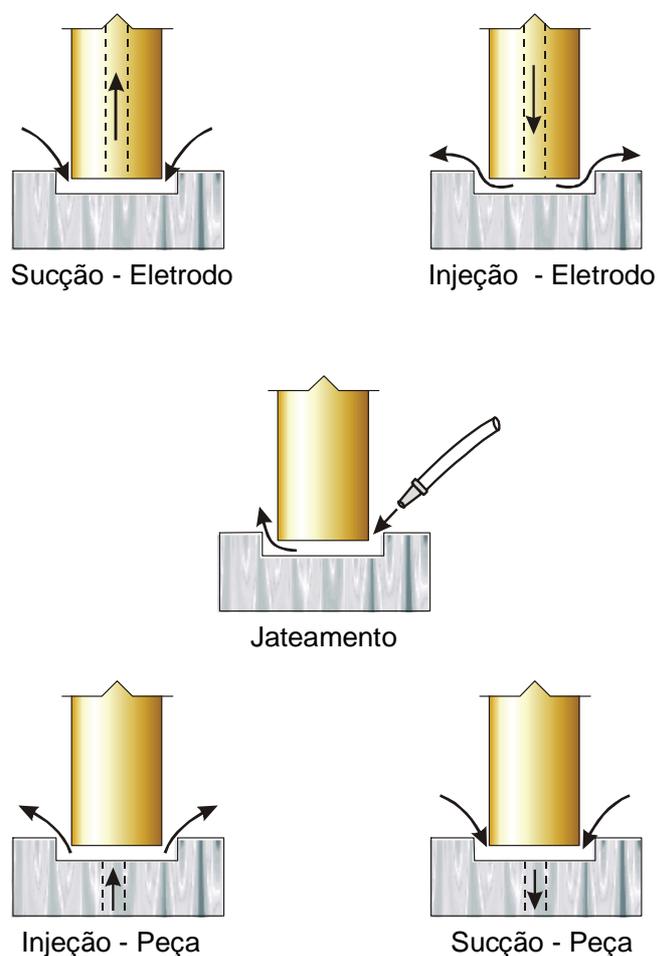
O ferramental pode ser definido como o conjunto que engloba a geometria da ferramenta propriamente dita, o sistema de fixação da peça e o sistema de lavagem. A geometria da ferramenta modifica a velocidade de usinagem e a TRM. Um exemplo é um eletrodo cilíndrico maciço e um eletrodo cilíndrico vazado. A usinagem por EDM com eletrodo cilíndrico maciço com parâmetros do processo constantes, terá uma velocidade menor que a usinagem com eletrodo cilíndrico vazado. Isso acontece porque com o eletrodo vazado, o volume de material a ser fundido é bem menor que no caso do eletrodo maciço, onde todo o volume do furo, por exemplo, deverá ser fundido. No eletrodo vazado, o tarugo interno não será fundido, terá que ser fundido apenas o material em volta do mesmo para obtenção da geometria desejada (McGeough, 1988).

Atualmente, com o advento de máquinas CNC, as ferramentas se restringem a uma fina haste com extremidade esférica. Com métodos computacionais, são possíveis obter 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 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. Esta renovação garante também o resfriamento mais pronunciado através da ferramenta ou peça. A lavagem interna pode ser feita por sucção ou injeção conforme ilustrado na Figura 2.14. As vantagens de um ou outro sistema depende 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 et al, 1999).

Todo o conjunto que compõem 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 2.14 – Sistemas de lavagem no processo EDM (Cruz et al, 1999).**

## 2.9 – 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 tem 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. Entre esses destacam-se:

↳ As propriedades do material da peça, incluindo o ponto de fusão e 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,  $T_{on}$  e  $T_{off}$ ;
- ↳ Sistema de lavagem (Figura 2.13);
- ↳ Tamanho do “gap”;
- ↳ 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.

**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 (Mamalis et al, 1987). 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:

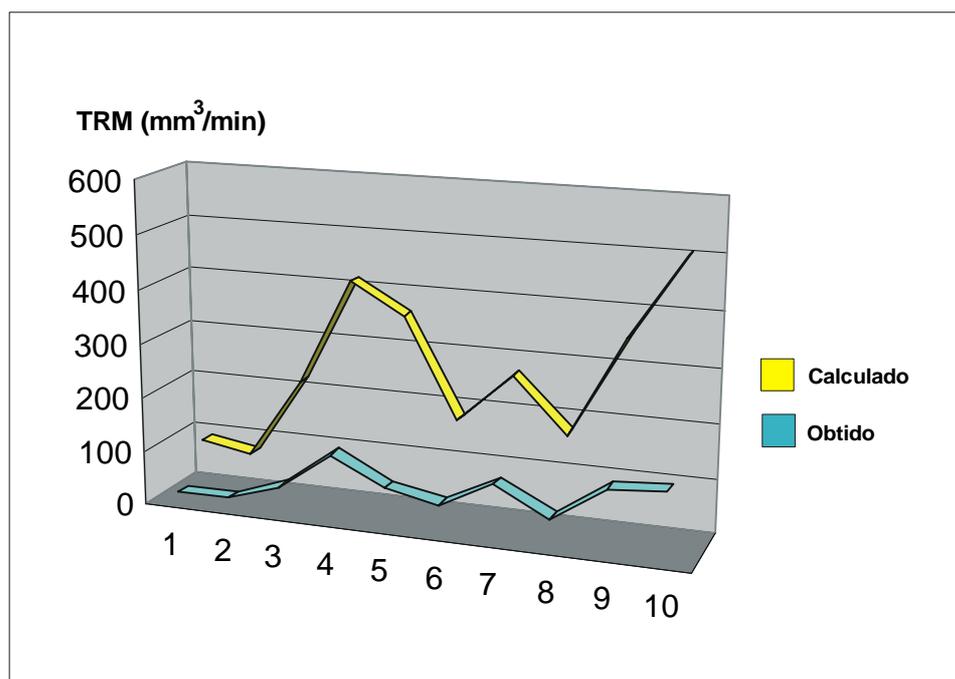
$$TRM = n \cdot f_t \cdot V_{wc} \quad [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (2.2)$$

Em que  $V_{wc}$  é o metal removido por pulso,  $f_t$  é a frequência total do pulso, e  $n$  é um coeficiente de correção que depende de: inclusão dos pulsos inativos em  $f_t$ ; 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, dá um coeficiente  $n = 0,299 \pm 17,6\%$ . Veja Tabela 2.1:

**Tabela 2.1 – TRM experimentais e calculadas (Mamalis et al, 1987).**

TRM (mm <sup>3</sup> /min) obtida	TRM (mm <sup>3</sup> /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 2.15, verifica-se uma diferença da ordem de 4 vezes entre os valores calculados e os valores obtidos experimentalmente, ou seja, é mantida 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 2.15 – Variação da TRM para os valores calculados e obtidos experimentalmente**  
(Mamalis et al, 1987).

## 2.10 – Relação de Desgaste (RD)

A produtividade bem como os custos do processo EDM, dependem, em parte, do material usado para fabricação da ferramenta. O tamanho da cratera produzida na peça é determinado pela energia da descarga e pelo material da peça. 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 Relação de Desgaste (RD) (Benedict, 1987). Tal como a TRM, o cálculo da Relação de Desgaste (RD) é altamente complexa e também depende de inúmeros fatores, como os relacionados anteriormente.

## 2.11 – Textura e Integridade Superficial

Qualquer processo de remoção de material produz alterações superficiais e sub-superficiais na região usinada. Essas alterações influem decisivamente no desempenho da peça em trabalho, o que é agravado quando essas peças estão sujeitas à 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, se refere às irregularidades geométricas da superfície e a segunda tem relação com as alterações metalúrgicas superficiais e subsuperficiais da peça após o processo de usinagem.

No caso específico do processo EDM, de acordo com Field et al, 1989, as principais alterações encontram-se esquematizadas da Figura 2.16. Estas alterações decorrem das altas temperaturas geradas no processo e de possíveis reações químicas que podem ocorrer na microregião usinada, uma vez que altas temperaturas agem como agente catalisador dessas reações e promove o aumento do processo de difusão de átomos.

