

**LUCIANO JOSÉ ARANTES**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO  
HÍBRIDO DE USINAGEM POR DESCARGAS  
ELÉTRICAS E JATO DE ÁGUA ABRASIVO (AJEDM)**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2007**

**LUCIANO JOSÉ ARANTES**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO HÍBRIDO DE  
USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS E JATO DE ÁGUA  
ABRASIVO (AJEDM)**

**Tese** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Arnaldo Raslan

**UBERLÂNDIA - MG**

**2007**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

A662d Arantes, Luciano José, 1974-

Desenvolvimento e avaliação do processo híbrido de usinagem por descargas elétricas e jato de água abrasivo (AJEDM) / Luciano José Arantes. - 2007.  
125 f. : il.

Orientador: Alberto Arnaldo Raslan.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.

1. Usinagem - Teses. I. Raslan, Alberto Arnaldo. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621.9

---

*“A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências. O homem que não tem os olhos abertos para o misterioso passará pela vida sem ver nada.”*  
*Albert Einstein*



## 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 Tribologia e Materiais e todos os colegas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho;

✚ Ao professor Dr. Alberto Arnaldo Raslan, pela brilhante orientação e interesse, tendo sido muito mais que um orientador acadêmico, mas também um amigo inesquecível, que acreditou e apostou na minha capacidade e potencial;

✚ Ao professor Dr. Claudionor Cruz, pela amizade e oportunidade de ter ingressado na vida acadêmico-científica;

✚ Ao professor Dr. Valder Steffen Jr., por todo apoio, confiança e oportunidade, sem o qual, esse trabalho não teria tido continuidade;

✚ Ao órgão financiador da pesquisa, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão de bolsa de doutorado e taxa de bancada;

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

✚ Ao técnico Reginaldo do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), à amiga Ângela Maria do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), ao aluno de Iniciação Científica Marcelo Lemos Rossi, por todo apoio, incentivo e amizade e à nossa querida secretária Eunice (LTM), por todo apoio e paciência.

✚ A todas aquelas pessoas aqui não mencionadas que, direta ou indiretamente, tenham contribuído para execução deste trabalho, o meu muito obrigado.

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

## Resumo

Uma nova linha de pesquisa no campo da usinagem não tradicional é o da associação de um ou mais processos de usinagem, gerando um processo híbrido. Essa tendência mundial tem sido observada há mais de uma década. No caso da Retificação por Descargas Elétricas (AEDG), que associa a retificação com a eletroerosão, estudos mostram que em todos os casos testados, a TRM (Taxa de Remoção de Material) chega a ser até cinco vezes maior, quando comparado com a Usinagem por Descargas Elétricas (EDM). Os processos híbridos oferecem vantagens adicionais aos processos de fabricação, uma vez que tendem a unir vantagens dos processos constituintes em um só processo. O principal objetivo deste trabalho é desenvolver e avaliar a viabilidade, técnica e econômica, do processo híbrido associando a Usinagem por Descargas Elétricas com a Erosão por Jato de Água Abrasivo, da sigla inglesa *AJEDM (Abrasive Jet Electrical Discharge Machining)*, com a particularidade da utilização de água deionizada como substituição dos fluidos hidrocarbonetados comuns em EDM. Tais fluidos, derivados do petróleo, são extremamente tóxicos ao operador, danosos ao meio ambiente, de alto custo e exigem cuidados especiais de estocagem e manuseio, por serem inflamáveis. A água deionizada é reciclável, de baixo custo, não tóxica e sem problemas de manuseio e estocagem. Os resultados apresentaram TRMs consideravelmente superiores com a utilização do jato de água abrasivo (SiC), além de melhoria nas superfícies usinadas, em termos de rugosidade e topografias. A utilização da água deionizada como dielétrico é viável tecnicamente no processo híbrido proposto, uma vez que as TRMs tornaram-se compatíveis com as obtidas com hidrocarbonetos em EDM convencional.

---

Palavras-chave: EDM. Usinagem híbrida. Fluidos dielétricos. Erosão. TRM.

Arantes, L. J. **Performance Evaluation of Hybrid Abrasive Jet Electrical Discharge Machining (AJEDM)**. 2007. 117 p. Doctoral Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

### **Abstract**

A new technology in non-traditional machining that has been developed is the association of two or more machining process in only one. This worldwide tendency has been observed for more than a decade. For example, the Abrasive Electrical Discharge Grinding (AEDG), which associates the EDM process to grinding, showed good results to Metal Removal Rate (5 times higher), compared to the die-sinking EDM. This paper aims to develop and evaluate the hybrid machining process which associates EDM to Abrasive Water Jet Machining, called Abrasive Jet Electrical Discharge Machining (AJEDM), especially the use of deionized water as dielectric fluid as a replace alternative to the hydrocarbon fluids generally used as dielectric. These fluids are, in general, based on aromatic hydrocarbons derived from petrol, highly toxic and dangerous to the health of operators as well as to the environment. The results showed higher MRRs with the association of the EDM to the AWJM. The surface generated by the hybrid process showed lower roughness compared to the other machining conditions. The use of deionized water as dielectric fluids showed good technical performance for the hybrid machining AJEDM, since the MRR was similar to that one obtained with hydrocarbon fluid on the die-sinking EDM.

---

Keywords: EDM. Hybrid machining. Dielectric fluids. Machining. Erosion. MRR.

# DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO HÍBRIDO DE USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS E JATO DE ÁGUA COM ABRASIVO (AJEDM)

## SUMÁRIO

<b>Capítulo</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>01</b>
<b>Capítulo 2</b>	<b>Processos Não Tradicionais de Usinagem. ....</b>	<b>06</b>
	2.1. Usinagem por Descargas Elétricas (EDM).....	10
	2.1.1. Princípio do Processo EDM.....	13
	2.1.2. Polaridade.....	15
	2.1.3. Regime de Operação.....	16
	2.1.4. Corrente.....	17
	2.1.5. Frequência.....	18
	2.1.6. Ferramental.....	20
	2.1.7. Taxa de Remoção de Material (TRM).....	21
	Modelagem matemática.....	22
	2.1.8. Desgaste Volumétrico Relativo (DVR).....	23
	2.1.9. Textura e Integridade Superficial.....	24
	2.1.10. Camada Refundida.....	25
	2.1.11. Fluidos Dielétricos.....	26
	2.1.12. Principais Propriedades dos Fluidos Dielétricos.....	27
	2.1.13. Fluidos Dielétricos Ecológicos.....	31

	<i>Desempenho da água pura.....</i>	31
	<i>Água misturada com compostos orgânicos.....</i>	32
	<i>Dielétricos aquosos comerciais.....</i>	33
	<i>Efeitos superficiais.....</i>	34
	<i>Aspectos ambientais.....</i>	35
	<i>2.1.14. Limitações do Processo EDM.....</i>	38
2.2.	Usinagem por Jato Abrasivo (AJM).....	39
2.3.	Usinagem por Jato de Água (WJM) e Jato de Água com Abrasivo (AWJM).....	40
	<i>2.3.1. Usinagem por Jato de Água (WJM).....</i>	40
	<i>2.3.2. Usinagem por Jato de Água com Abrasivo (AWJM).....</i>	41
	<i>2.3.3. Mecanismos de Remoção de Material.....</i>	46
	<i>2.3.4. Remoção de Material Dútil.....</i>	47
<b>Capítulo 3</b>	<b>Processos Híbridos de Usinagem.....</b>	<b>49</b>
3.1.	Diagrama de Energia dos Processos Híbridos.....	50
3.2.	Usinagem Abrasivo-Eletroquímica (AECM).....	52
3.3.	Usinagem Abrasiva por Descargas Elétricas (AEDM).....	53
3.4.	Usinagem Eletroquímica por Descargas Elétricas (ECDM).....	56
3.5.	Usinagem por Descargas Elétricas com Assistência Ultra-sônica (ECDM).....	57
3.6.	Retificação Abrasiva por Descargas Elétricas (AEDG).....	59
3.7.	Usinagem por Descargas Elétricas e Erosão Abrasiva (AJEDM).....	61
	<i>3.7.1. Vantagens Teóricas do Processo AJEDM .....</i>	<i>64</i>
	<i>3.7.2. Desvantagens Teóricas do Processo AJEDM.....</i>	<i>64</i>
<b>Capítulo 4</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>65</b>

4.1. Definição dos Parâmetros.....	65
4.1.1. Equipamento EDM.....	66
4.1.2. Variáveis de Usinagem.....	67
4.1.3. Material e Geometria da Peça.....	68
4.1.4. Geometria da Ferramenta.....	69
4.1.5. Dispositivo Auxiliar (Baixa Pressão).....	71
4.1.6. Dispositivo Auxiliar (Alta Pressão).....	73
4.2. Testes Preliminares.....	74
4.3. Testes Definitivos.....	76
4.4. Avaliação dos Resultados.....	78
<b>Capítulo 5    Análise e Discussão dos Resultados .....</b>	<b>81</b>
5.1. Taxa de Remoção de Material (TRM).....	81
5.2. DVR (Desgaste Volumétrico Relativo).....	86
5.3. Integridade Superficial.....	89
5.4. Espessura de Camada Refundida.....	102
5.4. Microtrincas.....	104
5.4.1. Número de Trincas.....	104
5.4.2. Comprimento de Trincas.....	106
5.4.2. Microdureza.....	107
<b>Capítulo 6    Conclusão.....</b>	<b>109</b>
6.1. Recomendações para Trabalhos Futuros).....	110
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>112</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Necessidades que motivaram a criação e evolução dos Processos Não Tradicionais de Usinagem.....	06
Figura 2.2:	Exemplos de produção com o processo EDM.....	10
Figura 2.3:	Molde de injeção de plástico, em aço de elevada dureza, confeccionado por EDM.....	11
Figura 2.4:	Molde de uma escova de dente, em aço de elevada dureza e ferramenta EDM de cobre.....	11
Figura 2.5:	Eletrodo de cobre, matriz e faca de cozinha.....	12
Figura 2.6:	EDM com eletrodo de grafite.....	12
Figura 2.7:	Diagramas Tensão e Corrente pelo tempo.....	14
Figura 2.8:	Seqüência dos três momentos principais de uma descarga unitária.....	15
Figura 2.9:	Esquema dos principais elementos construtivos de um equipamento EDM....	16
Figura 2.10:	Representação dos níveis de potência e duração do pulso no processo EDM.....	17
Figura 2.11:	Baixa Frequência/Desbaste.....	19
Figura 2.12:	Frequência Moderada/Semi-acabamento.....	19
Figura 2.13:	Alta Frequência /Acabamento.....	19
Figura 2.14:	Sistemas de lavagem no processo EDM.....	21
Figura 2.15:	Variação da TRM para os valores calculados e obtidos experimentalmente...	23
Figura 2.16:	Efeitos Superficiais e Sub-superficiais.....	24
Figura 2.17:	Deposição de carbono na ferramenta de cobre.....	33
Figura 2.18:	Impacto ambiental da usinagem por descargas elétricas por penetração.....	37
Figura 2.19:	Micrografia mostrando as camadas distintas no material usinado por eletroerosão.....	38

Figura 2.20:	Efeito de vários parâmetros de usinagem na Taxa de Remoção de Material (TRM), Tamanho do abrasivo, pressão do ar e ângulo do spray.....	39
Figura 2.21:	Princípio da Usinagem por Jato Abrasivo.....	40
Figura 2.22:	Princípio da Usinagem por Jato de Água Abrasivo.....	42
Figura 2.23:	Condições de operação dos sistemas de Jato de Água a Alta Pressão.....	42
Figura 2.24:	Níveis relativos das perdas de energia e percentual de entrada nos diversos pontos do sistema de Jato de Água a Alta Pressão.....	43
Figura 2.25:	Efeito do Ângulo de Impacto na Taxa de Remoção de Material.....	45
Figura 2.26:	Corte de duas câmaras de mistura de um Sistema Venturi.....	45
Figura 2.27:	Mecanismos de erosão de materiais dúteis submetidos a ataque abrasivo.....	47
Figura 2.28:	Morfologia de superfície de aço comum impactada por partículas de quartzo a 45° mostrando sulcamento e remoção de material.....	48
Figura 3.1:	Diagrama esquemático dos métodos de usinagem abrasiva elétrica.....	50
Figura 3.2:	Diagrama de Energia para o processo de Usinagem por Descargas Elétricas.....	52
Figura 3.3:	Relação entre a rugosidade superficial média (Ra) e a área usinada.....	54
Figura 3.4:	Relação entre o “GAP” e a dispersão das descargas.....	54
Figura 3.5:	Diagrama de Energia para o processo de Usinagem Abrasiva por Descarga Elétricas.....	55
Figura 3.6:	Diagrama de Energia para o processo de Usinagem Eletroquímica por Descargas.....	57
Figura 3.7:	Diagrama de Energia para o processo de Usinagem por Descargas Elétricas com Assistência Ultra-sônica.....	58
Figura 3.8:	Diagrama de Energia para o processo de Retificação Abrasiva por Descargas Elétricas.....	60



Figura 3.9:	O efeito do Tempo de Descarga (Ton) na relação de desgaste dos processos AEDG e EDG.....	61
Figura 3.10:	Diagrama de Energia para o processo de Usinagem por Descargas Elétricas e Erosão Abrasiva.....	63
Figura 3.11:	Princípio da Usinagem Híbrida (EDM + AWJM).....	63
Figura 4.1:	Esquema sob diagrama de blocos para a metodologia.....	65
Figura 4.2:	Equipamento EDM por penetração – ENGEMAQ 440 NC.....	66
Figura 4.3:	Painel de controle e mostrador com parâmetros de desbaste severo.....	67
Figura 4.4:	Geometria da ferramenta de cobre vazada utilizada nos ensaios.....	70
Figura 4.5:	Esquema de montagem do dispositivo auxiliar de baixa pressão acoplado à ENGEMAQ 440NC.....	72
Figura 4.6:	Cuba auxiliar montada no interior da cuba do equipamento EDM.....	73
Figura 4.7:	Esquema da montagem do protótipo experimental de Jato de Água Abrasivo na máquina EDM (alta pressão).....	74
Figura 4.8:	Teste preliminar para avaliação do efeito das granulometrias de SiC, adicionadas ao fluido dielétrico (querosene) na concentração de 30 g/l, em termos da TRM e Ra.....	75
Figura 4.9:	Teste preliminar para avaliação do efeito das concentrações, do fluido dielétrico (querosene com adição de SiC) em granulometria de 600 mesh, em termos de TRM e Ra.....	75
Figura 5.1:	Taxa de Remoção de Material para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem abrasivo, com fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.....	82
Figura 5.2:	Taxa de Remoção de Material para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, com fluido estático, jato de baixa e alta pressão	

	(30g/l - 600 mesh).....	83
Figura 5.3:	Variação instantânea de Z para Água Deionizada, com fluido estático, com e sem abrasivo (SiC), à concentração de 30 g/l.....	85
Figura 5.4:	Variação instantânea de Z para Água Deionizada, com jato a baixa pressão, com e sem abrasivo (SiC), à concentração de 30 g/l.....	85
Figura 5.5:	Variação instantânea de Z para Água Deionizada, com jato a alta pressão, com e sem abrasivo (SiC), à concentração de 30 g/l.....	85
Figura 5.6:	Desgaste Volumétrico Relativo para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem abrasivo, com fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.....	87
Figura 5.7:	Desgaste Volumétrico Relativo para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, com abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.....	88
Figura 5.8:	Desgaste das ferramentas nos ensaios com água deionizada e com adição de abrasivo.....	89
Figura 5.9:	Rugosidade Sa para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.....	90
Figura 5.10:	Rugosidade Sa para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, com abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.....	91
Figura 5.11:	Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com fluido estático, Óleo A, com e sem abrasivo (área de 1 mm <sup>2</sup> e 1000 x 50 pontos).....	92
Figura 5.12:	Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com fluido estático, Querosene, com e sem abrasivo (área de 1 mm <sup>2</sup> e 1000 x 50 pontos).....	92
Figura 5.13:	Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com fluido estático, Água Deionizada, com e sem abrasivo (área de 1 mm <sup>2</sup> e	

	1000 x 50 pontos).....	92
Figura 5.14:	Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com fluido a baixa pressão, Óleo A, com e sem abrasivo (área de 1 mm <sup>2</sup> e 1000 x 50 pontos).....	93
Figura 5.15:	Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com fluido a baixa pressão, Querosene, com e sem abrasivo (área de 1 mm <sup>2</sup> e 1000 x 50 pontos).....	93
Figura 5.16:	Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com fluido a baixa pressão, Água Deionizada, com e sem abrasivo (área de 1 mm <sup>2</sup> e 1000 x 50 pontos).....	93
Figura 5.17:	Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Óleo A, com e sem abrasivo (área de 1 mm <sup>2</sup> e 1000 x 50 pontos).....	94
Figura 5.18:	Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Querosene, com e sem abrasivo (área de 1 mm <sup>2</sup> e 1000 x 50 pontos).....	94
Figura 5.19:	Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Água Deionizada, com e sem abrasivo (área de 1 mm <sup>2</sup> e 1000 x 50 pontos).....	94
Figura 5.20:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido estático, Óleo A, com e sem abrasivo (aumento de 100x).....	96
Figura 5.21:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido estático, Querosene, com e sem abrasivo (aumento de 100x).....	96
Figura 5.22:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido estático, Água Deionizada, com e sem abrasivo (aumento de 100x).....	96