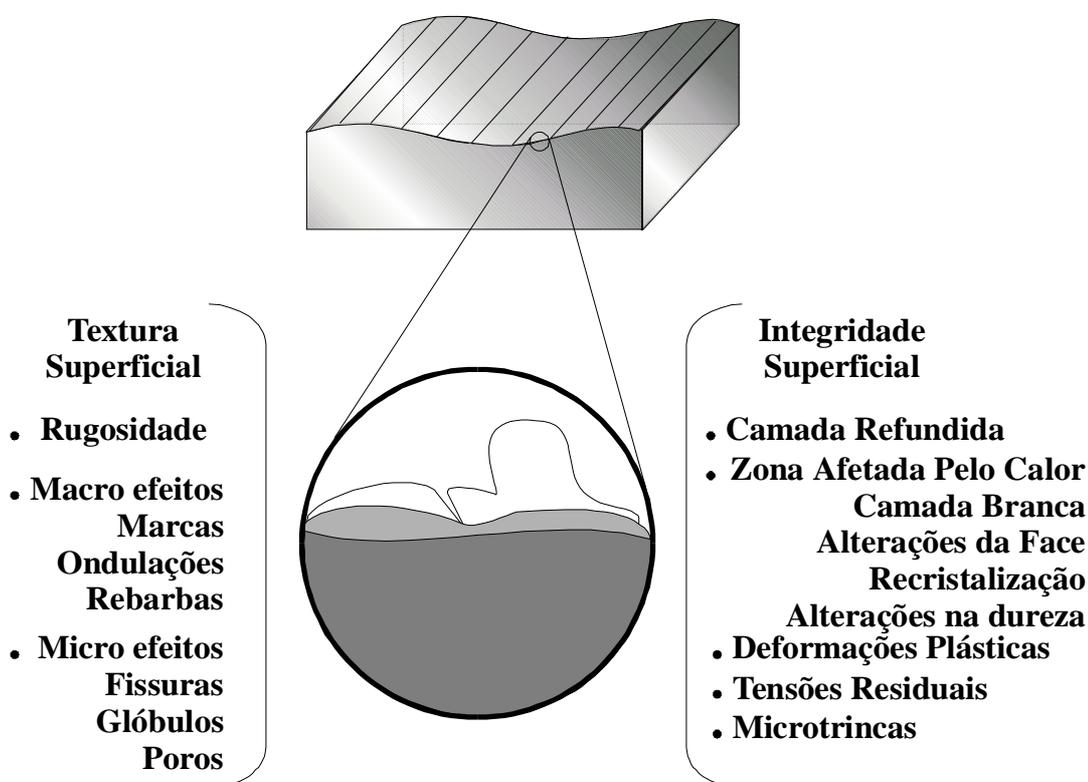
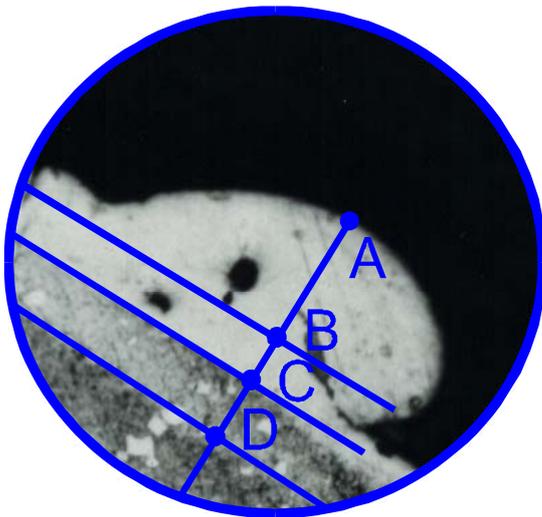


Figura 2.16 – Efeitos Superficiais e Sub-superficiais (Field et al., 1989).

## 2.12 – Camada Refundida

A camada refundida é intrínseca ao processo EDM, e apesar das novas tecnologias empregadas, a natureza térmica do processo EDM impede a sua total eliminação. A Figura 2.17 mostra a disposição das camadas distintas de um material usinado por eletroerosão.



### Legenda:

- A - camada refundida discreta**
- B - camada refundida uniforme**
- C - ZAC**
- D - material base**

**Figura 2.17 – Micrografia mostrando as camadas distintas no material usinado por eletroerosão (Fernandes, 1999).**

A formação da camada refundida ocorre segundo explicação a seguir. Depois de uma descarga, forma-se 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 carbonetizada e é chamada de material refundido ou ainda “camada branca”. Abaixo da camada branca fica a área chamada de “zona afetada pelo calor” (ou ZAC). Essa área 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, 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 (Lima, 1997).

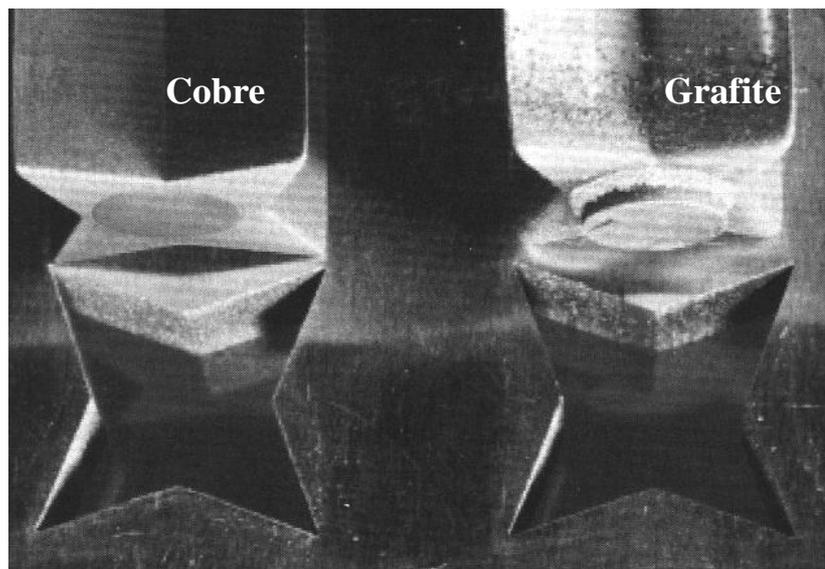
Óleos dielétricos mudam as características microestruturais do material de base pela produção de um tratamento térmico não controlado –aquecimento do metal a uma temperatura muito alta e depois resfriamento em um óleo. O calor excessivo quebra o óleo em outros

hidrocarbonetos e resinas. O metal fundido reage com os átomos de carbono do óleo dielétrico e depois se depositam na camada refundida, criando uma superfície “carbonetizada”. Mesmo quando usinando materiais pré-endurecidos, a camada refundida produzida pelo óleo possuirá geralmente dureza mais elevada que o material de base. Esse efeito pode ser percebido facilmente quando se deve polir uma cavidade usinada por EDM (Guitral, 1997).

A camada refundida em dielétricos aquosos é diferente de óleo dielétrico 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.

### 2.13 – Desgaste da Ferramenta

Quando se pretende prever o desgaste da ferramenta, vários parâmetros combinados vão determinar a quantidade de desgaste após a usinagem. Num primeiro instante, é a capacidade que o material tem de resistir aos danos térmicos, mas a densidade do eletrodo, a polaridade e as frequências de usinagem são também usadas na maior parte da “equação de desgaste”. A Figura 2.18 mostra a grande diferença entre o desgaste de ferramentas de cobre e grafite, em um determinado *setup* de usinagem (altas frequências e polaridade negativa).



**Figura 2.18 – Diferenças no desgaste das ferramentas de cobre e grafite na usinagem por EDM com altas frequências e polaridade negativa (Guitral, 1997).**

Eletrodos de grafite possuem maior resistência ao desgaste em baixas frequências, mas vai ser significativamente maior em altas frequências e/ou aplicações com polaridade negativa. O uso de altas frequências com eletrodos de grafite é usualmente reservado para operações de acabamento com baixas TRMs, ou altas velocidades e operações de polaridade negativa, e em ambos os casos o eletrodo é considerável “descartável”, ou seja, o consumo está em segundo plano.

A Tabela 2.2 mostra algumas aplicações EDM típicas e os resultados aproximados obtidos usando-se diferentes tipos de materiais para eletrodo/ferramenta. Esses dados são muito genéricos, devido às grandes variações das capacidades das fontes, mas são referências aceitáveis na seleção de materiais e durabilidade dos eletrodos (*Guital, E. Bud, 1997*).

**Tabela 2.2 – Aplicações Típicas de Eletrodos e Resultados Aproximados (*Guital, 1997*).**

ELETRODO	POLARIDADE	PEÇA	DESGASTE
Cobre	+	Aço	2 – 10%
Cobre	+	Inconel	2 – 10%
Cobre	+	Alumínio	< 3%
Cobre	-	Titânio	20 – 40%
Cobre	-	Metal Duro	35 – 60%
Cobre	-	Cobre	35 – 45%
Cobre	-	Cobre/Tungstênio	40 – 60%
Cobre /Tungstênio	+	Aço	1 – 10%
Cobre /Tungstênio	-	Cobre	20 – 40%
Cobre /Tungstênio	-	Cobre/Tungstênio	30 – 50%
Cobre /Tungstênio	-	Titânio	15 – 25%
Cobre /Tungstênio	-	Metal Duro	35 – 50%
Grafite	+	Aço	< 1%
Grafite	-	Aço	30 – 40%
Grafite	+	Inconel	< 1%
Grafite	-	Inconel	30 – 40%
Grafite	+	Alumínio	< 1%
Grafite	-	Alumínio	10 – 20%
Grafite	-	Titânio	40 – 70%

## CAPÍTULO 3

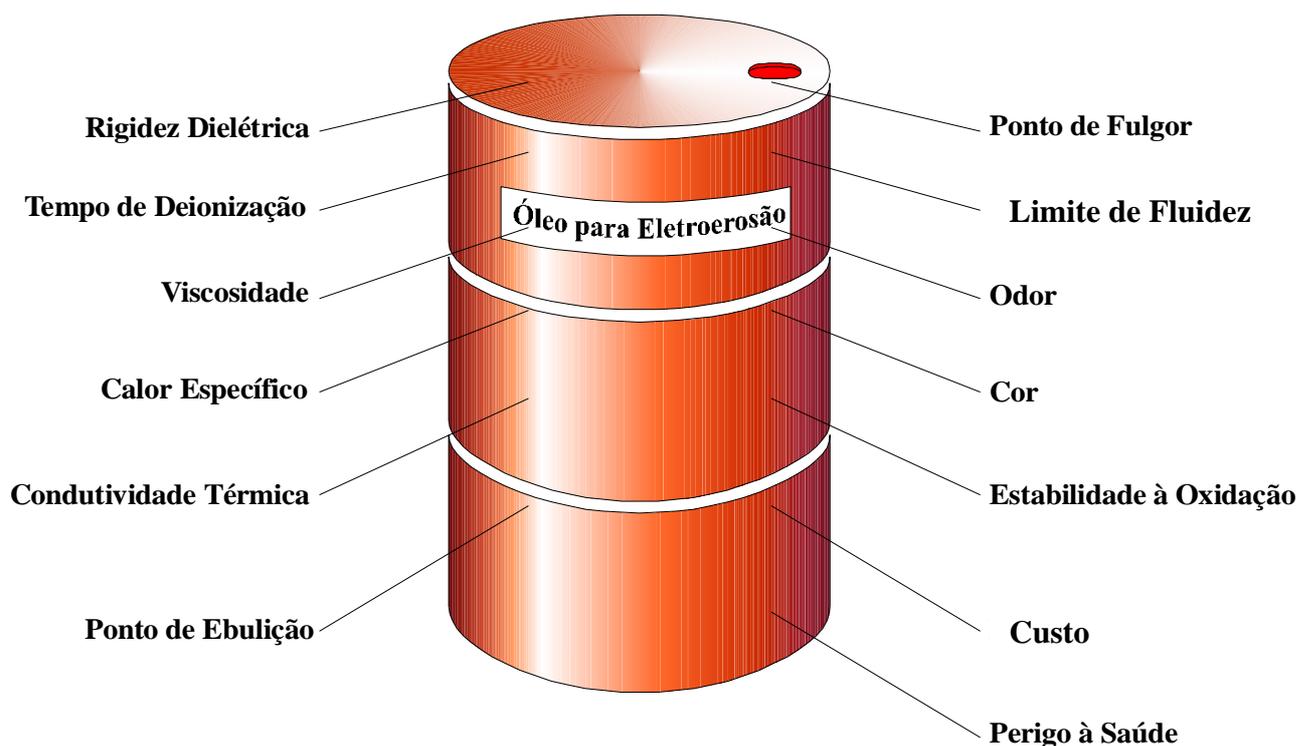
### FLUIDO DIELÉTRICO

O fluido dielétrico é muito importante para o desempenho do processo EDM, pois atua diretamente em vários aspectos da usinagem. Conforme Fuller, 1989, o fluido dielétrico tem um papel fundamental no processo: controlar a potência de abertura da descarga. O fluido pode ser querosene, hidrocarbono aditivado – ambos derivados do petróleo – água deionizada e até mesmo certas soluções aquosas. Ele exerce duas outras funções no processo: promove a lavagem da interface ferramenta-peça (*gap*), arrastando para fora as partículas erodidas e auxilia no arrefecimento do sistema, nas vizinhanças das descargas. O arrastamento adequado é muito importante para o desempenho otimizado do processo, sendo o grande responsável pela presença de uma camada refundida mais ou menos profunda. A capacidade de arrefecimento influencia também no desempenho 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, o que acaba por ser muito prejudicial à integridade superficial da peça.

Benedict, 1987, diz que das três funções, a primordial para a eficiência do processo é a lavagem dos produtos gerados no corte. O objetivo é evitar curtos circuitos e ou uma baixa taxa de remoção pela estagnação do fluido dielétrico. Segundo Cruz et al, 1999, uma lavagem inadequada permite que as partículas de metais e os resíduos de carbono, resultantes do fracionamento do fluido dielétrico, se acumulem na interface ferramenta-peça. Devido à condutividade do metal e do carbono, o acúmulo dos mesmos interfere na função do servomecanismo de avanço e também aumenta a quantidade de arcos estáticos. 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 freqüentes serão as operações de recuo automático realizado pela máquina, e maiores os cursos desses recuos. Essa função é automática, e permite que a própria máquina, utilizando sensores que controlam o servo-mecanismo de avanço do porta-ferramenta, realize uma lavagem mais eficiente da cavidade que está sendo erodida, proporcionando um aumento na qualidade da superfície usinada.

### 3.1 – 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 3.1:



**Figura 3.1- Características importantes na seleção de um fluido dielétrico para EDM.**

**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 conseqüente 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, seu valor no processo de seleção do fluido torna-se pouco importante, pois, assim que o fluido é usado, ele torna-se contaminado com as partículas sólidas do processo, alterando significamente esse valor.

**Tempo de Deionização:** Um dos fatores que implicam em altas TRMs 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.

**Viscosidade:** Viscosidade é uma medida da resistência ao escoamento do fluido. No geral, quanto menor for a viscosidade, melhores serão as características de escoamento, particularmente em cavidades profundas, pequenos detalhes, etc., apesar de alta viscosidade poder proporcionar bom desempenho em alguns tipos de operações de desbaste. Os testes mais importantes para determinação da viscosidade são o *Centistokes* à 40°C e 100°C, e *Saybolt Universal Seconds* (SUS) à 37,8°C, com a segunda sendo o teste predominantemente usado nos Estados Unidos. O Teste USU é feito passando-se 60 ml do fluido à 37,8°C através de um orifício de diâmetro padronizado e oficial. O número de segundos que leva para que essa quantidade de fluido passe pelo orifício é a viscosidade do produto, com um menor número indicando que o fluido é menos viscoso, ou de escoamento mais livre. Por exemplo, se leva 34 segundos, a viscosidade é dita 34SUS@37,8°C. Comercialmente, os fluidos dielétricos apresentam as menores viscosidades na faixa de 30 à 35 segundos. Alta viscosidade 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. Baixa viscosidade 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 o calor específico, mais energia térmica pode acumular sem grande aumento na temperatura, o que aumenta o rendimento do processo e aumenta a vida do fluido dielétrico. O elevado crescimento 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 a condutividade térmica do fluido dielétrico, 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 repositarem 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.

**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:** o 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. É importante entender que essa não é a temperatura na qual o fluido pode espontaneamente sofrer ignição (auto-ignição). Deve-se notar que os fabricantes de fluidos dielétricos normalmente classificam o ponto de fulgor como um valor “típico”, e o valor publicado não necessariamente constitui uma especificação mínima. 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. Muitos fluidos dielétricos tipicamente tornam-se opacos e mais viscosos quando a temperatura se aproxima do Limite de Fluidez. 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); fazendo com que o operador tenha que esperar até o aquecimento total do fluido para se iniciar a operação de usinagem. A maioria dos fluidos comerciais não sofrem modificações químicas ao se resfriarem até ou abaixo de seu limite de fluidez. 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:** A oxidação ocorre quando o oxigênio ataca e degrada o fluido dielétrico. O processo é acelerado pelo calor, luz e reações com metais; e na presença de água, ácidos e contaminantes sólidos. Quanto maior a estabilidade à oxidação do fluido dielétrico, maior será a duração no sistema EDM. Como a longevidade do fluido é obviamente importante, esse parece ser um critério indispensável para a seleção. Infelizmente, os fabricantes de fluidos EDM não criaram um teste padrão para esta característica, e portanto, as diferentes misturas não podem ser comparadas. Entretanto, a maioria dos fluidos EDM de alta qualidade apresentam boa estabilidade à oxidação, tanto pela adição de um inibidor quanto pela própria natureza anti-oxidante da base do fluido. Notavelmente, isso não é verdade com óleos minerais em geral e alguns fluidos não específicos para serem usados como fluidos dielétricos para eletroerosão. 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. Outra característica importante quanto à estabilidade à oxidação é que 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 (Intech EDM, 1996).

**Perigo à saúde:** Um fator muito importante nos dias atuais, é o perigo à saúde causado por produtos químicos durante seu uso na indústria. 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. Fluidos sintéticos com menores adições de aromáticos e até soluções aquosas são hoje usados para evitar problemas tais como dermatites, problemas respiratórios e até mesmo sérias intoxicações. Os efeitos à saúde causados por materiais manipulados tem se tornado um assunto de grande importância nos últimos anos. Apesar de todos os fornecedores de fluido EDM recomendarem um grande cuidado no armazenamento e que se evite prolongada exposição aos fluidos, na realidade, muitos operadores de EDM não usam proteções tais como luvas, máscaras e semelhantes. 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. Os fluidos listados na Tabela 3.1 servem como exemplificação dos tipos comerciais vendidos nos Estados Unidos e no Brasil que possuem baixo conteúdo de aromáticos (Intech EDM, 1996).

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.

Segundo König & Dauw (1998), a maior parte do gás produzido com estes tipos de fluido é vapor de água, que é invisível e, mais importante, não é prejudicial à saúde e não causa problemas ambientais. Particularmente na faixa de desgaste, 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 conseqüente melhoria na TRM.

**Tabela 3.1- 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
BP 180	82	32-35	-45
BP 200	90	32-35	-44
BP 200T*	106	32-35	-3
Grade 1025*	127	41-44	+7
Commonwealth 244	107	32-35	+7
IonoPlus*	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.

### 3.2 – Tendências Mundiais

Nos capítulos anteriores foi abordado os princípios do processo de Usinagem por Descargas Elétricas. Nesse capítulo, já foi mostrado a importância do fluido no processo, detalhada suas principais características e seus efeitos durante a usinagem. Agora, será analisado o Fluido Dielétrico ou Óleo para Eletroerosão relacionados com outros aspectos. Algumas perguntas são importantes, tais como: Como se sabe ele está funcionando bem? Como ele é sua composição? E quanto à saúde e segurança do operador?

Mesmo que se pudesse ter uma técnica de aplicação do fluido avançadíssima ou se tivesse sido criado um “*setup*” extremamente eficiente, isso não significaria muito se, por causa de um fluido dielétrico inferior, se todo o ambiente de trabalho fosse poluído ou todos os operadores da fábrica faltosos por causa de dermatites. Nota-se que agora está sendo feita uma análise de acordo com as novas tendências mundiais: não causar danos à natureza e à saúde humana.

Óleos tem sido usados como fluido dielétrico desde o início do desenvolvimento do processo, mas apenas na última década grandes esforços científicos e de pesquisa têm sido feitos

tanto na composição quanto na biocompatibilidade com as pessoas que trabalham com esse material. Questões de saúde e segurança no trabalho aceleraram esse processo de desenvolvimento.

Existem vários tipos diferentes de fluidos disponíveis no mercado para EDM, tipicamente fluidos parafínicos e de bases aromáticas. Mesmo por não se tratar de um trabalho químico, é importante ressaltar que é recomendável o uso de fluidos dielétricos que foram especificamente desenvolvidos para a eletroerosão. Muitos fluidos dielétricos vendidos por refinarias não-específicas, principalmente nos EUA, são na verdade sub-produtos de outros processos que “apenas acontecem” durante o refino. Essas empresas não sabem o que fazer com esses subprodutos, então os comercializam com sendo fluido dielétrico para EDM. Portanto, deve-se escolher um fluido que vai ser compatível não somente com a operação a ser realizada mas, mais importante nos dias atuais, 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 (Guitral, 1997).