Figura 5.23:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido estático, Óleo A, com e sem abrasivo (aumento de 300x).....	97
Figura 5.24:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido estático, Querosene, com e sem abrasivo (aumento de 300x).....	97
Figura 5.25:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido estático, Água Deionizada, com e sem abrasivo (aumento de 300x).....	97
Figura 5.26:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a baixa pressão, Óleo A, com e sem abrasivo (aumento de 100x).....	98
Figura 5.27:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a baixa pressão, Querosene, com e sem abrasivo (aumento de 100x).....	98
Figura 5.28:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a baixa pressão, Água Deionizada, com e sem abrasivo (aumento de 100x).....	98
Figura 5.29:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a baixa pressão, Óleo A, com e sem abrasivo (aumento de 300x).....	99
Figura 5.30:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a baixa pressão, Querosene, com e sem abrasivo (aumento de 300x).....	99

Figura 5.31:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a baixa pressão, Água Deionizada, com e sem abrasivo (aumento de 300x).....	99
Figura 5.32:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Óleo A, com e sem abrasivo (aumento de 100x).....	100
Figura 5.33:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Querosene, com e sem abrasivo (aumento de 100x).....	100
Figura 5.34:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Água Deionizada, com e sem abrasivo (aumento de 100x).....	100
Figura 5.35:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Óleo A, com e sem abrasivo (aumento de 300x).....	101
Figura 5.36:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Querosene, com e sem abrasivo (aumento de 300x).....	101
Figura 5.37:	Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Água Deionizada, com e sem abrasivo (aumento de 300x).....	101
Figura 5.38:	Espessura da Camada Refundida para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem abrasivo, com fluido estático, jato pressão e alta pressão.....	103
Figura 5.39:	Espessura da Camada Refundida para as amostras usinadas com Óleo A,	

	Querosene e Água, com abrasivo (SiC), com fluido estático, baixa pressão e alta pressão.....	103
Figura 5.40:	Camada Refundida para as amostras usinadas com Água Deionizada, sem e com abrasivo (SiC), com fluido a alta pressão.....	104
Figura 5.41:	Número de Trincas das amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem abrasivo, com fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.....	105
Figura 5.42:	Número de Trincas das amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, com abrasivo, com fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.....	105
Figura 5.43:	Comprimento Médio de Trincas das amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.....	106
Figura 5.44:	Comprimento Médio de Trincas das amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, com abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.....	107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Principais processos de usinagem não convencional.....	07
Tabela 2.2:	Classificação dos processos em relação aos materiais.....	09
Tabela 2.3:	Classificação dos processos com relação a várias operações.....	09
Tabela 2.4:	Capabilidade dos processos.....	09
Tabela 2.5:	Aspectos econômicos dos processos.....	10
Tabela 2.6:	TRM experimental e calculada.....	22
Tabela 2.7:	Especificações Importantes para Fluidos Dielétricos populares no mundo.....	30
Tabela 2.8:	Substâncias geradas pelo EDM por penetração com diferentes tipos de fluidos dielétricos.....	38
Tabela 3.1:	Especificações dos ensaios nos processos EDG e AEDG.....	60
Tabela 4.1:	Parâmetros empregados nos testes definitivos.....	67
Tabela 4.2:	Composição Aproximada do aço-rápido ABNT M2 em (%).....	69
Tabela 4.3:	Propriedades físicas e elétricas do cobre eletrolítico.....	70
Tabela 4.4:	Especificação da Bomba de Baixa Pressão utilizada no sistema auxiliar.....	71
Tabela 4.5:	Especificação da Bomba de Alta Pressão utilizada no sistema auxiliar.....	74
Tabela 4.6:	Características Típicas do Fluido Querosene.....	76
Tabela 4.7:	Características Típicas do Fluido Premium.....	77
Tabela 4.8:	Características Típicas da Água Deionizada.....	77
Tabela 4.9:	Preços de mercado para os fluidos testados.....	77
Tabela 4.10:	Programação dos testes sem Jato (Fluido Estático).....	78
Tabela 4.11:	Programação dos testes com Jato de Baixa Pressão (BP).....	78
Tabela 4.12:	Programação dos testes com Jato de Alta Pressão (AP).....	78

Tabela 5.1:	Taxa de Remoção de Material para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem e com abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.....	81
Tabela 5.2:	Desgaste Volumétrico Relativo para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem e com abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão .....	86
Tabela 5.3:	Análise EDS das superfícies usinadas com Fluido a Alta Pressão, com e sem SiC, quanto à deposição de Si (%). ....	89
Tabela 5.4:	Espessura de Camada Refundida para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem e com abrasivo, fluido estático, jato a baixa e alta pressão.....	102
Tabela 5.5:	Comprimento de Trincas para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem e com abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.....	106
Tabela 5.6:	Microdureza de Camada Refundida, Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e Material de Base, para testes realizados com Óleo A, Querosene e Água Deionizada.....	108



## LISTA DE ABREVIATURAS

A	-Abrasão;
AECM	- <i>Abrasive electrical chemical machining</i> (Usinagem abrasivo-eletroquímica);
AEDG	- <i>Abrasive electrochemical grinding</i> (Retificação por descargas elétricas);
AEDM	- <i>Abrasive electrical discharge machining</i> (Usinagem abrasiva por descargas elétricas);
AJEDM	- <i>Abrasive jet electrical discharge machining</i> (Usinagem por Descargas Elétricas e Erosão Abrasiva);
AJM	- <i>Abrasive jet machining</i> (Usinagem por jato abrasivo);
AWJM	- <i>Abrasive water jet machining</i> (Usinagem abrasiva por jato de água);
C	-Corte;
CH	-Química;
CHM	- <i>Chemical machining</i> (Usinagem química);
DVR	-Desgaste Volumétrico Relativo;
EB	-Feixe de Elétrons;
EC	-Eletroquímica;

ECDM	- <i>Electrical chemical discharge machining</i> (Usinagem eletroquímica por descargas);
ED	-Descargas Elétricas;
EBM	- <i>Electrical beam machining</i> (Usinagem por feixe de elétrons);
ECM	- <i>Electrical chemical machining</i> (Usinagem eletroquímica);
EDM	- <i>Electrical discharge machining</i> (Usinagem por descargas elétricas);
EDMUS	- <i>Electrical discharge machining with ultrasonic assistance</i> (Usinagem por descargas elétricas com assistência ultra-sônica);
F	-Ação fluídica;
GAP	-Distância entre a ferramenta e a peça;
Gr	-Grafite;
HE	-Horímetro de erosão;
HMP	- <i>Hybrid machining process</i> (Usinagem híbrida);
IBM	- <i>Ion beam machining</i> (Usinagem por feixe de íons);
LB	-Feixe laser;
LBM	- <i>Laser beam machining</i> (Usinagem laser);
LTM	-Laboratório de tribologia e materiais;
MEV	-Microscópio eletrônico de varredura;

PB	-Feixe de plasma;
PBM	- <i>Plasma beam machining</i> (Usinagem por feixe de plasma);
PCD	-Diamante policristalino;
REDM	- <i>Rotary electrical discharge machining</i> (Usinagem Rotacional por Descargas Elétricas);
TRM	-Taxa de remoção de material [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ];
US	-Onda ultra-sonora;
USM	- <i>Ultrasonic Machining</i> (Usinagem ultra-sonora);
$V_{wc}$	-Volume de metal removido por pulso;
Z	-posição instantânea da ponta da ferramenta;
ZAC	-Zona afetada pelo calor;
$Z_{max}$	-Posição máxima da ponta da ferramenta;

## LISTA DE SÍMBOLOS

Cr	-Cromo;
Cu	-Cobre eletrolítico;
$D_T$	-Percentual relativo entre $T_{on}$ e $T_{off}$ ;
I	-Corrente Elétrica [A];
Mo	-Molibdênio;
Ra	-Rugosidade média aritmética [ $\mu m$ ];
Si	-Silício;
SiC	-Carbeto de Silício;
$T_{off}$	-Tempo inativo de cada descarga [ $\mu s$ ];
$T_{on}$	-Tempo de duração de cada descarga [ $\mu s$ ];
$T_S$	-Intensidade de corrente ajustável da máquina;
V	-Tensão elétrica [V];
V	-Vanádio;
$V_f$	-Volume de material gasto da ferramenta [ $mm^3$ ];
$V_p$	-Volume de material removido da peça [ $mm^3$ ];

W	-Tungstênio;
$\Delta m_f$	-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 [g/mm <sup>3</sup> ];
$\gamma_p$	-Massa específica do material da peça usinada [g/mm <sup>3</sup> ].

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria manufatureira está enfrentando grandes desafios, que vão desde o grande avanço dos materiais de difícil usinagem (super ligas, cerâmicas e materiais compósitos), elevados requisitos de projeto (alta precisão, formas complexas e alta qualidade superficial) até as questões de custos em usinagem.

Materiais avançados têm assumido papel importante na indústria moderna, especialmente na indústria aeroespacial e automobilística e na fabricação de matrizes e moldes para injeção de plásticos. O grande desenvolvimento das propriedades térmicas, químicas e mecânicas desses materiais, associado à maior resistência ao desgaste e à corrosão, além do enorme benefício econômico gerado por novos produtos, com melhorias de desempenho e *design*, têm feito com que os processos tradicionais sejam incapazes de usinar tais materiais, ou, na melhor das hipóteses, incapazes de usinar de forma econômica. Isso porque a usinagem tradicional é baseada na remoção de material por uma ferramenta de dureza mais elevada que a dureza das peças de trabalho. Por exemplo, diamante policristalino (PCD), que é quase tão duro quanto diamante natural, não pode ser eficientemente usado por processos tradicionais. Um dos processos mais utilizados para essa operação é a retificação diamantada. Para remoção de material de uma peça de PCD, a camada de diamante do rebolo de retificação deve ser renovada constantemente, resultando no rápido desgaste do rebolo, pois a razão-G (razão entre o volume de material removido da peça e o volume de material removido da ferramenta) é 50-200 vezes maior que o volume de material removido da peça. Portanto, a aplicação da retificação clássica é apenas viável em alguns casos de ferramentas PCD. Os elevados custos associados à usinagem de materiais cerâmicos e compósitos são os maiores impedimentos para uma implementação mais abrangente desses materiais. Em alguns casos, os métodos de usinagem atuais não podem ser utilizados e inovações tecnológicas ou modificações nos processos já existentes serão necessários.

Além dos materiais avançados, as novas necessidades de projeto são outro grande problema para a indústria. Cada vez mais, os projetos utilizam-se de formas complexas (cavidades complexas de matrizes e moldes, furos não-circulares, pequenos rebaixos e

curvas), componentes micro-mecânicos com pequenas tolerâncias e fino acabamento. Nesses casos, a usinagem tradicional torna-se ineficiente. A superação desses desafios só será possível com o desenvolvimento de novos métodos de usinagem.

O avanço tecnológico dos processos de usinagem pode ser alcançado pela combinação de diferentes ações físico-químicas ao material de trabalho. Em particular, a ação mecânica, que é utilizada nos processos convencionais pode ser combinada com interações aplicadas por um processo não-tradicional tal como a Usinagem por Descargas Elétricas (EDM), Usinagem Eletroquímica (ECM) e Usinagem Laser (LBM). A grande razão para o desenvolvimento da Usinagem Híbrida (HMP) é fazer uso das vantagens, combinadas ou mútuas, e evitar ou reduzir os efeitos adversos que os processos constituintes apresentam quando são aplicados individualmente (RAJURKAR et al, 1999; PAJAK et al, 2004).

A tendência mundial, de desenvolvimento dos processos de usinagem híbrida tem sido investigada há mais de uma década. Como exemplo, processos híbridos que associam a usinagem eletroquímica com a retificação abrasiva (RAMOS; CRUZ, 2000), retificação associada à usinagem por descargas elétricas e o processo EDM com a adição de abrasivos, mas, com a utilização de fluidos dielétricos hidrocarbonetados e com jato de baixa pressão. O avanço dos processos de fabricação tem tido considerável participação da criação e desenvolvimento de processos híbridos de usinagem, ou seja, processos que associam dois ou até três processos de usinagem simultaneamente. No caso da Retificação por Descargas Elétricas (AEDG), estudos mostram que em todos os casos testados, a TRM (Taxa de Remoção de Material) é até 5 vezes maior com o processo híbrido, quando comparado com a Usinagem por Descargas Elétricas por Penetração usual (KOZAK; OCZOS, 2001). Isso se deve ao fato de que as partículas abrasivas, além de agirem mecanicamente no processo, removendo material da peça, elas agem também como concentradoras das descargas elétricas, gerando menos perdas laterais e melhorando o controle das mesmas (FERNANDES, 1999). Pode-se fazer uma comparação relativamente precisa ao se comparar o processo de Retificação por Descargas Elétricas com o processo de Usinagem Abrasiva por Descargas Elétricas, uma vez que Kozak e Oczos (2001) defendem que os dois processos são térmica e mecanicamente semelhantes e, portanto, os resultados de um podem ser extrapolados para análise em outro.

Os processos híbridos têm se desenvolvido rapidamente nos últimos anos, com seu início na década de 1990, quando surgiram várias associações entre processos não tradicionais entre si e processos tradicionais com não tradicionais. Como exemplos, são inúmeros os

trabalhos sobre processos híbridos, dentre eles: Usinagem por Descargas Elétricas (EDM) combinada com Usinagem por Ultra-som (USM), gerando o processo de Usinagem Ultra-sônica por Descargas Elétricas (UEDM) (LIN; YAN; HUANG, 2001); Usinagem Rotacional por Descargas Elétricas (REDM) (MOHAN; RAJUDURAI; SATYANARAYANA, 2002); Usinagem Eletroquímica com Descargas Elétricas (ECSM), associando EDM com Usinagem Eletroquímica, até então uma combinação inviável (JAIN; DIXIT; PANDEY, 1999); Jato Laser assistido por Usinagem Eletroquímica (LAJECM) (PAJAK ET AL, 2006); Retificação por Descargas Elétricas (EDG) (THOE et al, 1996). Ainda, segundo Kozak e Oczos (2001), a Usinagem Abrasiva por Descargas Elétricas (AEDM), Usinagem Abrasivo-Eletroquímica (AECM), Usinagem Abrasivo-Eletroquímica por Descargas Elétricas (AECDM), Usinagem Ultra-sônica Abrasivo-Eletroquímica com Descargas Elétricas (USECM).

Os Processos Híbridos de Usinagem trouxeram grandes melhorias à fabricação. Como resultados dessas associações, foram obtidas maiores velocidades de usinagem, melhoria na precisão das peças usinadas, diminuição de sobre-corte, melhoria significativa no acabamento superficial, e em alguns casos, diminuição da ZAC (Zona Afetada pelo Calor), menores comprimentos e concentração de trincas, além de menores espessuras de camadas refundidas, em especial nas superfícies usinadas por EDM.

Dentre todos os Processos Híbridos já desenvolvidos, não há registros na literatura de um processo de eletroerosão associado ao jato de água a alta pressão com abrasivo em pó em dissolução. No processo AEDM, onde há apenas a utilização de pó abrasivo disperso no fluido dielétrico, porém, sem jato de alta pressão, já foi desenvolvido por Narumiya et al (1989), e posteriormente investigado por Fernandes (1999). É proposto neste trabalho uma modificação substancial nesse processo, não só pela utilização de jato a alta pressão, mas também, pela introdução da água deionizada como fluido dielétrico, pois alguns trabalhos mostram a viabilidade técnica do uso da água no processo EDM (BAI; KOO, 2006), (CHEN; YAN; HUAGN, 1999), (JESWANI, 1981). Teoricamente, a integração entre o processo EDM com a ação erosiva do jato de água com abrasivo aumenta a Taxa de Remoção de Material, reduz a espessura da camada refundida e diminui a rugosidade.

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver e avaliar a viabilidade, técnica e econômica, do processo híbrido associando a Usinagem por Descargas Elétricas com a Erosão por Jato Abrasivo, com a sigla inglesa AJEDM (*Abrasive Jet Electrical Discharge Machining*), com a particularidade de utilização de água deionizada como substituição dos fluidos hidrocarbonetados comuns em EDM. Tais fluidos, derivados do petróleo, são



extremamente tóxicos ao operador, danosos ao meio ambiente, de alto custo e exigem cuidados especiais de estocagem e manuseio, por serem inflamáveis (ARANTES, 2001). A água deionizada é reciclável, de baixo custo, não tóxica e sem problemas de manuseio e estocagem. Sua utilização representa um avanço na Usinagem por Descargas Elétricas, em especial na EDM por penetração, uma vez que muitas pesquisas apontam como inviável a utilização de água como dielétrico. Como abrasivo, utiliza-se carbetto de silício (SiC) em pó, por possuir elevada dureza, embora sua dureza seja menor que o carbetto de boro ( $B_4C$ ), o SiC apresenta menor custo.