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. Há anos atrás, não era raro em uma empresa que trabalhasse com EDM ter grande parte de seus funcionários com problemas respiratórios e/ou com problemas de pele. Essa condição de trabalho ainda existe, pois, infelizmente, óleos minerais ainda são usados e são, sem exceção, cancerígenos.

### **3.3 – Manutenção Preventiva**

Dependendo do uso e da manutenção adotada, o óleo dielétrico pode durar por vários anos. Trocas regulares de filtros assim como prevenção à contaminação por água vai estender consideravelmente sua vida.

Contaminação por água não pode ser completamente evitada devido à condensação que ocorre na superfície do eletrodo gerada pelas elevadas temperaturas. Eletrodos de grafite contribuem enormemente com essa condição, mais que os eletrodos de cobre, devido à sua grande porosidade, que atrai e absorve a umidade do ar. Estocando os eletrodos de grafite em locais limpos e secos vai manter a absorção de umidade e outros contaminantes em valores

mínimos. Algumas empresas que utilizam eletrodos de grafite de grande dimensão devem colocá-los em um forno de baixa temperatura na noite anterior ao seu uso (mas isso é uma exceção, não uma regra). Um método menos drástico para manter a absorção de umidade e contaminantes num valor mínimo seria a utilização de lâmpadas de 60 Watts junto aos eletrodos, no gabinete ou armário de estoque (Guitral, 1997).

A cor do óleo não necessariamente é um indicador de que ele deva ser substituído. 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. 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. Nenhum filtro irá remover essa descoloração do óleo, portanto, não se deve confundir “coloração do óleo” com “sujeira do óleo”.

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

Se a troca do óleo for necessária, deve-se drenar o reservatório completamente e remover todo tipo de sedimento. É muito importante lembrar que por questões ambientais e de segurança, o fluido nunca deve ser descartado no meio ambiente, devendo ser armazenado em tambores ou barris específicos e depositados em local apropriado.

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 (especialmente quando estão frescos), e vai ajudar a limpar as áreas inacessíveis no sistema.

Deve-se reabastecer o reservatório com um óleo EDM de alta qualidade, feito especialmente para esse propósito. 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.

Devido ao seu baixo ponto de fulgor, 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. É recomendado, como dito anteriormente, o uso de fluidos dielétricos desenvolvidos para uso em EDM. Caso haja alguma dificuldade na seleção do fluido, deve-se procurar seguir a orientação do fabricante, e ir ajustando com o tempo de acordo com os parâmetros de operação, material e geometria da ferramenta, material da peça, etc, até atingir-se uma utilização otimizada.

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. 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).

### **3.4 – Fluidos Dielétricos: óleo ou água?**

Existe uma diferença entre a camada refundida produzida por EDM a fio e EDM por penetração. Isso é atribuído principalmente ao fluido dielétrico usado: óleos especiais para máquinas por penetração e água deionizada para corte a fio. Portanto, os efeitos na integridade superficial são tão diferentes quanto o óleo e a água.

O óleo dielétrico pode mudar o material de base criando um processo de tratamento térmico incontrolável e indesejável: superaquecendo a área, depois (durante o  $T_{off}$ ) resfriando em óleo. As altíssimas temperaturas “quebram” 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 “carbonetizada”. Mesmo quando usinando materiais pré-endurecidos, a camada refundida pelo óleo vai ser geralmente bem mais dura que o material de base.

Superfícies usinadas por dielétrico aquoso pode ser várias vezes menos duras que o material de base. Isso é porque óxidos são produzidos pela vaporização da água. Essa oxidação,

com a eletrólise, pode liberar carbono, cobalto e outros átomos do material da superfície. Isso pode fazer da rebarbação uma operação mais difícil no alumínio, molibidênio 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, tornando-se parte da camada refundida, contribuindo para um processo de liga descontrolado, influenciando no material de base (Guitral, 1997).

Como descrito anteriormente, a camada refundida em óleo tende a ser mais carbonetizada, dependendo da afinidade do material da peça com o carbono (átomos de carbono são liberados do óleo devido às altas temperaturas da descarga e podem ser absorvidos pelo metal fundido. Na água, o calor da descarga “quebra” a água em seus elementos principais – hidrogênio e oxigênio. A superfície externa deixada 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 absorver átomos de hidrogênio, o que provoca um fenômeno chamado “fragilização por hidrogênio”, prejudicando a estrutura e a integridade da camada superficial da peça.

Independente do dielétrico usado ou a composição metalúrgica da superfície, esse fino extrato de material resolidificado é chamado, como visto anteriormente, de camada refundida. Ela é conhecida também como “camada branca”, devido sua aparência branca nas micrografias. A camada refundida é um sub-produto do processo EDM e é inevitável. Apesar de hoje existirem fontes sofisticadas e da alta tecnologia, proporcionando um controle fino do processo, o que acaba resultando em uma considerável redução dos danos metalúrgicos à peça, a natureza térmica do processo EDM torna impossível a eliminação total da camada refundida.

Logo abaixo da camada branca encontra-se a chamada “Zona Afetada pelo Calor” (ou ZAC). Essa área foi parcialmente afetada pelas altas temperaturas das descargas elétricas. 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 que a zona não afetada, o material de base. Tanto a camada refundida quanto a ZAC podem afetar a estrutura e/ou a integridade da superfície eletroerodida (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. Se a camada refundida é muito profunda e não é reduzida ou removida por algum

polimento manual ou mecânico – Usinagem por Fluxo Abrasivo (AFM) ou Usinagem Eletroquímica (ECM), etc. Essa camada refundida com dureza muito alta e frágil pode causar trincas na superfície usinada, contribuindo para uma fadiga prematura da peça. Por vários anos, esse tem sido um assunto muito importante para a indústria de aeronaves ou aeroespacial; entretanto, com os contínuos melhoramentos e refinamentos das fontes modernas de EDM, a aceitação de partes usinadas por descargas elétricas por essas indústrias tem se tornado cada vez maior.

Apesar da grande aceitação e sucesso nas indústrias aeroespaciais do processo EDM (incluindo-se também a indústria automobilística de competição, como a Fórmula 1), ainda existe uma grande necessidade de uma melhor educação da comunidade de engenheiros mecânicos, metalúrgicos e de produção como um todo, para que se possa romper com todos os paradigmas que ainda cercam o processo EDM.

Em qualquer caso, penetração ou a fio, toda usinagem será bem mais rápida usando-se água como dielétrico. Isso se deve ao fato de que o fluxo de água é muito mais eficiente, mais “frio” 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 escoam melhor. Isso é porque a água é menos viscosa que o óleo e produz no processo uma melhor penetração. Essa é a velocidade e a capacidade com a qual um líquido pode naturalmente mover-se através de um espaço confinado. No caso do processo EDM, é claro, há “*gaps*”, extremamente pequenos. Acabamento tipo “espelho” (super-acabamento) possuem “*gaps*” tão pequenos que mesmo uma ação capilar da penetração do “*gap*” é bem vinda e a água faz isso de forma bem melhor que o óleo dielétrico (Guitral, 1997).

Se as TRMs são sempre maiores usando-se água como um dielétrico, pode-se pensar no porquê da utilização de óleo ao invés da água. Inicialmente, para reduzir desgaste da ferramenta/eletrodo (Guitral, 1997).

Há alguns anos, a polaridade padrão era de eletrodo negativo. Isso promovia excelentes TRMs mas grande sacrifício do eletrodo por causa de seu elevado desgaste. Como o projeto, fabricação e fluxo de um eletrodo é mais caro que a própria operação de EDM, é desejável encontrar formas de se proteger o eletrodo do desgaste excessivo. Isso pode ser conseguido usando-se polaridade positiva na ferramenta que embora produzindo uma usinagem mais lenta (menores TRMs), o seu uso reduz o desgaste da ferramenta de mais de 50% para 1% ou menos. Hoje, com a intenção de proteger mais a ferramenta, a polaridade positiva é considerada padrão.

Experimentos com dielétricos aquosos em penetração começou mais com o intuito de eliminar a contaminação por óleo de certas partes do que uma questão de aumento das TRMs.

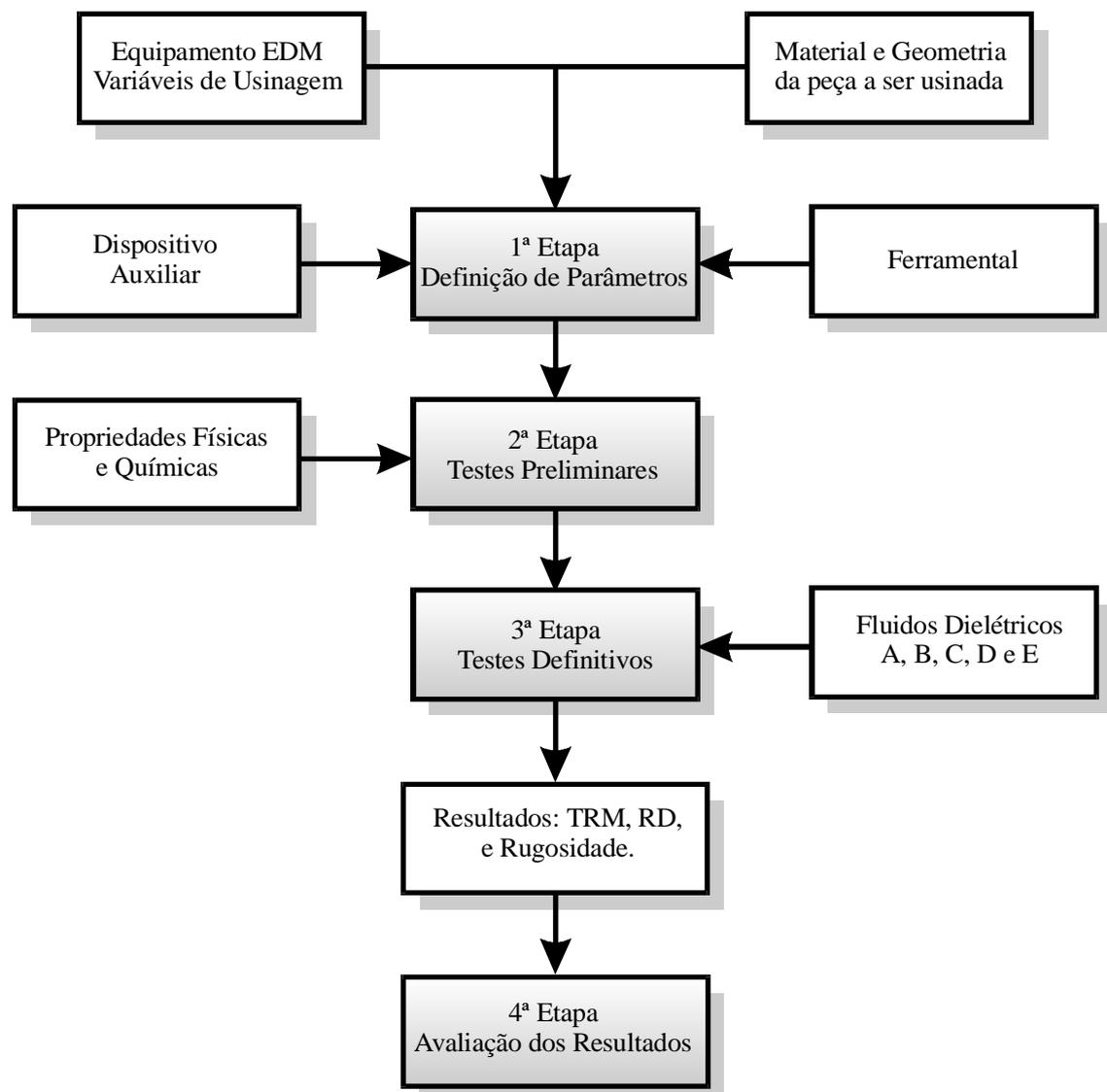
Dessa forma, descobriu-se que a velocidade de usinagem no processo por penetração pode aumentar mais de 5 vezes usando-se dielétrico aquoso como os usados na eletroerosão a fio. Uma comparação com eletrodo de grafite contra uma peça de aço é aproximadamente 3,2 g/min a 40 A para o óleo, ao passo que com o mesmo *setup* em água vai correr a 6,0 g/min a 40 A e a velocidade continua a crescer com o aumento da amperagem. Atualmente, tabelas de fabricantes mostram que as TRMs para dielétricos aquoso param em 80 g/min a 320 A. A superfície acabada vai ser mais rugosa também. Um acabamento melhor de 25 RMS ( $4\mu\text{R}_{\text{máx}}$ ) usando um dielétrico de óleo vai crescer para 125 RMS ( $20\mu\text{R}_{\text{máx}}$ ) com água.

Os dielétricos aquosos especiais usados nessas operações de usinagem são muito caros, pelo fato de evaporar muito mais rapidamente, devem ser trocados com maior frequência que os óleos dielétricos. Infelizmente, as altas TRMs 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.

## CAPÍTULO 4

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 4.1 apresenta de forma esquemática as diversas etapas para a execução deste trabalho.



**Figura 4.1 – Esquema sob diagrama de blocos para a metodologia.**

O procedimento anteriormente mostrado apresenta quatro etapas distintas:

**1ª ETAPA:** Seleção dos Parâmetros

**2ª ETAPA:** Testes Preliminares

**3ª ETAPA:** Testes Definitivos

**4ª ETAPA:** Avaliação dos resultados

#### **4.1- Seleção dos Parâmetros**

Entre os parâmetros a serem definidos estão: o equipamento EDM usado com suas principais características e variáveis de usinagem, o material e a geometria da peça a ser usinada, o ferramental empregado e o dispositivo auxiliar de injeção do fluido dielétrico.

##### **4.1.1- Equipamento EDM**

Os testes foram realizados em equipamento EDM por penetração, uma ENGEMAQ 440NC, fabricado pela Engemaq Eletroerosão S/A. Esse é um equipamento com gerador de controle de pulso, sem CNC, operando automaticamente após seleção dos níveis de operações possíveis, mediante prévia seleção das funções disponíveis no painel gerador.

Segundo McGeough (1988), equipamentos com controle de pulso comparados com os de circuito de relaxação apresentam melhor taxa de remoção de material com a grande vantagem de redução do desgaste do eletrodo, para acabamento superficiais comparáveis. Estes resultados se devem ao melhor ciclo de trabalho dado por  $T_{on}$  e  $T_{off}$  (Kaminski & Capuano, 1999).

Os ciclos de cada descarga são o balanço entre os tempos ativo –  $T_{on}$  (duração do tempo de descarga) e inativo ou simplesmente intervalo –  $T_{off}$  (duração do tempo de pausa entre duas descargas consecutivas). Portanto, inúmeros regimes de trabalhos podem ser selecionados variando-se a intensidade de corrente, a tensão, o  $T_{on}$  e o  $T_{off}$  isoladamente.

A Figura 4.2 apresenta os principais componentes do equipamento EDM utilizado neste trabalho, os quais são: gerador, cuba, porta ferramenta, cabeçote, e reservatório.



**Figura 4.2- Equipamento EDM por penetração – ENGEMAQ 440 NC**

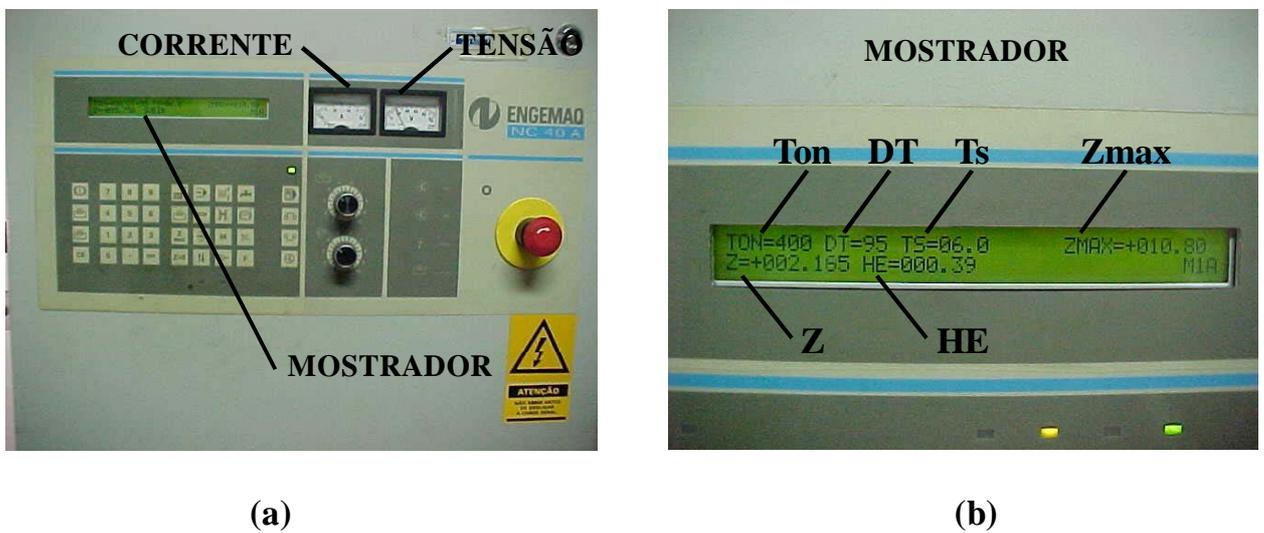
#### **4.1.2- Variáveis de Usinagem**

Os regimes de usinagem utilizados nos ensaios foram três regimes diferentes de usinagem: Desbaste Severo, Desbaste Médio e Desbaste Leve. Para cada regime, teoricamente espera-se que qualidades diferentes dos óleos dielétricos promovam rendimentos diferenciados nas TRMs, RDs e acabamento superficial. Utilizou-se do manual da ENGEMAQ 440NC para determinação das variáveis mais adequadas para nossa pesquisa. As variáveis estão detalhadas na Tabela 4.1 a seguir:

**Tabela 4.1- Parâmetros empregados nos testes definitivos.**

<b>REGIME</b>	<b><math>T_{on}</math> [<math>\mu s</math>]</b>	<b><math>D_T</math> [%]</b>	<b><math>T_S</math></b>	<b>Corrente [A]</b>	<b>Tensão [V]</b>
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:  $D_T = (T_{on} \times 100) / (T_{on} + T_{off})$ .  $T_s$  representa a intensidade de corrente ajustável na máquina. No mostrador da ENGEMAQ 440NC, faz-se a leitura da corrente e da tensão da descarga aplicadas pela máquina. Foram fixados também alguns parâmetros importantes tais como o afastamento periódico da ferramenta: 0,4 [mm], tempo de erosão por afastamento: 6 [s], orbital da máquina: desligado. No mostrador temos 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). Na Figura 4.3 podemos visualizar o painel de controle (a) mostrador com os parâmetros de desbaste severo (b).