As investigações experimentais foram desenvolvidas em duas etapas. A primeira visou avaliar a influência da granulometria do SiC na Taxa de Remoção de Material e Rugosidade da peça usinada em condição de fluido a baixa pressão e definir esse parâmetro para os testes da etapa seguinte. Foi avaliado também a influência da concentração de abrasivo disperso no fluido dielétrico. Com base nessas informações, foram definidos os parâmetros de usinagem a serem utilizados na segunda etapa. Nessa etapa foram testados 3 dielétricos diferentes: hidrocarboneto específico para EDM, querosene e água deionizada. Foram testados também 3 condições de pressão de fluido dielétrico: fluido estático, fluido a baixa pressão e fluido a alta pressão. Como resultados, foram obtidos dados como Taxa de Remoção de Material (TRM), Desgaste Volumétrico Relativo (DVR), morfologias, topografias 3D e rugosidade  $S_a$ , espessura de camada refundida, comprimento e número de trincas e perfil de microdureza. Todos os testes e análises foram realizados no Laboratório de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia.

Desta forma, é possível afirmar que este trabalho é uma contribuição relevante ao desenvolvimento de novos processos híbridos de usinagem. Por tratar-se de um processo totalmente novo, pode se tornar importante referência no futuro àqueles pesquisadores e engenheiros especialistas em usinagem. Os desafios na área de fabricação mecânica são grandes e crescentes, o que aumenta a demanda por novas idéias e tecnologias, cada vez mais com a necessidade de atender os requisitos de qualidade e de segurança ao operador e ao meio ambiente.

O Capítulo 2 apresenta um relato da origem da usinagem não tradicional, assim como os principais processos já desenvolvidos nas últimas décadas, com comparativos de desempenho, aplicação e custos. A seguir, aborda o processo EDM, descrevendo aplicações, princípio do processo (polaridade, regime de operação, corrente, frequência, ferramental, etc), fluidos dielétricos e limitações. Apresenta também breve descrição de outros processos não

tradicionais relevantes ao trabalho, como a Usinagem por Jato Abrasivo, Usinagem por Jato de Água e Jato de Água com Abrasivo.

O Capítulo 3 aborda os processos híbridos de usinagem, apresentando sua origem e os principais processos já existentes. Vários processos são detalhados em função do diagrama de energia, dentre eles, a Usinagem Abrasivo-Eletroquímica, Usinagem Abrasiva por Descargas Elétricas, Usinagem Eletroquímica por Descargas Elétricas. Descreve então o processo de Usinagem por Descargas Elétricas e Erosão abrasiva (AJEDM), objetivo deste trabalho, apontando suas vantagens e desvantagens teóricas.

No Capítulo 4 é descrita a metodologia experimental adotada. São detalhados os parâmetros de usinagem utilizados e suas combinações (parâmetros de entrada), os procedimentos e sequência dos testes, assim como as técnicas de caracterização e quantificação dos resultados de rendimento e resposta do processo AJEDM.

O Capítulo 5 apresenta a avaliação dos resultados obtidos, focando a discussão nas diferenças entre a pressão do jato e a presença ou não de SiC no fluido dielétrico quanto à TRM, DVR, integridade superficial, espessura de camada refundida, microtrincas e microdureza.

No Capítulo 6 são então apresentadas as conclusões do autor baseadas na análise crítica e técnica dos resultados obtidos no trabalho. Ao final deste capítulo, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### PROCESSOS NÃO TRADICIONAIS DE USINAGEM

Conforme é de conhecimento geral, a usinagem é a tecnologia que se ocupa do arrancamento controlado de material de uma peça em bruto, em geral obtida por processos de forjamento, fundição, laminação, entre outros, com o objetivo de produzir peças com formas e características superficiais predeterminadas. Há muito tempo, todos os processos de usinagem usavam o contato físico entre a ferramenta e a peça para o arrancamento de cavaco utilizando basicamente dois mecanismos: o de cisalhamento (casos como torneamento, fresamento, furação...) e a abrasão (no caso da família dos processos abrasivos). Apesar de todo o avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas, esses processos têm sérias limitações, principalmente em casos de utilização de materiais duros e quando se deseja a obtenção de formas complexas ou de pequenas dimensões (Figura 2.1).

Por outro lado, a necessidade humana obrigou a pesquisa a desenvolver novos materiais normalmente de difícil usinagem por processos tradicionais. Surgiram novos aços-liga, as superligas, as cerâmicas finas, os compósitos, entre outros. Para melhor entendimento do processo híbrido AJEDM, deve-se conhecer os princípios físicos de funcionamento de alguns processos não tradicionais de usinagem.

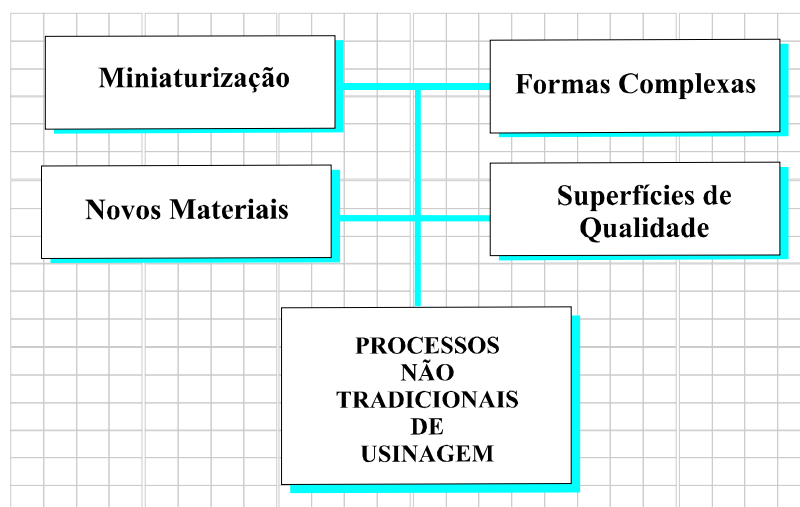


Figura 2.1. Necessidades que motivaram a criação e evolução dos Processos Não Tradicionais de Usinagem (CRUZ; MALAQUIAS; FERNANDES, 1999).

O que difere fundamentalmente os processos não tradicionais dos ditos tradicionais, além da época em que apareceram (os processos não tradicionais foram introduzidos na indústria após a 2ª Guerra mundial enquanto alguns tradicionais datam de antes da revolução industrial), são as formas de energia empregadas e os mecanismos de retirada de material da peça.

Cada processo tem seu nicho no moderno mundo da usinagem e dificilmente concorrem entre si. Para fazer um competente uso de cada processo, é necessário que se conheça detalhadamente a natureza da usinagem que se pretende realizar. Deve ser levado em conta que:

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

Em virtude desse segundo aspecto, ultimamente têm sido desenvolvidos outros processos, geralmente por combinação com processos não tradicionais básicos. Desta forma, desenvolveram-se, por exemplo, os processos AWJM (*Abrasive Water Jet Machining*), ECG (*Electrochemical Grinding*), EDG (*Electrodischarge Grinding*), LAU (*Laser Assisted Ultrasonic*), LAG (*Laser Assisted Grinding*), PCHM (*Photochemical Machining*), e muitos outros, ainda em fase de laboratório, que estão por surgir. A Tabela 2.1 apresenta as siglas e seus significados dos processos não tradicionais mais comuns.

Tabela 2.1. Principais processos de usinagem não convencional (CRUZ; MALAQUIAS; FERNANDES, 1999).

SIGLA	PROCESSO
<b>WJM</b>	<i>Water Jet Machining</i>
<b>AWJM</b>	<i>Abrasive Water Jet Machining</i>
<b>USM</b>	<i>Ultrasonic Machining</i>
<b>ECM</b>	<i>Electrochemical Machining</i>
<b>CHM</b>	<i>Chemical Machining</i>
<b>EDM</b>	<i>Electrical Discharge Machining</i>
<b>EBM</b>	<i>Electron Beam Machining</i>
<b>LBM</b>	<i>Laser Beam Machining</i>
<b>PBM</b>	<i>Plasma Beam Machining</i>
<b>IBM</b>	<i>Ion Beam Machining</i>

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

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

As Tabelas 2.2 a 2.5 apresentadas a seguir servem para uma abordagem preliminar com vistas à seleção do melhor processo. Analisando-se as referidas tabelas, nota-se que cada processo responde diferentemente a cada situação. Por exemplo, a Tabela 2.2 indica para usinagem de vidro, os processos USM (*Ultrasonic Machining*) e AJM (*Abrasive Jet Machining*). No entanto, conforme a Tabela 2.3, o AJM seria mais indicado para corte enquanto que o USM seria mais apropriado para a produção de cavidades.

Embora as tabelas em questão sejam válidas para as décadas de 80 e 90, sabe-se que houve uma extraordinária evolução nos últimos anos e é possível que algumas posições do *ranking* tenham se modificado. Por exemplo, sabe-se que o USM diminuiu muito de preço, o mesmo acontecendo com o EDM. É possível que estes processos estejam no nível A ao lado do PBM.

Seguramente, os valores da TRM e das tolerâncias dimensionais melhoraram muito na última década, em função de incorporação de novas tecnologias que elevaram o desempenho das máquinas. Assim sendo, o uso de controle adaptativo melhorou o processo EDM, enquanto que o uso de mancais aeroestáticos possibilitou o desenvolvimento do RUM (*Rotary Ultrasonic Machining*), uma variante do USM, porém, muito mais produtivo.

O custo do ferramental é um dos problemas da ECM (onde curiosamente é o único em que a ferramenta não se desgasta), devido à complexidade da mesma. Atualmente este problema já é sobrepujado com o uso do CNC, em que a ferramenta se tornará apenas uma espera de pequenas dimensões.

Tabela 2.2. Classificação dos processos em relação aos materiais (MACGEOUGH, 1998).

Processo	Material							
	Alumínio	Aço	Superligas	Titânio	Refratários	Plásticos	Cerâmica	Vidro
USM	C	B	C	B	A	B	A	A
<b>AWJM*</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>A</b>
ECM	B	A	A	B	B	D	D	D
CHM	A	A	B	B	C	C	C	B
<b>EDM</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>D</b>
EBM	B	B	B	B	A	B	A	B
LBM	B	B	B	B	C	B	A	B
PBM	A	A	A	B	C	C	C	D

A = Ótima; B = Boa; C = Fraca; D = Não aplicável;

(\*) Vale também para AJM e WJM

Tabela 2.3. Classificação dos processos com relação a operações (MACGEOUGH, 1998).

Processo	Furos				Cavidades		<u>Contorneamento</u>	Corte	
	Precisos		Normais		Precisas	Normais		Finos	Grossos
	$\phi < 0,025$		$L/\phi < 20$						
	$\phi > 0,025$		$L/\phi > 20$						
USM	-	-	A	C	A	A	C	C	-
AWJM*	-	-	B	C	C	B	-	A	-
ECM	-	-	A	A	B	A	B	-	-
CHM	B	B	-	-	C	B	-	A	-
EDM	-	-	A	B	A	A	A	A	B
LBM	A	A	B	C	C	C	-	A	B
PBM	-	-	B	C	C	C	-	A	A
EBM	A	A	A	B	C	C	B	A	B

A = Ótima; B = Boa; C = Fraca; D = Não aplicável

(\*) Vale também para AJM e WJM

Tabela 2.4. Capabilidade dos processos (MACGEOUGH, 1998).

Processo	TRM (mm <sup>3</sup> /min)	Tolerância (μm)	Rugosidade (Ra, μm)	ZAC (μm)
USM	300	7,5	0,2-0,5	25
<b>AWJM*</b>	<b>0,8</b>	<b>50</b>	<b>0,5-1,2</b>	<b>25</b>
ECM	1500	50	0,1-2,5	5
CHM	15	50	0,4-2,5	50
<b>EDM</b>	<b>800</b>	<b>15</b>	<b>0,2-12,5</b>	<b>125</b>
EBM	1,6	25	0,4-2,5	250
LBM	0,1	25	0,4-1,25	125
PBM	75000	125	Rugoso	500
PTU	50000	50	0,4-5,0	25-250

A = Ótima; B = Boa; C = Fraca; D = Ruim; E = Pior

(\*) Vale também para AJM e WJM

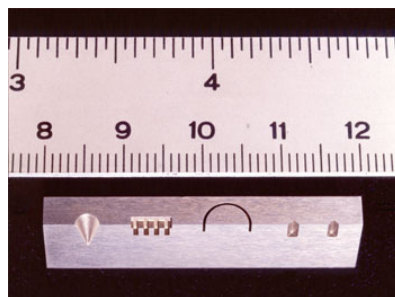
Tabela 2.5. Aspectos econômicos dos processos (MACGEOUGH, 1998).

Processo	Investimento de Capital	Ferramental	Potência	Eficiência	Consumo de Ferramentas
USM	B	B	B	D	C
<b>AWJM*</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>D</b>	<b>B</b>
ECM	E	C	C	B	A
CHM	B	B	C	C	A
<b>EDM</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>D</b>	<b>D</b>
EBM	D	B	B	E	A
LBM	C	B	A	E	A
PBM	A	B	A	A	A
PTU	B	B	B	A	B

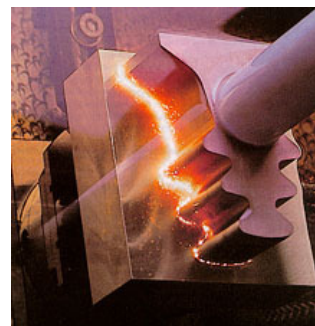
A = Ótima; B = Boa; C = Fraca; D = Ruim; E = Pior (\*) Vale também para AJM e WJM

### 2.1. Usinagem por Descargas Elétricas (EDM)

A erosão de metais por descargas elétricas foi primeiramente observada por Sir Joseph Priestley em 1768. Em 1943, dois russos, B.R. e N. I. Lazarenko, ao investigarem o desgaste de contatos de interruptores, deduziram que as descargas por centelhas poderiam ser utilizadas para usinar novos metais recém desenvolvidos que provaram ser difícil usinagem pelos métodos convencionais (MCGEOUGH, 1988). 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, e de dimensões diminutas, difíceis de serem usinados por processos tradicionais de usinagem. As Figuras 2.2 a 2.6 apresentam exemplos de peças usinadas por eletroerosão e suas aplicações.



(a)



(b)

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).

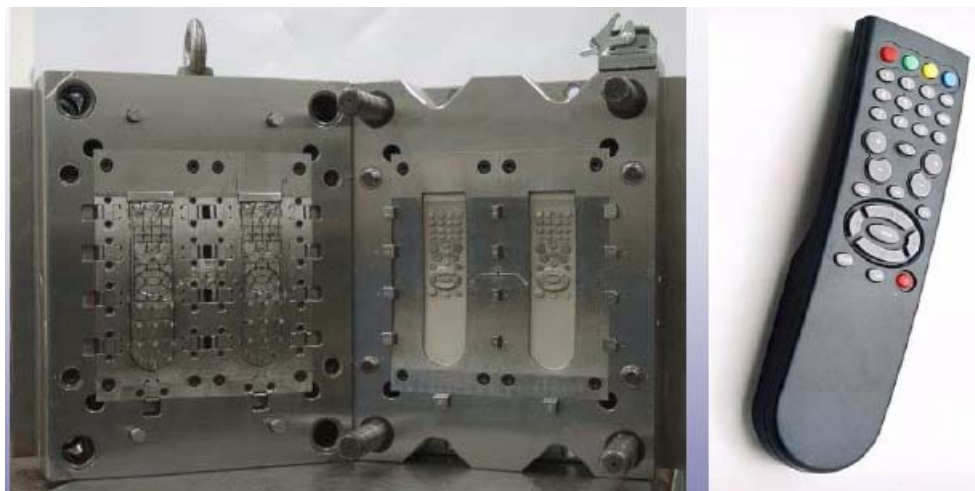


Figura 2.3. Molde de injeção de plástico, em aço de elevada dureza, confeccionado por EDM (CHARMILLES, 2006).