**Figura 4.3 – Painel de controle (a) e mostrador com parâmetros de desbaste severo (b).**

#### 4.1.3- Material e geometria da peça

O material da peça utilizado nos ensaios foi aço-rápido ABNT M2. Esse aço-ferramenta apresenta grande versatilidade, combinando excelente tenacidade, dureza (64 a 66RC) e resistência à abrasão, indicado para ferramentas de usinagem em geral como brocas, fresas, machos e cossinetes, estampos de corte, punções, matrizes de estampagem profunda e outras ferramentas de deformação plástica a frio. Além do fato de ser largamente utilizado na manufatura de ferramentas, a escolha deste material se deu principalmente por ser considerado um material de difícil usinagem por processos convencionais, o que o torna altamente indicado para ser usinado por EDM. Além de apresentar elevado grau de uniformidade em suas características físicas e estruturais. A geometria da peça é de uma barra de seção quadrada

(10mm x 10mm), com entalhe semi-cilíndrico. A Tabela 4.2 apresenta a composição química do aço-rápido ABNT M2 em (%).

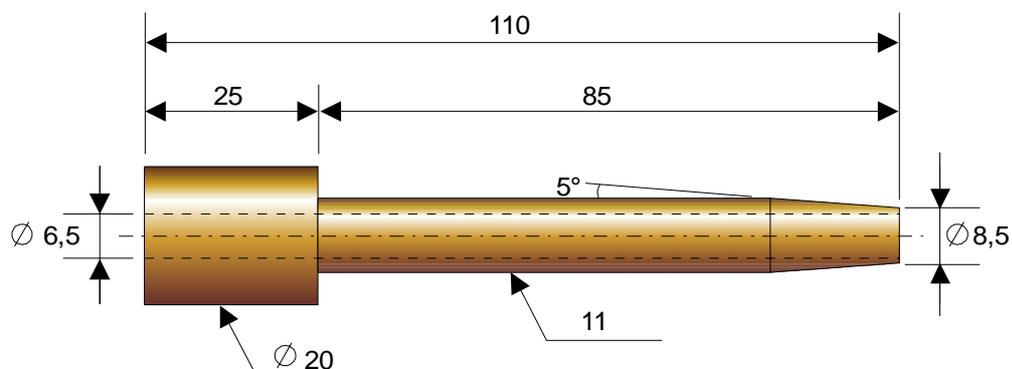
**Tabela 4.2 – Composição Aproximada do aço-rápido ABNT M2 em (%).**

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

#### 4.1.4- Ferramental empregado

A geometria da ferramenta, bem como suas principais dimensões, é apresentada na Figura 4.4. A geometria tubular impõe um sistema de lavagem interno à ferramenta. Principalmente em operações de furação, uma desvantagem do sistema de lavagem por injeção em relação ao de sucção interno à ferramenta, conforme comenta McGeough (1989), é a conicidade gerada pelas descargas laterais entre ferramenta e peça criada pelo arraste de partículas erodidas que emergem do fundo do furo para a superfície.

Entretanto, para compensar o efeito da conicidade, a geometria da extremidade da ferramenta possui formato cônico. Segundo os resultados de Kurafuji & Suda (1965), uma ferramenta com extremidade cônica produz uma rugosidade melhor na peça quando comparado com outras formas. Porém, é importante salientar que esse trabalho não teve como objetivo usinagem de precisão, ou seja, com poucos desvios geométricos. É importante ainda lembrar que, a forma na extremidade da ferramenta pode aumentar o fluxo do dielétrico, o que garante melhor taxa de remoção de material.



**Figura 4.4 – Geometria da ferramenta de cobre vazada e de ponta cônica utilizada nos ensaios.**

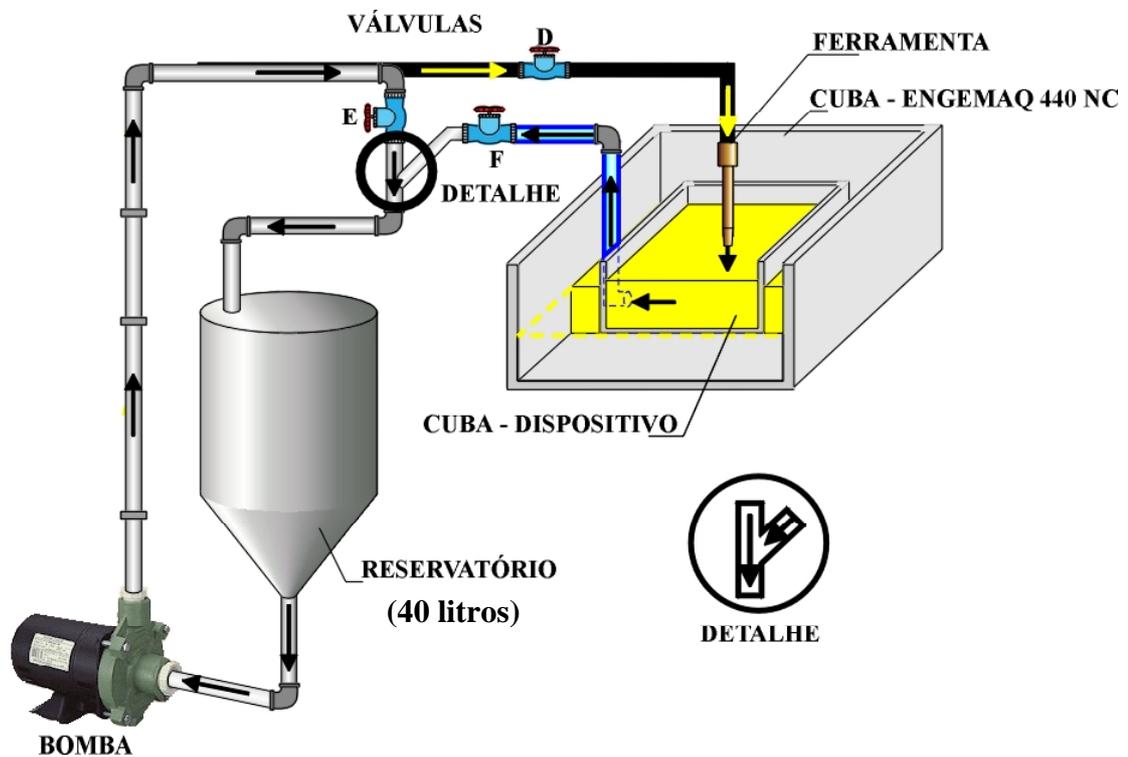
O material empregado na fabricação da ferramenta é o cobre eletrolítico. De acordo com Monhi et al (1993), este material é convencionalmente empregado em usinagem por descargas elétricas. Segundo o referido autor, isto se deve ao fato de proporcionar alta relação de desgaste, devido à alta condutividade térmica. A Tabela 4.3 apresenta as principais propriedades deste material.

**Tabela 4.3 – Propriedades físicas e elétricas do cobre eletrolítico.**

Peso específico	8,9 g/cm <sup>3</sup>
Ponto de fusão	1083°C
Resistividade elétrica	0,0167Ωmm
Condutividade térmica relativa	94,3%
Condutividade elétrica relativa	96,3%

#### 4.1.5- Dispositivo auxiliar

Além do equipamento EDM descrito, utilizou-se um dispositivo auxiliar de injeção do fluido dielétrico, especialmente desenvolvido para o trabalho de Fernandes, 1999, e Rodrigues, 1999. Este dispositivo torna possível a utilização de apenas 40 litros do fluido dielétrico, ao passo que o reservatório da máquina tem capacidade de 420 litros.

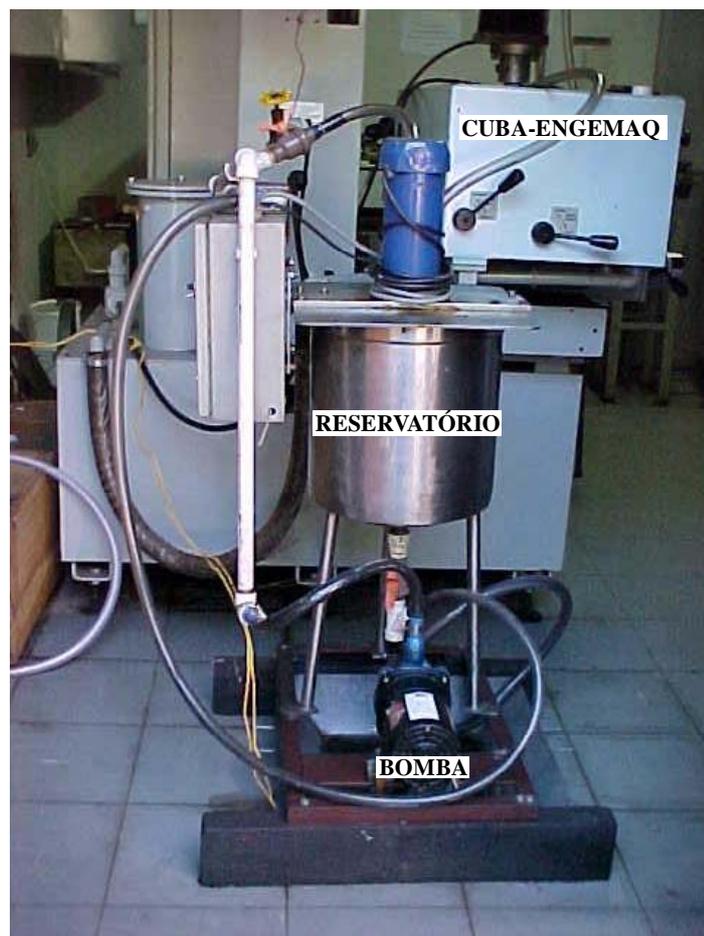


**Figura 4.5- Esquema de montagem do dispositivo auxiliar acoplado à ENGEMAQ 440NC.**

Fazem parte desse dispositivo auxiliar, um reservatório para dielétrico com capacidade para 40 l, uma bomba centrífuga de potência de 1/3 de CV e 2840 rpm para impulsionar o fluido na região de trabalho, através de tubulações rígidas e flexíveis para dentro da cuba de dimensões 250 x 250 x 250 mm.

O funcionamento desse dispositivo baseia-se no controle das válvulas (D, E, F). O fluxo do fluido no porta-ferramenta e ferramenta é controlado por meio das válvulas (E) e (D). Visto que a tubulação após a válvula (D) limita a vazão nominal da bomba, a válvula (E) tem a função de dosar a passagem de todo excesso de fluido, desviando este para o reservatório. Isso faz com que a bomba não sofra recalque e não se formem bolhas nas tubulações, que aqueceriam todo o sistema.

As válvulas (D e F) controlam o nível de fluido dentro da cuba do dispositivo (I), um balanço entre entrada e saída do fluido. Como o sistema não dispõe de sistema para filtragem das partículas erodidas, foi desenvolvido um sistema de filtragem magnética por meio de imãs que retêm esses resíduos metálicos provenientes processo EDM.



**Figura 4.6- Dispositivo auxiliar acoplado à ENGEMAQ 440NC**

O retorno do fluido ao reservatório se faz por ação de um efeito de arraste na junção das tubulações onde estão colocadas as válvulas (E e F), como é mostrado na Figura 4.5. Com esse sistema não se faz necessário a utilização de uma outra bomba no sistema.

Na Figura 2.7 encontra-se diferentes vistas da cuba auxiliar montada dentro da cuba da ENGEMAQ 440NC. Na Figura 2.7 (a) pode-se ver o posicionamento da cuba auxiliar em relação à cuba da máquina e ferramenta. Na Figura 2.7 (b) a cuba ENGEMAQ encontra-se aberta. As Figura 2.7 (c) e 2.7 (d) mostram o conjunto em funcionamento. Nota-se que o fluido do reservatório da máquina está circulando no sistema, isso pelo fato de que o equipamento não funciona sem um mínimo nível de segurança do seu próprio óleo.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 4.7- Cuba auxiliar montada no interior da cuba ENGEMAQ 440NC.**

## 4.2- Testes Preliminares

Nessa etapa, foram realizados testes para fazer a seleção mais adequada dos parâmetros de usinagem, de tal forma que os mesmos possibilitassem resultados de fácil e clara análise. Foi necessário descobrir quais os parâmetros de Desbaste Severo, Desbaste Médio e Desbaste Leve, onde foram tomados como partida os dados sugeridos pela tabela de usinagem contida no manual da ENGEMAQ 440NC. Os resultados encontram-se no anexo pelos quais foram selecionados os parâmetros constantes na Tabela 4.1.

Também nessa etapa, foram levantadas todas as principais características junto aos fabricantes dos fluidos dielétricos. Os resultados encontram-se no final desse capítulo, em forma de tabelas e separados por fluido dielétrico.

## 4.3- Testes Definitivos

Utilizando os parâmetros selecionados nas etapas anteriores, iniciou-se a 3ª Etapa, onde foram avaliados quanto a TRM, a RD e da Rugosidade Média Aritmética (Ra) e análise Topográfica. O total de peças usinadas neste trabalho pode ser estimado pela expressão 4.1:

$$NTE = NR \times NFD \times NR \quad (4.1)$$

Em que:

NTE - Número total de ensaios;

NR - Número de regime de usinagem (desbaste, semi-desbaste e acabamento), ∴ NR=3;

NFD - Número de fluidos dielétricos (Óleos A, B, C, D e E), ∴ NFD=5;

NR - Número de repetições, ∴ NR=5.

Um número de repetições igual a cinco gera uma maior confiabilidade nos resultados, uma vez que o processo EDM é influenciado por vários fatores, tais como umidade no fluido dielétrico, temperatura ambiente e do fluido, grau de contaminação por partículas erodidas, grau de degradação do fluido, etc; o que modifica sensivelmente os valores de TRM e RD. Portanto, utilizando a expressão 4.1, foram realizados um total de setenta e cinco operações de usinagem, gerando 150 entalhes semi-circulares.

#### 4.4- Avaliação dos Resultados

Conforme já mencionado, os resultados avaliados são: TRM, RD e rugosidade. Cada um desses resultados será medido conforme explicado a seguir.

##### 4.4.1- Taxa de remoção de material (TRM)

A TRM é o volume de material removido da peça pelo tempo de usinagem, expressa em  $\text{mm}^3/\text{min}$  e calculada empregando-se a expressão 4.2.

$$\text{TRM} = V_p / \Delta t \quad (4.2)$$

Em que:

$V_p$  = Volume de material removido da peça [ $\text{mm}^3$ ];

$\Delta t$  = Tempo de usinagem [min];

Portanto, faz-se necessário medir o volume de material removido da peça e o tempo da operação de um ensaio. O volume de material removido da peça é obtido pela expressão 4.3:

$$V_p = \Delta m_p / \gamma_p \quad (4.3)$$

Em que:

$\Delta m_p$  = Diferença entre a massa inicial e final do material da peça [g];

$\gamma_p$  = Massa específica do aço rápido ABNT M2 – 0,00768 [ $\text{g}/\text{mm}^3$ ];

A diferença entre a massa inicial e final do material foi quantificada utilizando-se uma balança analítica, marca Marte, AS 1000, com resolução de  $10^{-2}$ . As amostras foram levadas a um béquer com acetona, que postas em um agitador, promove a limpeza dos produtos da usinagem que ficam impregnados na peça e que podem assim falsear os resultados de medição de massa antes e massa depois da usinagem.

#### 4.4.2- Relação de Desgaste (RD)

A RD é definida como a relação entre o volume de material removido da peça e o volume de material gasto na ferramenta, expressada adimensionalmente, conforme a expressão 4.4 a seguir:

$$RD = V_p / V_f \quad (4.4)$$

Em que:

$V_p$  = volume de material removido da peça [ $\text{mm}^3$ ];

$V_f$  = volume de material gasto da ferramenta [ $\text{mm}^3$ ];

De forma análoga, será necessário medir o volume de material removido da peça e o volume de material gasto da ferramenta. O volume de material removido da peça é obtido segundo a expressão 2, apresentada anteriormente e o volume de material gasto da ferramenta é obtido através da expressão 4.5:

$$V_f = \Delta m_f / \gamma_f \quad (4.5)$$

Em que:

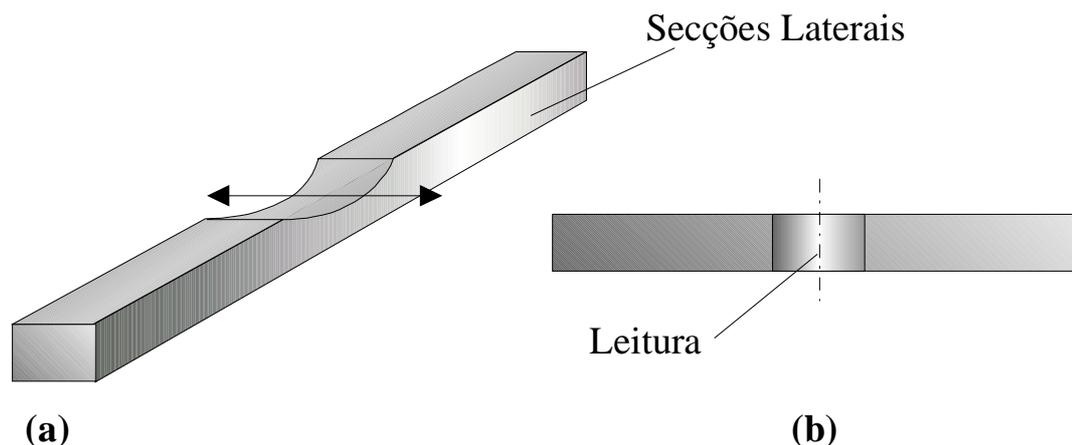
$\Delta m_f$  = diferença entre a massa inicial e final da ferramenta [g];

$\gamma_f$  = massa específica do material da ferramenta – 0,0089 [ $\text{g}/\text{mm}^3$ ];

#### 4.4.3- Rugosidade Média Aritmética (Ra) e Topografias das Superfícies Usinadas (MEV)

No estudo do acabamento das superfícies usinadas, utilizou-se um rugosímetro SURTRONIC 3+ da Rank Taylor Hobson onde foi levantado o parâmetro Rugosidade Média Aritmética.

Para adquirir uma maior confiabilidade nos resultados, foi analisada a região usinada com um comprimento de 4mm. O comprimento de amostragem adotado foi 2,5 mm de acordo com a NBR 6405 1988. Para cada amostra, foram feitas 12 leituras no sentido do eixo central da mesma, conforme mostra a Figura 4.8.



**Figura 4.8 – Esquema de medição do parâmetro Ra para acabamento superficial**  
**(a) Perspectiva - Sentido de medição. (b) Vista Superior –linha de realização das medições.**

Para análise do aspecto superficial, utilizou-se micrografias extraídas do MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) com o objetivo de se verificar o comportamento do material refundido e resolidificado sobre a superfície, com aumentos de 100x e 300x, sempre buscando uma topografia que melhor representasse a superfície analisada.

#### **4.4.4- Características dos Óleos Testados**

Foi realizado na etapa de Testes Preliminares, como já foi citado, uma pesquisa junto aos fabricantes de fluidos dielétricos sobre as características típicas dos seus produtos. Essa pesquisa teve como objetivo levantar tais características e fazer uma análise superficial sobre as diferenças físico-químicas entre tais óleos dielétricos.

Os óleos doados pelos fabricantes foram: ELETRO ER 5000 da Iorga, SIGNAL TEX300 da Texaco, MICROCORTE 102A da Microquímica, ARCLEAN ELETRON da Archem e QUEROSENE da Maxsolv.

As principais características encontram-se relacionadas nas Tabelas 4.4 a 4.8, onde o fabricante foi omitido e a ordem diferente da mencionada no parágrafo anterior.