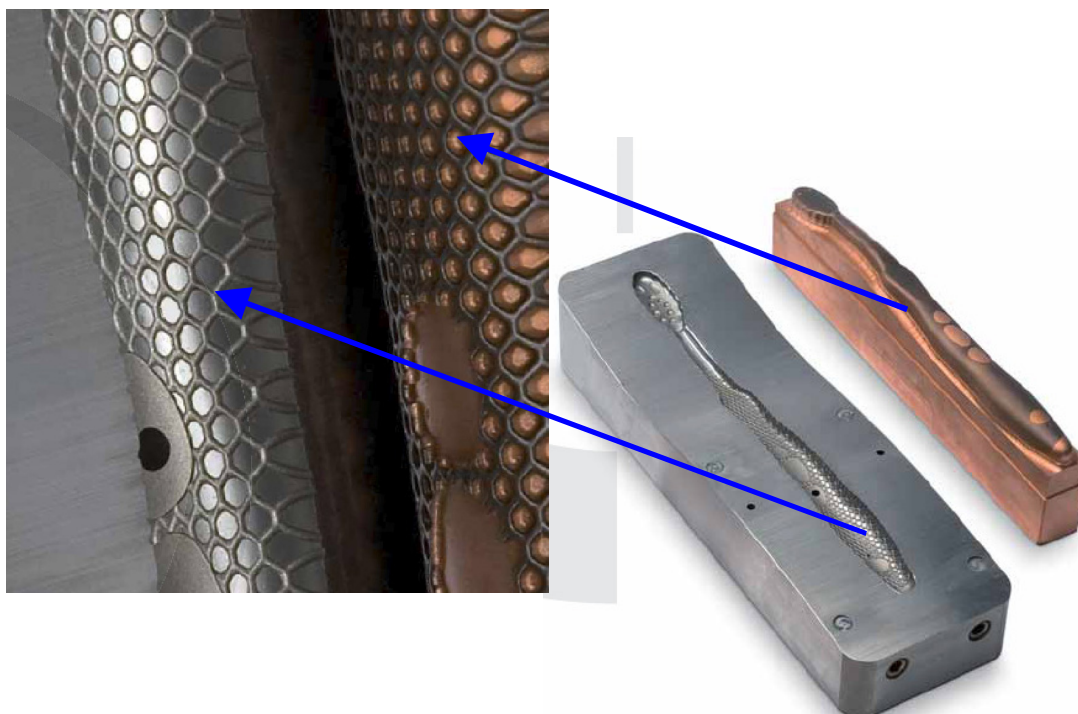


Figura 2.4. Molde de uma escova de dentes, em aço de elevada dureza e ferramenta EDM de cobre (CHARMILLES, 2006).





Figura 2.5. Eletrodo de cobre, matriz e faca de cozinha (CHARMILLES, 2006).



Figura 2.6. EDM com eletrodo de grafite (CHARMILLES, 2006).

### 2.1.1. Princípio do Processo EDM

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, 1998; 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  $12.000^\circ\text{C}$ , assim o fluido dielétrico evaporará, tornando-se eletrolítico e no meio gasoso a pressão poderá alcançar as marcas de até 200 atm (MCGEOUGH, 1998).

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 a 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, medida em  $\text{mm}^3/\text{min}$ . A TRM depende de uma série de fatores, tais como:

- ◆ Intensidade de corrente e tensão aplicada (Potência);
- ◆ Características físicas do material (ponto de fusão, condutibilidade elétrica, microestrutura etc.);
- ◆ Duração do pulso ( $T_{\text{on}}$ ) 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 2.7 demonstram a evolução da corrente e da tensão durante um ciclo de usinagem, em que:

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

$V_d$  - Tensão de descarga;

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

$t_p$  - ciclo total de pulso;

$f_p$  - frequência;

$t_a$  - período de elevação da corrente;

$t_f$  - período de queda da corrente;

$t_d$  - período de retardo da ignição;

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

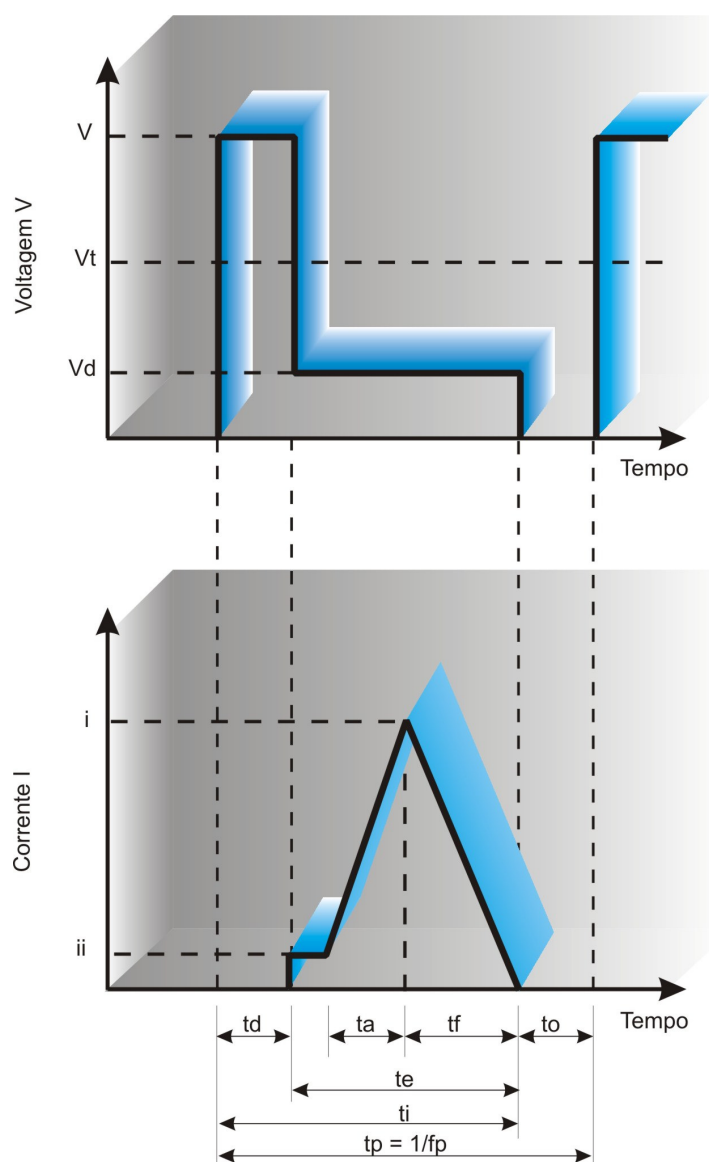


Figura 2.7. Diagramas Tensão e Corrente pelo tempo (KAMINSKI, P. C.; CAPUANO, 1999).

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, a região entre a peça e a ferramenta. Portanto, como na maioria dos processos de usinagem, a ferramenta também se desgasta (BENEDICT, 1987).

### 2.1.2. Polaridade

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

Uma visualização da sequência de usinagem é apresentada na Figura 2.8 onde estão esquematizados os detalhes da sequência 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 pela geração da referida implosão, tão importante no processo EDM para retirada de partículas do par ferramenta-peça (CRUZ; MALAQUIAS; FERNANDES, 1999).

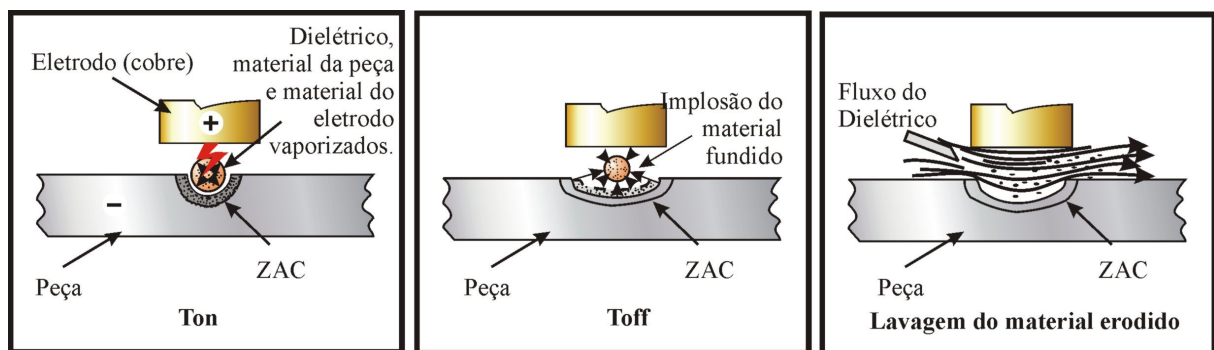


Figura 2.8. Sequência dos 3 momentos principais de uma descarga unitária (Ton, Toff e lavagem do material erodido).

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 a 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).

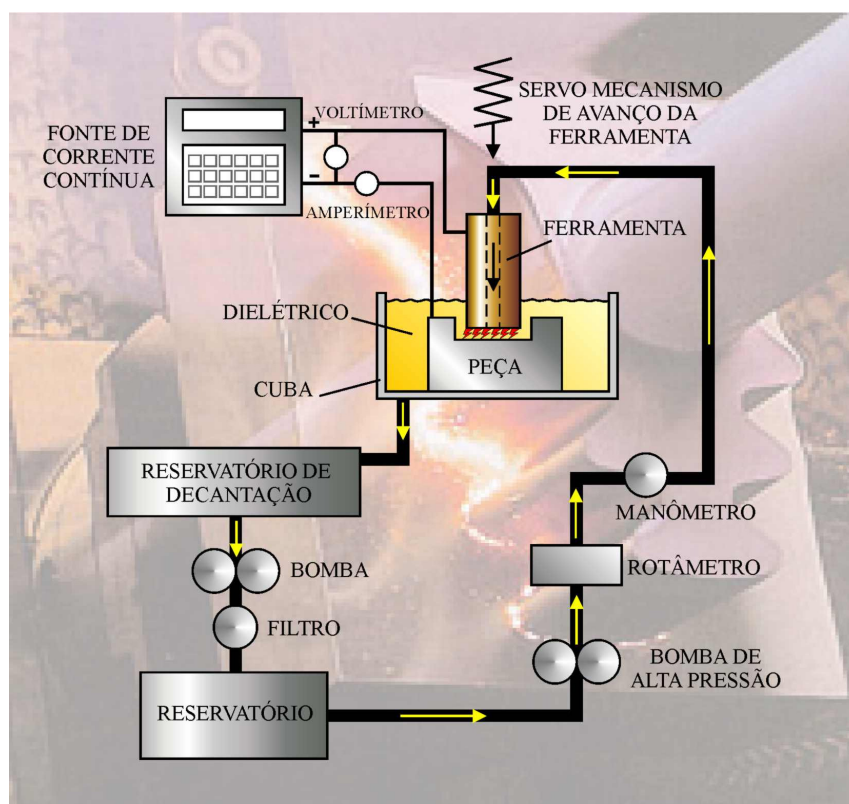


Figura 2.9. Esquema dos principais elementos construtivos de um equipamento EDM.

### 2.1.3. 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.

Têm-se maiores TRM para maiores potências e durações de pulso. Melhores acabamentos são obtidos com menores potências e menores durações de pulso. Sobre a RD pode-se dizer que também aumenta no mesmo sentido da TRM, na maioria dos casos experimentados.

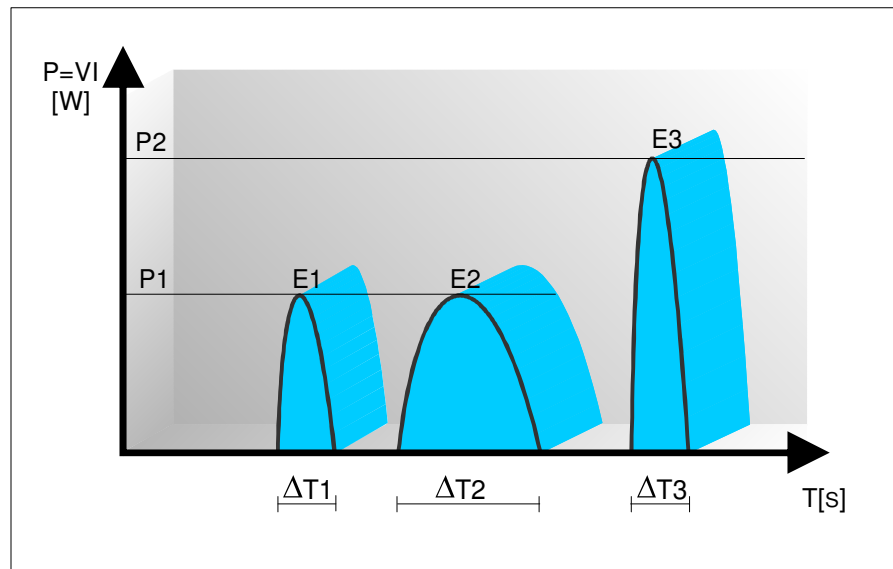


Figura 2.10. Representação dos níveis de potência e duração do pulso no processo EDM (MACGEOUGH, 1998).

#### 2.1.4. 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 ( $I_{m\acute{a}x}$ ) é aproximadamente 0,1 ampères por milímetro quadrado da seção do eletrodo. Essa fórmula simples pode ser baseada na área superficial ( $A_{sup}$ ) do eletrodo multiplicada pela constante 0,1 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 10 mm 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.

### 2.1.5. 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  $T_{\text{on}}$  é geralmente estendido para se obter altas TRMs e, desde que haja alguns ciclos por segundo, essa poderia ser uma regulação de baixa frequência. Em operações de acabamento, nos quais se tem  $T_{\text{on}}$  e  $T_{\text{off}}$  bem menores, haverá vários ciclos por segundo e poderia ser considerada uma regulação de alta frequência. Muitas vezes pode-se realmente escutar uma mudança de frequência ao se alterar os tempos  $T_{\text{on}}$  e  $T_{\text{off}}$  durante a usinagem. As Figuras 2.11 a 2.13 mostram as formas das superfícies usinadas por EDM, de modo simplificado, em diferentes frequências, e os efeitos representativos no perfil superficial.

A Figura 2.11 mostra que o acabamento com  $T_{\text{on}}$  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 por outros processos de usinagem.

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  $T_{\text{on}}$  antes de se obter a forma final.

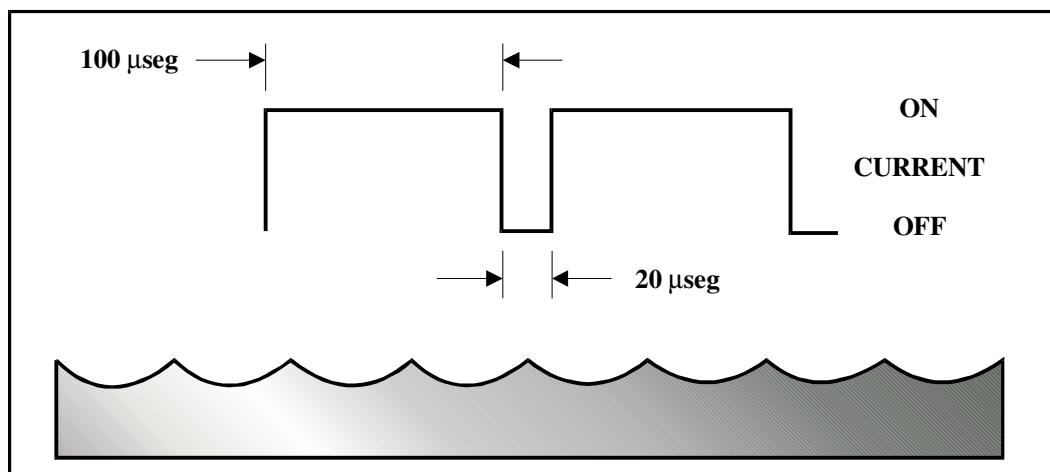


Figura 2.11. Baixa Frequência/Desbaste (GUITRAL, 1997).

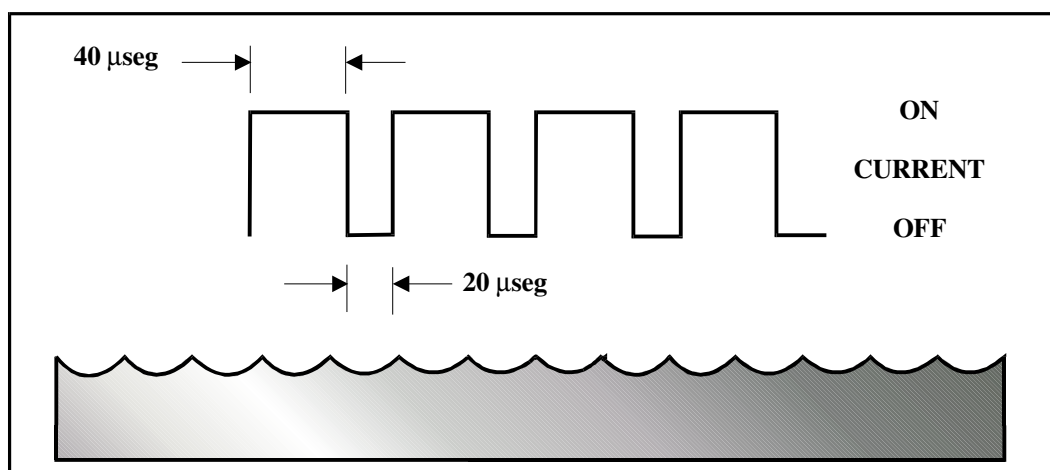


Figura 2.12. Frequência Moderada/Semi-acabamento (GUITRAL, 1997).

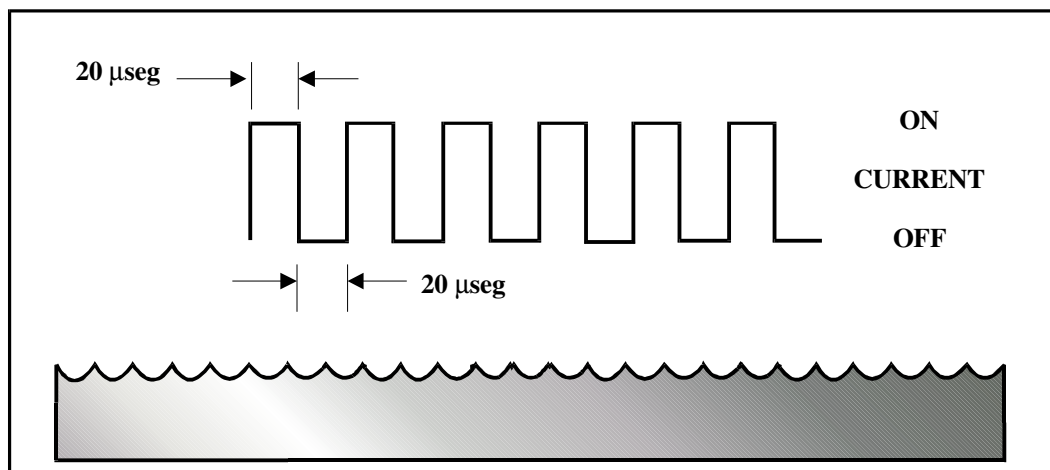


Figura 2.13. Alta Frequência /Acabamento (GUITRAL, 1997).