**Tabela 4.4- Características Típicas do Fluido A.**

<b>ÓLEO A</b>	
Cor ASTM (D-1500)	L 0,5
Densidade a 20 °C (D-4052)	0,843
Ponto de Fluidez, °C (D-97)	-12
Viscosidade cSt a 40°C (D-445)	3,7
Viscosidade cSt a 100°C (D-445)	1,4
Ponto de Fulgor, °C (D-92)	130

**Tabela 4.5- Características Típicas do Fluido B.**

<b>ÓLEO B</b>	
Cor ASTM (D-1500)	L1
Densidade a 20 °C (D-4052)	0,760
Ponto de Fluidez, °C (D-97)	-----
Viscosidade cSt a 40°C (D-445)	2,3 mín - 2,5 máx
Viscosidade cSt a 100°C (D-445)	-----
Ponto de Fulgor, °C (D-92)	110

**Tabela 4.6- Características Típicas do Fluido C.**

<b>ÓLEO C</b>	
Cor ASTM (D-1500)	L 1
Densidade a 20 °C (D-4052)	0,782
Ponto de Fluidez, °C (D-97)	3
Viscosidade cSt a 40°C (D-445)	2,54
Viscosidade cSt a 100°C (D-445)	----
Ponto de Fulgor, °C (D-92)	110

**Tabela 4.7- Características Típicas do Fluido D.**

<b>ÓLEO D</b>	
Cor ASTM (D-1500)	L 1
Densidade a 20 °C (D-4052)	0,80mín - 0,84máx.
Ponto de Fluidez, °C (D-97)	-----
Viscosidade cSt a 40°C (D-445)	2,5mín. – 2,8 máx.
Viscosidade cSt a 100°C (D-445)	-----
Ponto de Fulgor, °C (D-92)	100

**Tabela 4.8- Características Típicas do Fluido QUEROSENE.**

<b>ÓLEO E</b>	
Cor ASTM (D-1500)	L1
Densidade a 20 °C (D-4052)	0,76mín. – 0,82máx.
Ponto de Fluidez, °C (D-97)	-----
Viscosidade cSt a 40°C (D-445)	1mín. – 2máx.
Viscosidade cSt a 100°C (D-445)	-----
Ponto de Fulgor, °C (D-92)	40

Foi realizada junto aos fabricantes dos fluidos dielétricos uma pesquisa de mercado e levantado os preços com ICMS incluso e montada a tabela a seguir para realização de análises nos Capítulos 5 e 6.

**Tabela 4.9- Preços de mercado para os fluidos testados**

<b>FLUIDO DIELÉTRICO</b>	<b>PREÇO DE MERCADO (US\$/litro)</b>
<b>ÓLEO A</b>	1,96
<b>ÓLEO B</b>	0,88
<b>ÓLEO C</b>	1,28
<b>ÓLEO D</b>	1,68
<b>ÓLEO E</b>	0,60

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 5.1 – Taxa de Remoção de Material (TRM)

Conforme descrito nos Capítulos 2 e 4, a TRM não possui uma expressão matemática ou modelagem precisa, mas pode-se diretamente avaliá-la em função do volume de material removido da peça pelo tempo de operação, cujas unidades são expressas em  $\text{mm}^3/\text{min}$  e calculada segundo a equação 5.1:

$$TRM = \Delta mp / \gamma p \times \Delta t \quad [ \text{mm}^3/\text{min} ] \quad (5.1)$$

Em que:

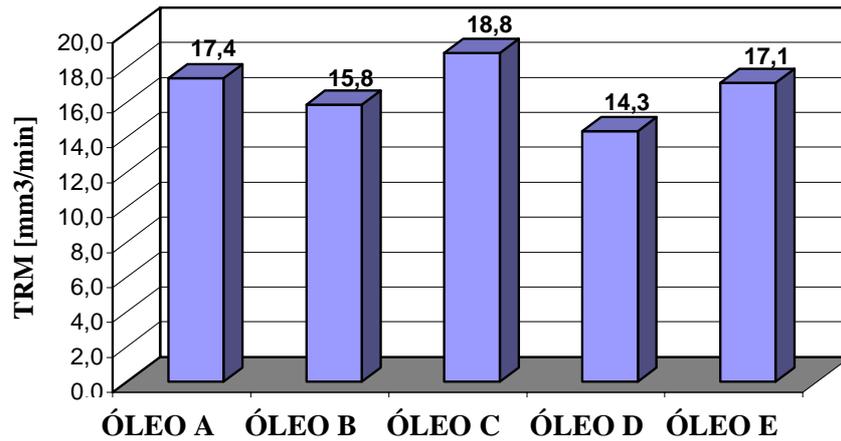
$\Delta mp$  = Diferença entre a massa inicial e final do material da peça [g];

$\gamma p$  = Massa específica do aço rápido ABNT M2  $\sim 0,00768 \text{ [g/mm}^3\text{]}$ ;

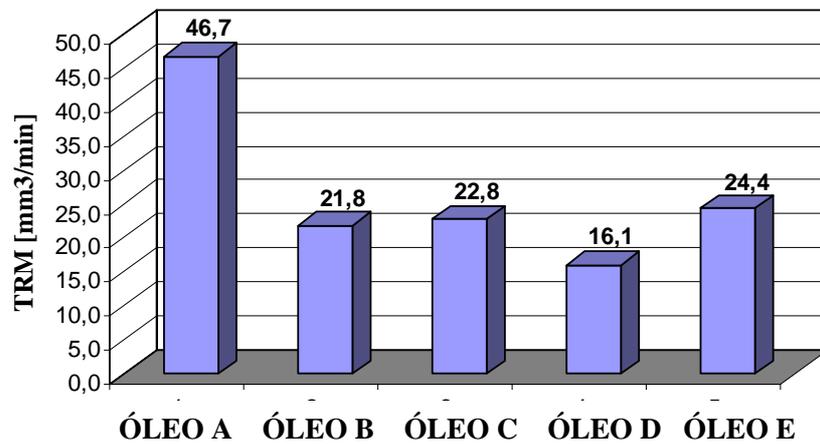
$\Delta t$  = Tempo de usinagem [min].

A Figura 5.1 apresenta os resultados das TRMs dos cinco fluidos testados no regime de desbaste leve, em que nota-se uma diferença significativa entre os valores das TRMs. A diferença entre o óleo que apresentou maior TRM e o que apresentou menor TRM foi de 31%, o que mostra diferença de desempenho dos mesmos nessa condição de usinagem, material e geometria da ferramenta, material da peça usinada e equipamento utilizado. Como era esperado, o querosene apresentou uma boa TRM, porém, foi superado pelos óleos A e C. Portanto, no que diz respeito a TRM na condição de acabamento, não houve justificativa para utilização do querosene (óleo E), a não ser o fator custo.

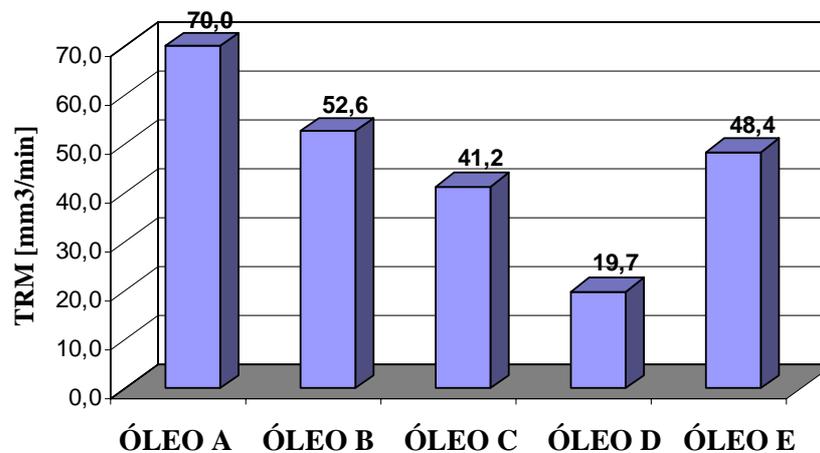
A Figura 5.2 apresenta os resultados das TRMs para regime de desbaste médio. Nota-se que o óleo A apresentou uma TRM 190% maior que a TRM do óleo de pior desempenho, o óleo D. Não há aparentemente uma justificativa para diferença tão grande entre o óleo A e os demais, porém, para essas condições de usinagem, o primeiro óleo é mais indicado para as condições de desbaste médio.



**Figura 5.1 - TRMs geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Leve.**



**Figura 5.2 - TRMs geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Médio.**



**Figura 5.3 - TRMs geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B, C, D e E em regime de Desbaste Severo.**

A Figura 5.3 apresenta as TRMs para o regime de desbaste severo. O óleo A continua a apresentar um rendimento superior em relação aos demais óleos, uma diferença de 255% em relação ao óleo de pior desempenho, novamente, como no regime de desbaste médio, o óleo D. Nessas condições, os demais óleos, B, C e E mostraram-se mais eficientes do que o óleo D, que parece ter seu desempenho mais voltado para regimes de acabamento do que de desbaste. É importante ressaltar que para todos os dados apresentados nos gráficos, a variação de resultado de um ensaio para outro não foi maior que 2 a 5%, demonstrando assim boa confiabilidade nos resultados, uma vez que as diferenças chegaram na ordem de 30% a até 255%.

O óleo A, apresentou nas condições dos ensaios melhores resultados para condições de desbaste severo. Porém, é importante lembrar que esse óleo possui uma dificuldade maior de operação, uma vez que possui um odor bem mais forte que os demais óleos, com exceção é claro, do querosene, que é, pela literatura e na prática, o mais tóxico e perigoso (Guitrau, 1997).

Portanto, quanto a TRM, em todos os regimes testados, o óleo A apresentou melhor desempenho, demonstrando que quanto mais severo o regime de operação, melhor seu rendimento. Seu uso seria mais recomendado para equipamentos que trabalham somente com operações de desbaste severo. Para condições de desbaste leve, os óleos tiveram diferenças bem menores, o que indica que para uma possível diminuição da severidade do regime, menores seriam as diferenças entre os fluidos, em termos de TRM.