### 2.1.6. 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, 1998).

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

O sistema de lavagem é outro fator de significativa importância no ferramental, tendo várias funções importantes. Uma delas é a de arrastar todo material erodido entre a ferramenta e a peça, garantindo um avanço contínuo da ferramenta. Outra função é a renovação constante do fluido dielétrico na interface, mantendo as características físicas e químicas do mesmo. Essa renovação garante também o resfriamento mais pronunciado através da ferramenta ou peça (WONG; LIM; LEE, 1995). A lavagem interna pode ser feita por sucção ou injeção conforme ilustrado na Figura 2.14. As vantagens de um ou outro sistema dependem de cada caso e deve ser levado em conta não só a geometria da peça, mas também a precisão requerida (BHATTACHARYYA, 1973).

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

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

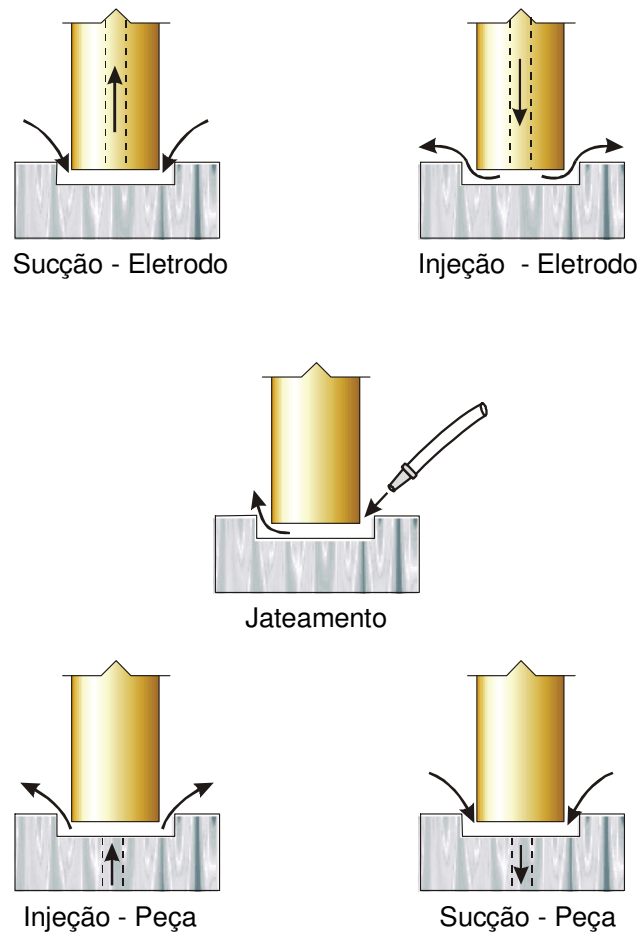


Figura 2.14. Sistemas de lavagem no processo EDM  
(CRUZ; MALAQUIAS; FERNANDES, 1999).

### 2.1.7. 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. Dentre eles, destacam-se:

- ◆ As propriedades do material da peça, incluindo o ponto de fusão e o calor latente;
- ◆ As propriedades do material da ferramenta, até mesmo os fatores geométricos;
- ◆ Os parâmetros de usinagem, dadas principalmente por V e I;

- ◆ As características elétricas da forma do pulso de descarga,  $T_{on}$  e  $T_{off}$ ;
- ◆ O sistema de lavagem;
- ◆ O tamanho do “GAP”;
- ◆ O fluido dielétrico (propriedades elétricas e térmicas, aditivos, temperatura...).

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

### 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 dão um coeficiente  $n = 0,299 \pm 17,6\%$ . Veja Tabela 2.6:

Tabela 2.6. TRM experimental e calculada (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 mantido entre estes resultados uma certa diferença constante, o que demonstra que tal expressão para cálculo da TRM não está totalmente fora da realidade. Falta, portanto, melhoria da expressão de forma a reduzir estes erros.

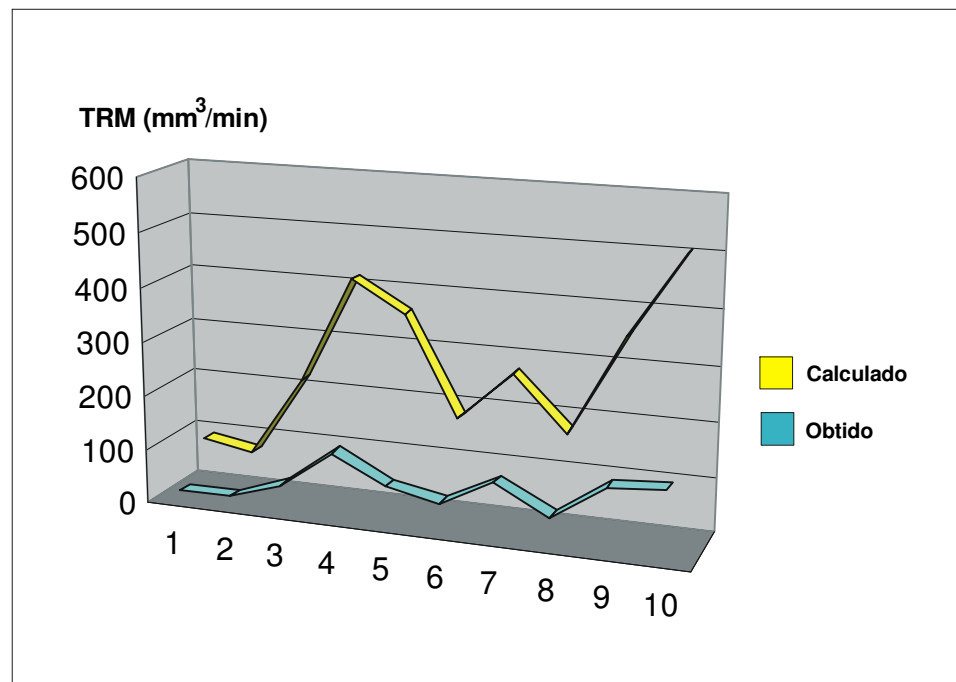


Figura 2.15. Variação da TRM para os valores calculados e obtidos experimentalmente (MAMALIS et al, 1987).

### 2.1.8. Desgaste Volumétrico Relativo (DVR)

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 Desgaste Volumétrico Relativo (AMORIM, 2002). Tal como a TRM, o cálculo do Desgaste Volumétrico Relativo (DVR) é altamente complexo e também depende de inúmeros fatores, como os relacionados anteriormente.

### 2.1.9. 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 a esforços dinâmicos, ou devem resistir a altos esforços estáticos, além daquelas expostas a ambientes agressivos e altamente corrosivos (FULLER, 1989).

Essas alterações, em geral, se subdividem em alterações nos aspectos de textura superficial e integridade superficial. A primeira refere-se às irregularidades geométricas da superfície e a segunda tem relação com as alterações metalúrgicas superficiais e sub-superficiais 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 micro-região usinada, uma vez que altas temperaturas agem como agente catalisador dessas reações e promovem o aumento do processo de difusão de átomos.

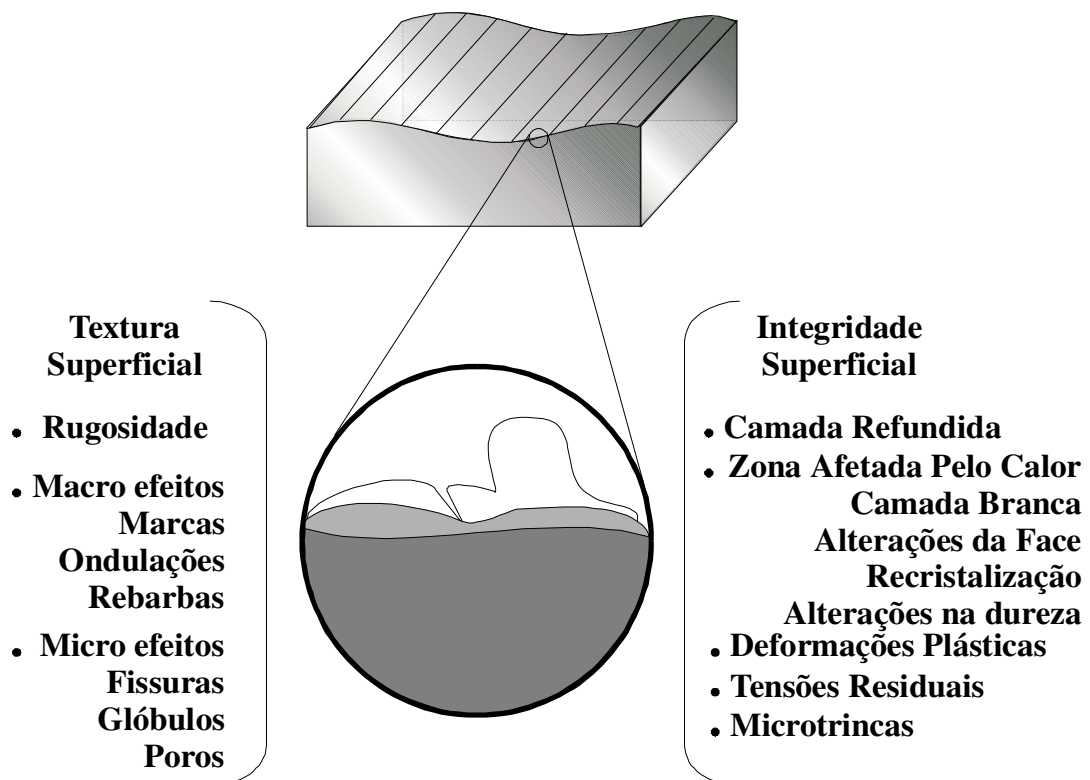


Figura 2.16. Efeitos Superficiais e Sub-superficiais (FIELD et al, 1989).

### **2.1.10. 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.

Depois de uma descarga, forma-se uma cratera e determinada quantidade de material fundido vai se redepositar na superfície da cratera devido à tensão superficial e a 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” (ZAC). Essa área é apenas parcialmente afetada pelas altas temperaturas. A dureza da camada resolidificada e da ZAC, imediatamente abaixo, dependem da corrente e da frequência usadas durante a usinagem, e da capacidade de condução de calor do próprio material. A camada refundida pode afetar a estrutura e/ou a integridade da superfície usinada por EDM (FULLER, 1989).

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 óleo). O calor excessivo quebra as moléculas de óleo em outros hidrocarbonetos e resinas. O metal fundido reage com os átomos de carbono do fluido dielétrico e depois se deposita na camada refundida, criando uma superfície “carbonetizada”. Mesmo quando usinando materiais pré-endurecidos, a camada refundida produzida pelo óleo possuirá geralmente dureza mais elevada que o material de base (GUITRAL, 1997).

A camada refundida em dielétricos aquosos é diferente da produzida quando é utilizado 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 (LEE; TAI, 2003).

### **2.1.11. Fluidos Dielétricos**

O fluido dielétrico é muito importante para o desempenho do processo EDM, pois atua diretamente em vários aspectos da usinagem. Pode ser querosene (muito utilizado no

passado), hidrocarboneto aditivado – ambos derivados do petróleo – água deionizada e até mesmo certas soluções aquosas. Conforme Fuller (1989), o fluido dielétrico tem um papel fundamental no processo: controlar a potência de abertura da descarga. 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) relata que das três funções, a primordial para a eficiência do processo é a lavagem dos produtos gerados na usinagem. O objetivo é evitar curto 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 realizados 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 (SCHUMCHER, 2004).

### **2.1.12. Principais Propriedades dos Fluidos Dielétricos**

Para bem cumprir suas funções, o fluido dielétrico deve ser avaliado principalmente em relação às seguintes propriedades ou fatores de decisão:

**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 (KOKHANOVSKAY, 2004).

**Tempo de Deionização:** Um dos fatores que implicam em altas TRMs é o tempo de deionização. Este se refere 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 subseqüentes. 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* a 40°C e 100°C, e *Saybolt Universal Seconds* (SUS) a 37,8°C, com a segunda sendo o teste predominantemente usado nos Estados Unidos. O Teste SUS é feito passando-se 60 ml do fluido a 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 a 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 microtrincas 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 redepositarem na superfície da peça. Estas duas características (calor específico e condutividade térmica) aliadas proporcionam alta capacidade de refrigeração, preservando a integridade da estrutura metalúrgica do material da peça durante a operação, uma importante característica para o processo EDM (MOUNTAIN, 1991).

**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 elétricas 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 possa 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 sofre modificações químicas ao se resfriarem até ou abaixo de seu limite de fluidez. No Brasil, particularmente, essa característica não tem

importância alguma, com exceção dos estados do sul, em alguns meses do ano (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 é desodorizada ou com odor pequeno e 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 por 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 sua 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 apresenta 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. Manter o sistema o mais limpo possível, usar uma filtragem melhor, e manter 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 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 têm tornado-se um assunto de grande importância nos últimos anos. Apesar de todos os fornecedores de fluido EDM recomendarem 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 têm maior tendência de causar irritações à pele do que outros; principalmente, fluidos do tipo solvente com alta concentração de conteúdo aromático ou aqueles que contêm certos aditivos. Os fluidos listados na Tabela 2.7 servem como exemplificação dos tipos comerciais vendidos nos Estados Unidos e no Brasil que possuem baixo conteúdo de aromáticos (INTECH EDM, 1996).

Tabela 2.7. Especificações Importantes para Fluidos Dielétricos populares no mundo (INTECH EDM, 1996).

Fluidos	Ponto de Fulgor (°C)	Viscosidade (SUS@40°C)	Limite de Fluidiez (°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.

### 2.1.13. Fluidos Dielétricos Ecológicos

O processo EDM tornou-se comercial após a descoberta da importância do fluido dielétrico, que afeta fatores como produtividade e qualidade. Porém, saúde, segurança e meio ambiente são fatores importantes, principalmente quando fluidos dielétricos derivados do petróleo são utilizados. Uma promissora fonte de substituição aos fluidos hidrocarbonetados são fluidos aquosos. Sabe-se que dielétricos aquosos podem substituir eficientemente os fluidos para aplicações EDM por penetração, uma vez que é usual a utilização desses fluidos na EDM a fio. Além dos fatores técnicos, os fluidos a base de água não apresentam problemas de toxicidade nem risco de incêndios, além de serem facilmente descartáveis, desde que devidamente filtrados. Pesquisas de mais de 20 anos estão envolvidas com o uso de água pura, água misturada com compostos orgânicos e dielétricos comerciais aquosos (ARANTES et al, 2004).

#### **Desempenho da água pura:**

O desempenho da água (em termos de TRM e desgaste da ferramenta) é geralmente inferior ao desempenho dos óleos hidrocarbonetados na EDM por penetração. Porém, o uso de água deionizada ou até mesmo água destilada pode resultar em maiores valores de TRM em algumas situações especiais como quando eletrodo de latão (polaridade negativa) é usado (ERDEN; TEMEL, 1981); quando é empregado uma duração de pulso ( $T_{ON}$ ) menor que 500  $\mu s$  (JILANI; PANDEY, 1984) e a usinagem da liga Ti-6Al-4V com eletrodo de cobre (CHEN; YAN; HUANG, 1999).

Erden e Temel (1981) mostraram que a usinagem de aço com eletrodo de latão e polaridade negativa com água deionizada e com tempo de pulso variando de 400 a 1500  $\mu s$  resultou em melhoria do desempenho (maiores TRMs e menor desgaste da ferramenta) quando comparado com o óleo hidrocarbonetado. Para um tempo de pulso ( $T_{on}$ ) de 800  $\mu s$ , a TRM foi aproximadamente 60% maior e o desgaste da ferramenta, 25% menor.

Jilani e Pandey (1984) relatam que para duração de pulso ( $T_{on}$ ) de 500  $\mu s$ , o desempenho da água de torneira foi melhor que da água destilada e óleo hidrocarbonetado, para a faixa de rugosidade da ordem de 40 a 60  $\mu m$ . Uma duração de pulso maior foi associada com acumulação excessiva de gás no GAP, que afeta as características no tempo de pausa  $T_{off}$  do dielétrico, diminuindo a TRM.

A usinagem com água destilada mostrou-se superior ao derivado do petróleo, na usinagem de uma liga Ti-6Al-4V e com ferramenta de cobre. Quando o hidrocarboneto foi utilizado, verificou-se a formação de carbono decomposto aderido à superfície usinada e na ferramenta, além de carboneto de titânio (TiC), como mostrado na Figura 2.17. Como o carboneto possui ponto de fusão mais alto, as descargas tornam-se mais instáveis, reduzindo assim, a TRM. Na usinagem com água destilada, não houve aderência de carbono na superfície da ferramenta e óxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) formou-se na superfície da peça. Como o óxido de titânio tem menor ponto de fusão que o carboneto de titânio, as descargas tornam-se muito mais estáveis e, portanto, aumentando a TRM. (CHEN; YAN; HUANG, 1999).



Figura 2.17. Deposição de carbono na ferramenta de cobre (ARANTES, 2001).

Apesar de a água proporcionar melhores resultados em termos de desempenho em algumas situações, os óleos hidrocarbonetados são superiores na grande maioria das operações de usinagem. Isso se deve à baixa viscosidade da água, que produz menor restrição ao canal de plasma, apesar de reduzir a densidade de energia e, como consequência, diminuir a TRM (KÖNIG; JÖRRES, 1987). Além disso, a grande quantidade de energia para aquecer e evaporar a água comparada ao óleo resulta em menor pressão de gás no GAP. Consequentemente, o metal fundido em cada descarga não é removido apropriadamente, por causa da pressão insuficientemente produzida pela água (MASUZAWA, 1981).

### **Água misturada com compostos orgânicos:**

Com o intuito de melhorar o desempenho da água deionizada, alguns autores (KÖNIG, 1987; MASUZAWA, 1983 e KÖNIG, 1995) estudaram a aplicabilidade da adição de compostos orgânicos com grandes estruturas moleculares tais como etilenoglicol, glicerina,

polietilenoglicol, dextrose e sacarose. Além de elevar a viscosidade do fluido de trabalho (levando a uma mais efetiva restrição ao canal de plasma) (KÖNIG, 1998), tais compostos podem ser decompostos pelas descargas, produzindo gases com maior pressão que aqueles produzidos pela decomposição da água pura. Isso poderia melhorar a remoção de metal fundido para fora das crateras, aumentando a TRM (MASUZAWA; TANAKA; NAKAMURA, 1983). Estes ainda relatam que soluções contendo compostos orgânicos com grande peso molecular foram mais eficientes para a TRM. Uma solução com alta concentração de polietilenoglicol 600 teve um desempenho comparável ao óleo hidrocarbonetado Mitsubishi EDF.

König e Jorres (1987) descobriram que o melhor desempenho em termos de produtividade/custo foi alcançado com uma solução de glicerina com 87% de concentração. Usinagem de desbaste do aço ferramenta 56NiCrMoV7 com ferramenta-eletrodo de grafite resultou em maior TRM (40%) e menor Relação de Desgaste RD (90%) quando comparado com óleos derivados do petróleo. Em um trabalho mais recente, König et al (1995) relatam que dielétricos aquosos com concentração na faixa de 50 a 60% servem tanto para operações de desbaste quanto de acabamento. Além disso, um aumento na TRM maior que 100% pode ser alcançado na usinagem de grandes áreas, tal como em matrizes para conformação mecânica.

### **Dielétricos aquosos comerciais:**

Como exemplo de fluidos dielétricos aquosos comerciais, tem-se o ELBOLUB (fabricado por Elotherm, da Alemanha), o VITOL QL (fabricado pela Sodick, Japão) e o IONOREX 500 PLUS. O último foi desenvolvido recentemente pela Oel-Held (Alemanha) e por um consórcio formado por outras empresas e universidades, com o intuito de desenvolver a tecnologia EDM (em termos econômicos e ecológicos) para a produção de moldes e matrizes.

Dünebacke (1992) investigou a TRM e a DVR alcançados com o fluido ELBOLUB na usinagem de matrizes de conformação. Em operações de desbaste, a TRM alcançada foi 2-3 vezes maior que aquela atingida pelo óleo hidrocarbonetado. Por outro lado, alta TRM só foi alcançada com ferramentas de grafite, que tiveram maior desgaste que quando usinados com óleo.

Dewes et al (2001) compararam o desempenho do IONOREX 500 com o hidrocarboneto BP180 e água deionizada misturada com inibidor de corrosão, na usinagem de uma peça de Inconel 718. A TRM mais baixa foi obtida pela água deionizada. Valores semelhantes foram obtidos com os outros fluidos dielétricos, entretanto, os maiores valores de DVR foram do BP180.

Na EDM por penetração, é usual a ferramenta e a peça trabalharem submersas no fluido dielétrico. Às vezes, usuários EDM utilizam o dielétrico por meio de um jato, diretamente na área de trabalho, sob o GAP, sem submergir a ferramenta e a peça na cura dielétrica. Karazawa e Knieda (1990) compararam o desempenho da usinagem com o dielétrico aquoso SODICK VITOL-QL por meio de jato e ferramenta-peça submersos em uma cuba. Os autores reportaram que a TRM obtida com jato foi 20% maior que com o método submerso, devido as melhores condições de lavagem da área de usinagem.

A melhoria do desempenho usando jatos pode também ser alcançada com hidrocarbonetos. Porém, é consideravelmente alto o risco de incêndio, comparado com o método submerso.

### **Efeitos superficiais:**

As superfícies das peças usinadas com dielétricos aquosos e óleos são diferentes tanto em aparência quanto em termos de valores das rugosidades. Óleos usualmente produzem uma superfície suja e com partículas de carbono dentro e ao redor das crateras usinadas. Água deionizada produz superfícies oxidadas (principalmente quando o material usinado é aço) e menores valores de rugosidade superficial (ERDEN, 1981; KONIG, 1987; MASUZAWA, 1981).

Duas camadas distintas são identificadas na superfície usinada por EDM: camada branca ou camada refundida e ZAC (Zona Afetada pelo Calor) (MCGEOUGH, 1988). Como dielétricos aquosos e óleos hidrocarbonetados têm composições químicas e condutividades térmicas diferentes, é esperado que a formação dessas duas camadas e suas propriedades mecânicas associadas dependa do tipo de dielétrico usado.

Foi investigado (KRUTH, 1995; KRANZ, 1990; OGATA, 1993) que um processo de carbonetação ocorre na camada branca de peças de aço usinadas com óleo. Em contraste, descarbonetação da camada branca foi observada com o uso da água deionizada. Carbonetação ocorre devido à decomposição térmica do carbono encontrado na cadeia de

hidrocarboneto. Átomos de carbono são transferidos para a superfície da camada branca, aumentando a concentração de carbono (OGATA, 1993). O aumento na quantidade de carbono pode aumentar a dureza do material (KRUTH, 1995). Descarbonetação é a diminuição da quantidade de carbono na camada branca devido à combinação do carbono do aço com o hidrogênio e oxigênio proveniente da quebra das moléculas de água pelas descargas elétricas (OGATA, 1993). Kruth et al (1995) observaram que as camadas brancas de peças de aço C35 usinadas com óleo contêm por volta de quatro vezes mais carbono que o material de base. Na usinagem com a água deionizada, a camada branca sofreu uma queda de 50% na quantidade de carbono.

Outro importante aspecto que caracteriza a camada branca é a presença de microtrincas, que diminuem a resistência à fadiga das peças usinadas. Kruth et al (1995) encontraram um pequeno número de trincas na camada branca das peças de aço usinadas com água, comparado aquelas usinadas com óleo. Por outro lado, Chen et al (1999) observaram um grande número de trincas na camada branca em peças de Ti-6Al-4V usinadas com água deionizada.

Kranz et al (1990) estudaram a microestrutura da camada superficial e as correspondentes resistências de tipos diferentes de aços-ferramenta usinados com dielétrico aquoso comercial (ELBOLUB) e um hidrocarboneto. Os autores demonstraram que a espessura da ZAC foi mais pronunciada com o fluido ELBOUD do que com o óleo. Isso se deve às diferenças de viscosidade e condutividade térmica dos dielétricos. As mudanças na microestrutura, combinadas com as trincas resultam em severa diminuição da resistência de alguns aços de alta resistência mecânica (X155CrVMo121), depois de usinados com dielétricos à base de água. Por outro lado, os autores descobriram que para aços de menor resistência (56NiCrMoV7), não houve mudanças significativas na resistência.

### **Aspectos ambientais:**

A indústria metal-mecânica tem sido considerada uma das maiores fontes poluidoras do meio ambiente (TAN et al, 2002) e os processos de usinagem são os principais responsáveis por essa questão por serem o ramo mais difundido da indústria (MUNOZ, 1995). A minimização do impacto ambiental tem sido um tópico importante para fabricantes de todo o mundo, especialmente depois da introdução do sistema de normas de gerenciamento ambiental (ISO 14000). Juntamente à maximização da qualidade e diminuição de custos, é



imperativo para as indústrias estarem preocupadas com a diminuição do impacto ambiental de seus processos e produtos. Para se ter uma indústria “limpa” e que esteja de acordo com os requerimentos da ISO14000 faz-se necessário identificar e eliminar as fontes de poluição. Se a fonte for inerente ao processo, então processos alternativos devem ser considerados (BYRNE; SCHOLTA, 1993).

A principal fonte de poluição da usinagem por descargas elétricas é o fluido dielétrico, em particular, óleos hidrocarbonetados. Até o momento, não há um processo totalmente limpo capaz de substituir o processo EDM. O uso de gases (oxigênio e ar) no processo EDM podem ser uma alternativa, pois não há produção de resíduos perigosos à saúde ou riscos de incêndio. Entretanto, essa técnica ainda não é suficientemente aplicável. O uso de dielétricos aquosos pode ser a solução para minimizar os problemas ambientais da usinagem por descargas elétricas por penetração.

O impacto ambiental resultante do uso do processo EDM é mostrado na Figura 2.18. Durante a operação, a emissão resultante da quebra do dielétrico pode ser facilmente inalada pelo operador e pode causar efeitos adversos à saúde, especialmente quando hidrocarbonetos são utilizados. Além do mais, os óleos podem causar problemas de pele como sérias dermatites (GOH; HO, 1993). No final da operação, a borra (material removido da peça e da ferramenta), dielétrico, filtros e resinas de deionização devem ser apropriadamente descartados; caso contrário pode ocorrer severa poluição do solo ou das águas. Óleos dielétricos são muito tóxicos e não podem ser reciclados (YEO; TAN, 1998); o seu descarte deve seguir rigorosamente as regulamentações ambientais. Por outro lado, água deionizada pode simplesmente ser eliminada via rede de esgotos, desde que os resíduos metálicos sejam eficientemente filtrados e removidos (LEVY, 1993). Apesar de as resinas deionizadoras e dielétricos aquosos serem menos tóxicos quando comparados com óleos hidrocarbonetados, eles também devem ser descartados segundo regulamentações ambientais. O processo com jato de dielétrico ao invés da imersão total do conjunto peça-ferramenta, pode reduzir drasticamente os gastos de água no processo EDM. Porém, esse método não pode ser utilizado com hidrocarbonetos devido ao grande risco de incêndio.

Um dos grandes problemas do processo EDM é a alta quantidade de energia consumida, principalmente quando comparado com processos convencionais tal como furação, para os mesmos níveis de remoção de material (TRM). Isso indiretamente afeta o meio ambiente, pois mais energia significa maior consumo de recursos naturais para produção de energia elétrica (usinas termo e hidroelétricas). A energia consumida na descarga do GAP,

a qual é a energia efetivamente usada na remoção de material, é geralmente menor que 20% do total de energia elétrica de entrada no sistema. Por outro lado, a energia consumida pelo sistema dielétrico pode representar 50% do total de energia elétrica, principalmente quando baixos valores de picos de corrente são utilizados (WANSHENG et al, 1995). O uso da água como alternativa ao hidrocarboneto deve afetar esses números, pois esta tem diferentes valores de massa específica, viscosidade, rigidez dielétrica e diferentes mecanismos de ionização.

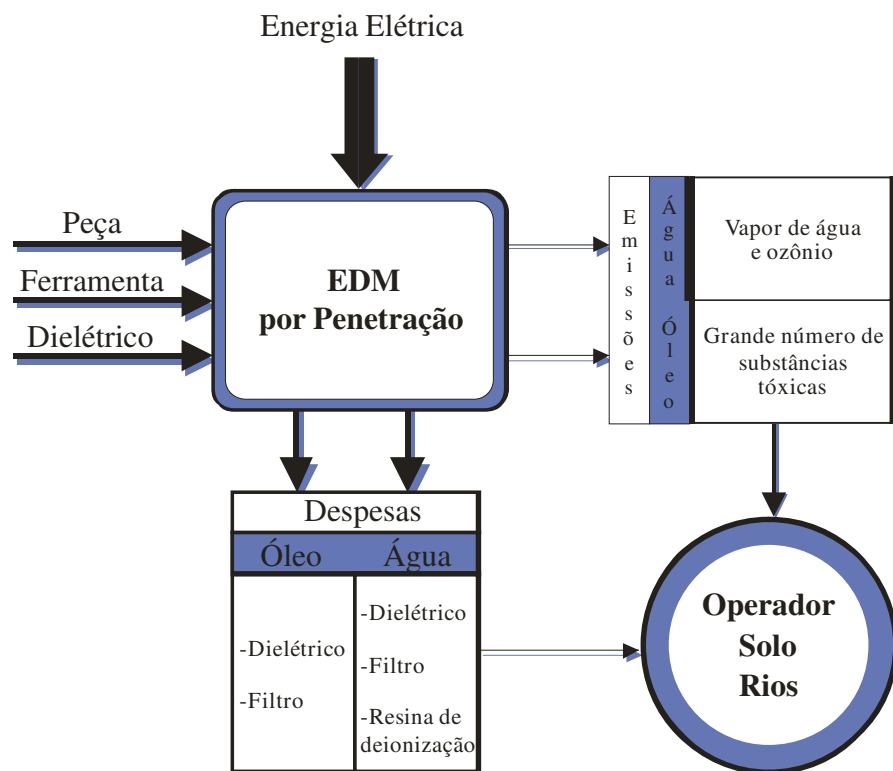


Figura 2.18. Impacto ambiental da usinagem por descargas elétricas por penetração (LEÃO; PARSHBY, 2004).

O processo EDM gera gases e fumos devido à decomposição térmica do dielétrico. A Tabela 2.8 mostra algumas das substâncias que podem ser encontradas nas emissões quando óleo, água e aquosos comerciais são utilizados no processo EDM. Pode-se observar que a água deionizada produz o menor número de substâncias, as quais são muito menos perigosas ao operador e ao meio ambiente. Algumas dessas substâncias são, por exemplo, benzeno e benzopireno, que são classificados em normas específicas e submetidos a severas restrições em termos de toxicologia e valores limites de concentração. O benzopireno e benzeno são considerados carcinogênicos (EVERTZ, 2006). Entretanto, alguns estudos (EVERTZ, 2001;

BOMMELI, 1983) mostram que a concentração de ambos os elementos químicos deve ser inferior ao valor de concentração máxima permitida.

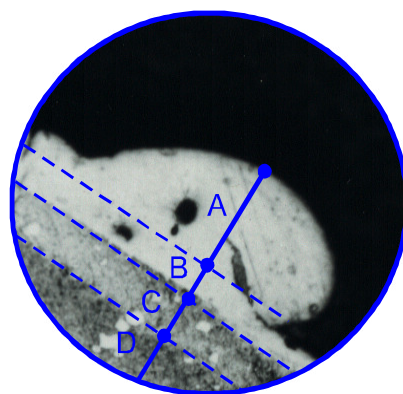
Tabela 2.8. Substâncias geradas pelo EDM por penetração com diferentes tipos de fluidos dielétricos (LEÃO; PARSHBY, 2004).

Óleos Hidrocarbonetados	Água Deionizada	Fluidos Aquosos Comerciais
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, vapores parafínicos dos hidrocarbonetos, partículas metálicas, compostos nitro-aromáticos, aldeídos, acetileno, etileno, hidrogênio, dióxido de carbono, monóxido de carbono, carvão, álcoois butílicos e acetatos butílicos	Vapores de água, monóxido de carbono, óxido de nitrogênio, ozônio, partículas metálicas e cloreto	Fluoreto, cloreto, nitrato, brometo, nitreto, fosfato, dióxido de carbono, ozônio, monóxido de carbono, xileno, formaldeído, tolueno e benzina

#### 2.1.14. Limitações do Processo EDM

O Processo de Usinagem por Descargas Elétricas possui algumas limitações. Dentre as que mais motivam a investigação desse processo híbrido, pode-se citar:

◆ Sempre ocorre a formação da Camada Refundida (Camada Branca), e ZAC (Zona Afetada pelo Calor), devido à natureza térmica do processo (Figura 2.19). Por esse motivo, quase sempre é necessária uma ou mais operações de jateamento para remoção dessa camada indesejada (ARANTES, 2001).



**Legenda:**

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

Figura 2.19. Micrografia mostrando as camadas distintas no material usinado por eletroerosão (FERNANDES, 1999).

◆ EDM é um processo lento, com baixas TRMs (Taxa de Remoção de Material) quando comparando com outros processos não tradicionais de usinagem, inclusive Usinagem por Jato de Água ou Usinagem por Jato Abrasivo. Esse fator torna o processo caro, devido ao excessivo número de horas para operação.

## 2.2. Usinagem por Jato Abrasivo (AJM)

A Usinagem por Jato Abrasivo é um processo de remoção de material de uma superfície através da ação erosiva de partículas de grãos abrasivos que se chocam contra a mesma a alta velocidade. Para se obter altas velocidades, as partículas são forçadas a passar por um bico com gás comprimido, usualmente ar. A Figura 2.20 apresenta o efeito de vários parâmetros de usinagem na TRM (Taxa de Remoção de Material). Quanto ao tamanho do abrasivo, pesquisas mostram que com seu aumento, ocorre o aumento da TRM. O mesmo efeito é observado para o acabamento superficial, ou seja, quanto maiores as partículas abrasivas, maior também a rugosidade da superfície usinada. Entretanto, existe um ponto de otimização, a partir desse ponto (aproximadamente  $75\mu\text{m}$ ), a TRM começa a declinar. Quanto maior o valor da pressão do jato, maiores as TRMs, pois maiores pressões significam maior velocidade das partículas ao atingirem a superfície, maior a energia liberada pelo impacto, maior a remoção de material. Outro parâmetro muito importante é do ângulo de ataque. Para a Usinagem por Jato abrasivo, a TRM é máxima para valores de ângulo de spray em torno de  $65^\circ$ . Essa configuração torna-se diferente quando o processo tem a utilização de água pressurizada como meio de condução do abrasivo (Usinagem por Jato de Água com Abrasivo), o que será discutido posteriormente.

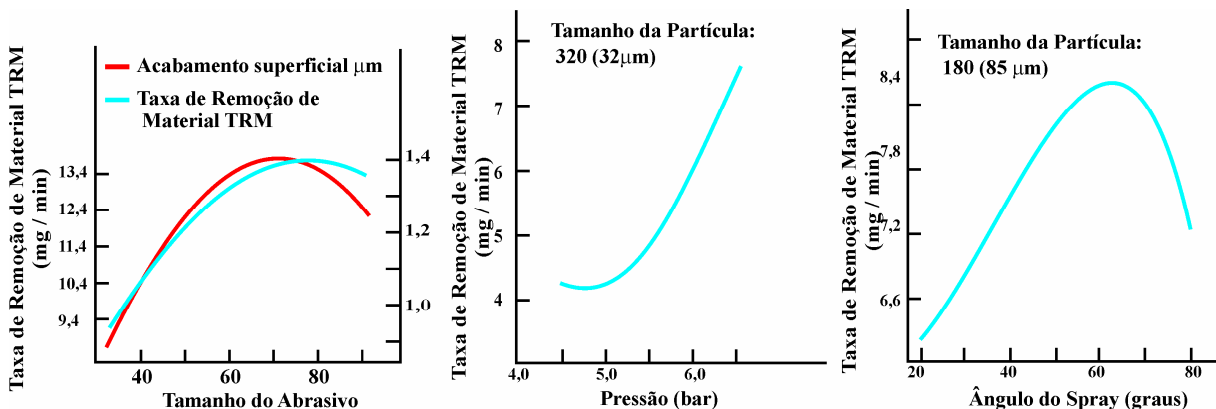


Figura 2.20. Efeito de vários parâmetros de usinagem na Taxa de Remoção de Material (TRM), Tamanho do abrasivo, pressão do ar e ângulo do spray (RAMACHANDRAN, 1992).

A Figura 2.21 apresenta um esquema ilustrando o mecanismo de remoção de material da peça pelo impacto de partículas abrasivas a altas velocidades.

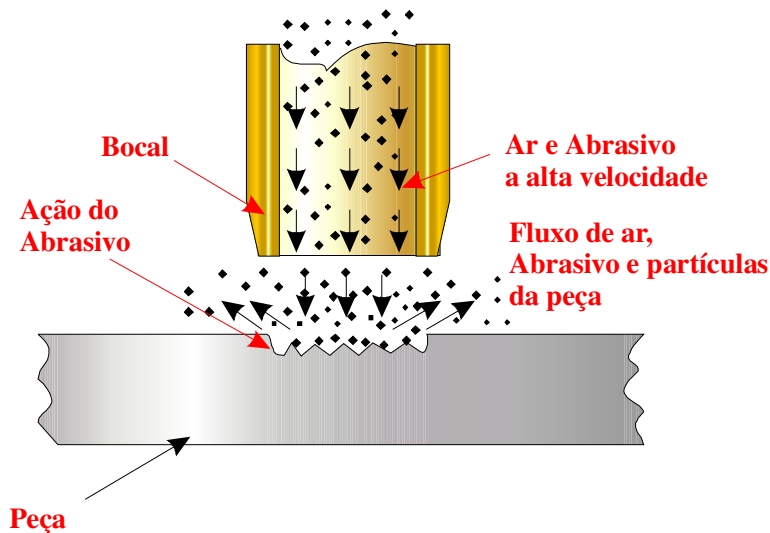


Figura 2.21. Princípio da Usinagem por Jato Abrasivo (TUERSLEY et al, 1994).

## 2.3. Usinagem por Jato de Água (WJM) e Jato de Água com Abrasivo (AWJM)

### 2.3.1. Usinagem por Jato de Água (WJM)

Uma chuva forte remove o solo no jardim e forma canais através da terra e expõe as raízes das plantas. Depois de certo tempo, a ação da chuva vai erodir mesmo as rochas mais duras e resistentes, causando desgastes nas maiores montanhas. Ao mesmo tempo em que essa ação lenta da água quebra a rocha, também promove a remoção do material. Os grandes deltas formados pelos rios pelo mundo mostram a enorme capacidade de erosão da água, mesmo com a relativa baixa velocidade das águas dos rios. Isso significa que os três aspectos do uso de jatos de água, a quebra, a mobilização e a remoção do material têm sido parte integral na formação do planeta como é conhecido hoje (RAMULU, 1993).

Todo esse poder natural pode ser adaptado ao uso humano. Nos dias atuais, dois desenvolvimentos têm levado à criação da indústria moderna. O primeiro foi o desenvolvimento da mineração hidráulica como a maior ferramenta de extração de ouro na “Califórnia do Ouro” durante os anos de 1853 a 1886 (LONGRIDGE, 1910). O segundo foi o desenvolvimento da tecnologia da mineração, jatos de água são utilizados para rápida limpeza de superfícies. O uso de equipamentos portáteis em lava-jatos e aplicações similares se espalharam rapidamente e são uma simples demonstração das vantagens dessa ferramenta.

Com o tempo, a capacidade dos sistemas tem crescido, e bombas têm sido desenvolvidas especificamente para operarem a elevadíssimas pressões. Isso tem permitido que jatos de água possam limpar e cortar materiais cada vez mais duros. Os elementos hidráulicos do sistema de jato de água também têm se modificado. Enquanto que as primeiras aplicações exigiam enormes quantidades de água para realização de trabalhos de erosão, nos sistemas atuais, utiliza-se cada vez menos volume de água para erodir quantidades cada vez maiores de material. O jato de água tem se tornado cada vez mais popular como método de limpeza de superfícies e é menos prejudicial ao meio ambiente do que limpezas químicas usuais (SUMMERS, 1995).

Jato de água é então, de forma bem simplificada, o desenvolvimento, transmissão e aplicação de força. Essa força é normalmente criada por uma bomba, que empurra certo volume de água através de uma linha de alimentação a alta pressão e promove a liberação de uma determinada quantidade de energia ao final do processo. A água flui através da linha, que em muitos casos, é um tubo de metal resistente até um bocal de injeção. Esse bocal possui um ou mais furos de saída ou orifícios, que muitas vezes são de diâmetro muito menor que o da linha da alimentação. Como um volume constante de água deve passar através dos orifícios, os quais servem para direcionar a água sob forma de jato ao ponto, superfície alvo ou peça de trabalho, ocorre aumento da velocidade da água e consequentemente, aumento da energia cinética dissipada na peça.

### **2.3.2. Usinagem por Jato de Água com Abrasivo (AWJM)**

A introdução de partículas abrasivas no processo de Usinagem por Jato d água no início dos anos 1980 formou o processo de Usinagem por Jato de Água Abrasivo (AWJM), o que abriu um novo ramo na usinagem, com o aumento da taxa de remoção de material e, recentemente, a usinagem de precisão. A faixa de materiais que têm sido cortados por esse processo inclui materiais metálicos e tradicionais materiais de difícil corte, tais como vidro, cerâmicos e materiais compósitos. Entretanto, a adição de abrasivos no jato d água a alta pressão gerou um processo de remoção de material muito complexo. O mecanismo de remoção de material em materiais dúteis pelo impacto das partículas abrasivas é uma compilação de microfratura, erosão, e fusão (CHEN; SIORES, 2001). A Figura 2.22 apresenta um esquema do processo AWJM.

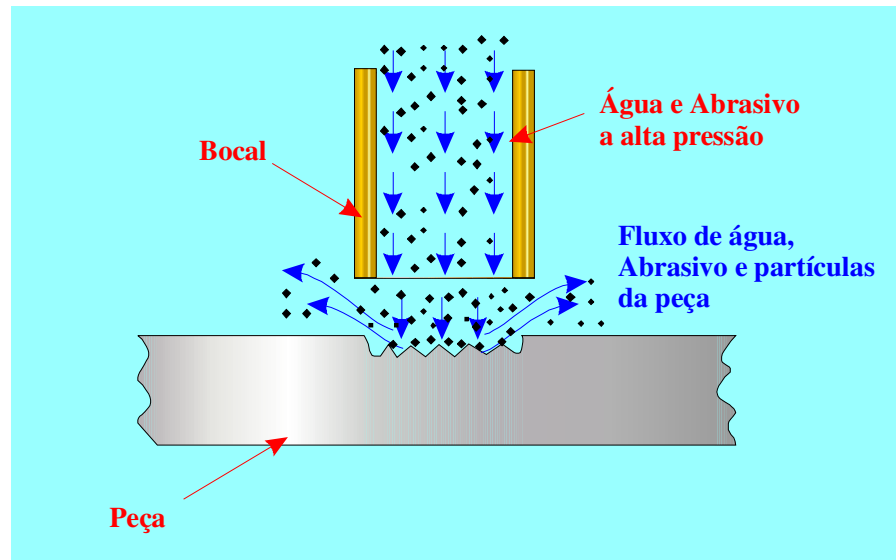


Figura 2.22. Princípio da Usinagem por Jato de Água Abrasivo (TUERSLEY et al, 1994).

A faixa de aplicação dos Jatos de Água atualmente cobre um grande espectro de utilização (Figura 2.23). Os sistemas mais comuns são aqueles utilizados na limpeza industrial. Para realização deste trabalho, a faixa escolhida é a de 100-1400bar, por ser a mais indicada para associação com outro processo de remoção de material, bem como pela maior simplicidade do equipamento e por ser mais seguro para o operador (BABU; CHETTY, 2003).

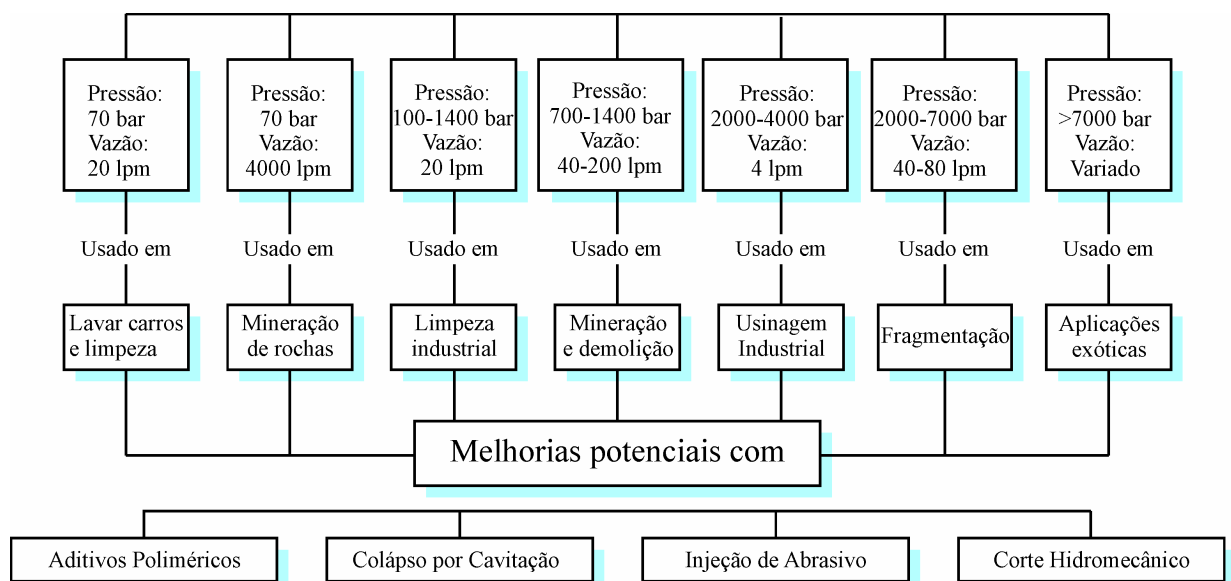


Figura 2.23. Condições de operação dos sistemas de Jato de Água a Alta Pressão (SUMMERS, 1995).

Não se deve esquecer de considerar as perdas de energia através de todo o sistema, ou seja, a energia de entrada na bomba é maior que aquela liberada sobre a peça de trabalho (Figura 2.24).

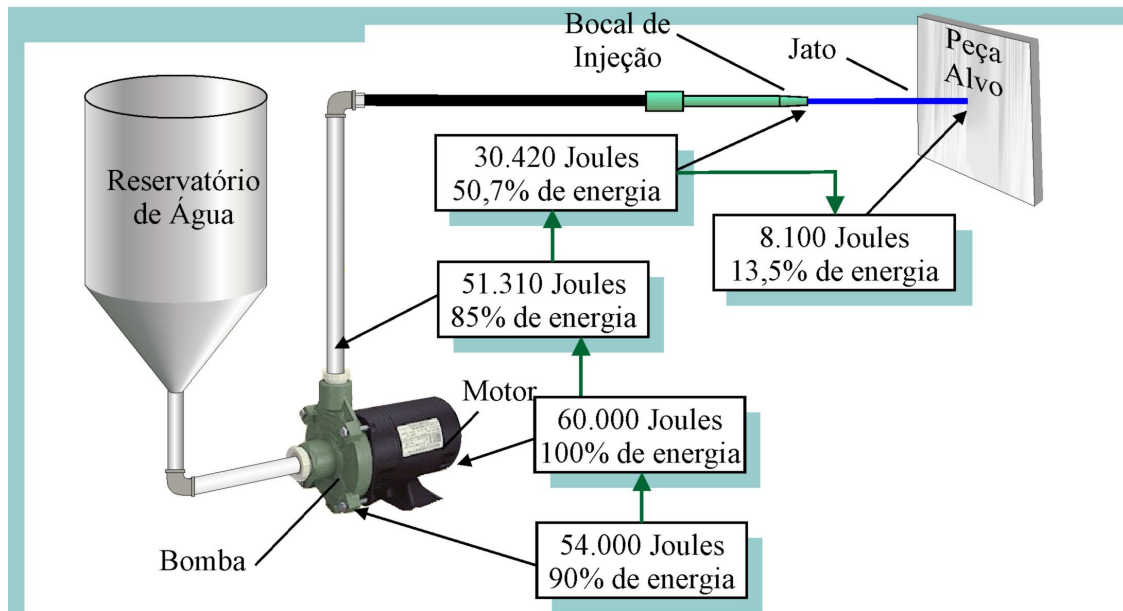


Figura 2.24. Níveis relativos das perdas de energia e percentual de entrada nos diversos pontos do sistema de Jato de Água a Alta Pressão (SUMMERS, 1995).

O processo de Usinagem por Jato de Água Abrasivo envolve o poder de impacto de partículas abrasivas na remoção de material da superfície da peça (JUNKAR et al, 2006). Geralmente, esse processo é muito utilizado em operações de corte, limpeza de superfícies já usinadas por outros processos e trepanação de furos largos, mas vários trabalhos em diferentes materiais têm mostrado que também pode ser utilizado como ferramenta de corte para operações de torneamento, fresamento e furação com razoável sucesso (BABU; CHETTY, 2003).

Alguns dos parâmetros de maior influência no processo AWJM são a pressão do jato de água, a distância entre a peça e o bocal de injeção e o tipo e tamanho do abrasivo e fluxo. Essas escolhas são, entretanto, afetadas significativamente por outros fatores tais como material e geometria do bocal de jateamento. A seguir, encontra-se detalhamento dos principais parâmetros do processo (JUNKAR et al, 2006).

**Pressão do Jato:** A pressão da água utilizada geralmente na usinagem de materiais cerâmicos é da ordem de 200-300 MPa (2000-3000bar), provavelmente porque a grande



maioria dos pesquisadores utiliza equipamentos desenvolvidos pelos mesmos fabricantes, *Flow Systems Inc., Kent, Washington, USA*, a empresa líder nesse ramo. Uma notável exceção para esse trabalho foi reportada por Hashish (1989), que desenvolveu trabalhos com uma variedade de compósitos, utilizando pressões acima de 400 MPa. Nessas pressões, os valores de TRM são até 4 vezes maiores que quando utilizadas as pressões de 200 MPa.

**Distância de Trabalho:** O efeito da variação da distância bocal-peça tem sido assunto de vários trabalhos, usualmente em conjunto com estudos de acabamento superficial. O trabalho de Freist et al (1989), que utilizou alumina como abrasivo, mostra que aumentando a distância de trabalho ocorre primeiro um crescimento na TRM, até um valor ótimo. Em seguida, esta começa a decrescer com o aumento da distância (KOZAK et al, 2001).

**Material do Abrasivo:** A especificação de material do abrasivo tem a maior influência no processo. Para os cerâmicos de menor resistência, alumina e carbetos de silício são igualmente efetivos. Para materiais cerâmicos mais avançados, muitas vezes o melhor abrasivo pode ser o carbetos de boro por possuir dureza maior (MÜLLER, 2000).

**Fluxo do Abrasivo:** O fluxo do abrasivo fica em torno de 0,1-1,5 Kg/s, com a eficiência do corte crescendo a medida em que se aumenta o fluxo até um valor crítico, donde a partir desse ponto os valores de TRM começam a cair. Essa queda se dá pelo fato de mais abrasivo, depois do ponto crítico, considerando-se a velocidade do jato constante, promover queda na velocidade média das partículas, diminuindo a quantidade de energia liberada na peça, resultando em menor remoção de material (SUMMERS, 1995; FINNIE, 1995).

**Ângulo de Ataque:** A influência do ângulo de ataque vai depender do material a ser usinado. A Figura 2.25 apresenta o comportamento da TRM em relação ao ângulo de ataque para materiais dúteis e frágeis. Sua influência no processo vai depender do tipo de comportamento do material usinado. Para um material cujo comportamento é de material dútil, a resposta ao ângulo de ataque é representada pela linha azul (máxima TRM para ângulo próximo de 15°). Já para material com comportamento frágil (linha vermelha), a máxima TRM é atingida com ângulo de 90° (OCZOS, 1996; KOZAK et al, 2001).

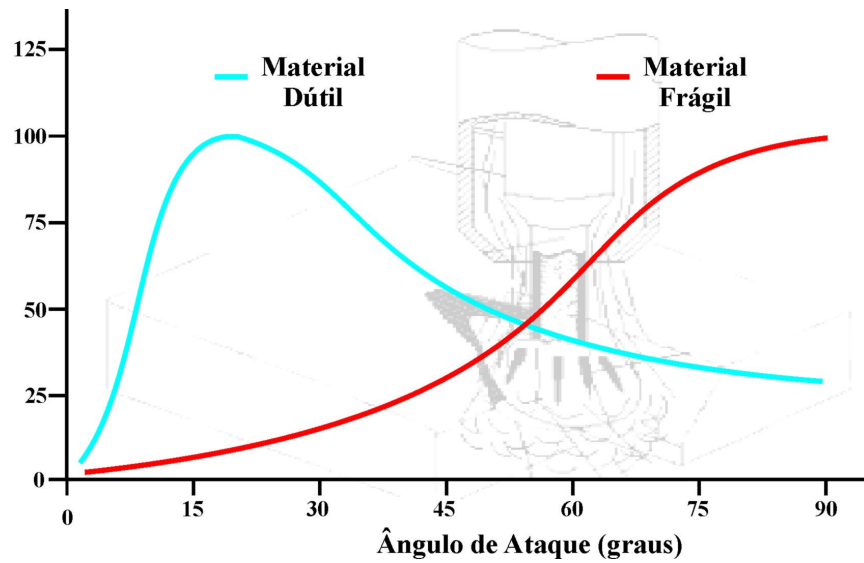


Figura 2.25. Efeito do Ângulo de Impacto na Taxa de Remoção de Material (SUMMERS, 1995).

Os dois tipos de sistemas de Jato de Água com Abrasivos mais comuns são com utilização de Venturi e Abrasivo Suspenso:

**Sistema Venturi:** Esse sistema de jato de água abrasivo mistura o abrasivo com a água em uma câmara de mistura logo depois do bico de injeção, antes do orifício de saída do jato. Na grande maioria dos sistemas hoje, o efeito venturi é utilizado para puxar as partículas abrasivas (Figura 2.27).

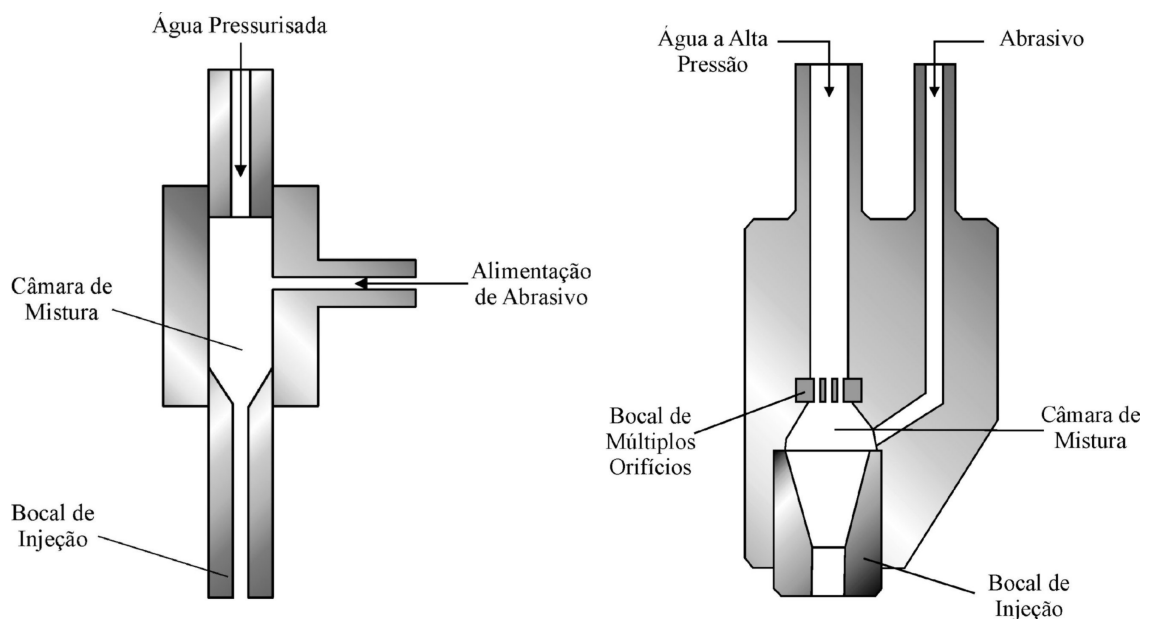


Figura 2.26. Corte de duas câmaras de mistura de um Sistema Venturi (SUMMERS, 1995).

**Abrasivo Suspenso:** O Sistema de Jato de Água com Abrasivo Suspenso acelera uma suspensão de abrasivos através de todo o sistema. Esse tipo de sistema parece ser mais eficiente que os anteriores. Uma grande utilização desse tipo de sistema está na micro-usinagem (VENKATESH et al, 1989). Como desvantagem, esse tipo de sistema causa maior desgaste das partes do equipamento. Esse foi o sistema adotado para esse trabalho, por ser o mais eficiente.

### 2.3.3. Mecanismos de Remoção de Material

Para começar, deve-se reconhecer que a remoção de material por jato de água com impacto abrasivo é governada por mecanismos que variam em função da resposta do material sob ataque. Esse conhecimento não é novo. O uso de abrasivos se espalhou rapidamente pela indústria de superfícies e o impacto efetivo das partículas tem sido estudado por pesquisadores há vários anos, com o intuito de se determinar como otimizar sua ação e também como se defender dela (PREECE, 1979).

As diferenças nos mecanismos de desgaste estão relacionadas à relativa ductilidade ou fragilidade da superfície sob ataque abrasivo e como isso pode ser explicado. O comportamento desses distintos materiais pode ser simplesmente ilustrado com a plotagem dos ângulos de ataque mais efetivos sobre uma superfície (Figura 2.27). Aqueles materiais que possuem uma resposta frágil tais como vidro, cerâmica ou rocha, vão falhar por crescimento e interseções de trincas e o melhor ângulo de ataque é aquele próximo à perpendicular à superfície. Por outro lado, aqueles materiais que são mais dúteis como a maioria dos metais falha sob um regime em que o material é tanto cortado como deformado plasticamente pelo impacto das partículas, com maior remoção de material quando os ângulos de ataque são menores, com ponto de otimização em torno de 15° para a maioria dos metais (IVES et al, 1978; PAUL et al, 1998).

Como esse trabalho trata da associação da Usinagem por Descargas Elétricas com o Desgaste Erosivo provocado por um Jato de Água com Abrasivo, será dado um enfoque especial na remoção de materiais de relativa ductilidade, embora duros, pois são os materiais largamente utilizados pelos processos EDM.

### 2.3.4. Remoção de Material Dútil

Para explicar as diferenças nos mecanismos de remoção de material e seu comportamento, observemos microscopicamente superfícies erodidas por impacto de partículas abrasivas, considerando o impacto em uma superfície dútil. Quando a partícula atinge a superfície num primeiro instante, ela penetra no material que tende a se deformar plasticamente, circundando a partícula. Com ângulos grandes de impacto isso cria uma cratera na qual a partícula pode ficar embutida, rodeada de uma “borda” de material que flui para fora do caminho da partícula, mas não se separa da superfície. Em alguns casos, a velocidade de impacto pode ser suficiente para fraturar a partícula em pequenos fragmentos e estes fluem através da superfície e podem remover a borda de material formada no impacto inicial (processo secundário de erosão). Isso ocorre frequentemente quando grandes partículas ou partículas muito frágeis são utilizadas (PAUL et al, 1998).

O material só será removido se for significativamente sulcado ou cortado da superfície pelo movimento relativo da partícula. Essa remoção de material pode ser obtida de diferentes maneiras, como sugere a Figura 2.27. As evidências físicas desses mecanismos podem ser vistas, onde uma quantidade limitada de partículas atingiu uma superfície de um determinado aço com um ângulo de ataque de  $45^\circ$  (Figura 2.28).

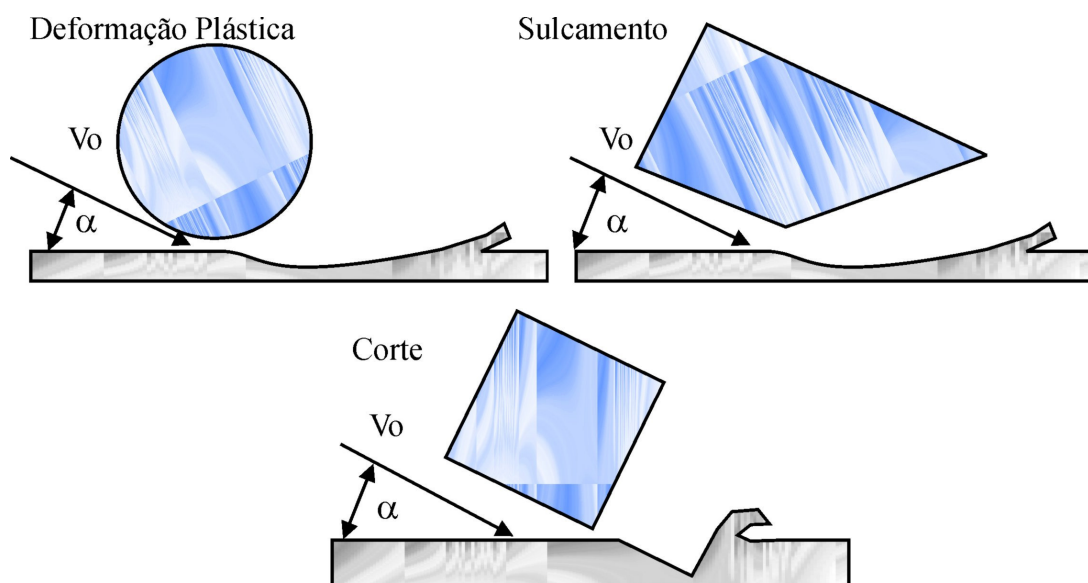


Figura 2.27. Mecanismos de erosão de materiais dúteis submetidos a ataque abrasivo (HUTCHINGS, 1976).

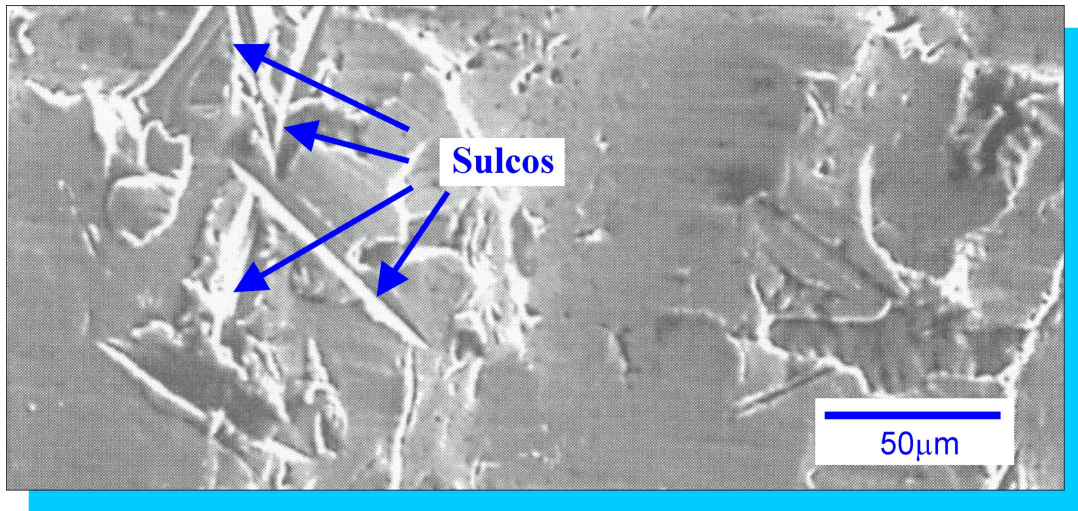


Figura 2.28. Morfologia de superfície de aço comum impactada por partículas de quartzo a 45° mostrando sulcamento e remoção de material. (SUMMERS, 1995).

Materiais dúteis são removidos através de um processo tanto de corte quanto de fluxo de material, depois de uma transição para um estado plástico. Para que isso ocorra, necessita-se que parte de material seja fundida. Isso requer considerável quantidade de calor, e pode explicar as faíscas brancas que algumas vezes podem ser vistas quando metal é cortado utilizando-se jato abrasivo.

## CAPÍTULO 3

### PROCESSOS HÍBRIDOS DE USINAGEM

Um dos métodos mais eficientes de se obter alto desempenho em usinagem consiste na combinação de vários processos, físicos e químicos, agindo na peça de trabalho, em um único processo de usinagem, definido como “Processo Híbrido de Usinagem”. A combinação de processos como cisalhamento, destruição mecânica, calor, fusão, evaporação, dissolução, dentre outros, modificando as condições físico-químicas dos processos mencionados e as propriedades do material da peça de trabalho, que devem ser fatores decisivos nos resultados do mecanismo particular de usinagem (WANG et al, 2003). Por essas razões, o desempenho dos processos híbridos pode ser consideravelmente diferente do desempenho isolado daqueles processos que os compõem. Por exemplo, a produtividade do processo híbrido associando a usinagem por descargas elétricas e usinagem eletroquímica (ADCM), que consiste no uso das descargas elétricas em eletrólito, pode gerar TRM (Taxa de Remoção de Material) de 5 a 50 vezes maior que a dos processos ECM e EDM em separado (KOZAK; OCZOS, 2001).

A maioria dos processos híbridos na indústria são os processos de usinagem híbrida abrasiva (AHM). Eles podem ser divididos em três grandes grupos: Usinagem Abrasiva por Descargas Elétricas (AEDM), Usinagem Abrasiva Eletroquímica (AECM) e Usinagem Eletroquímica por Descargas Elétricas com Abrasivo (AECDM).

As condições essenciais, as quais estão presentes em qualquer processo de usinagem, são o tipo de ferramenta e os movimentos relativos entre a ferramenta e a peça de trabalho. A maioria das ferramentas inclui: eletrodos metálicos contendo grãos de abrasivos, rebolos de retificação ou pedras abrasivas com bordas metálicas, eletrodos metálicos e grãos de abrasivos livres e ferramentas compostas de parte de abrasivo, parte de eletrodos metálicos (KOZAK; OCZOS, 2001).

Dependendo do tipo de ferramenta e dos movimentos de trabalho que são utilizados em um processo em particular, há vários métodos e variáveis, como mostrado esquematicamente na Figura 3.1.

Os processos híbridos podem ser divididos em dois grupos:

- ◆ **Métodos utilizando ferramenta abrasiva com ligação metálica:** Retificação Abrasiva Eletroquímica (AECG), Retificação Abrasiva por Descargas Elétricas (AEDG), Afiação Eletroquímica (ECH);
- ◆ **Métodos que utilizam grãos livres de abrasivos:** Acabamento Abrasivo Eletroquímico (AECF), Acabamento Abrasivo por Descargas Elétricas (AEDF), Usinagem Eletroquímica Ultra-sônica (USECM), Usinagem Abrasiva por Descargas Elétricas (AEDM) e Usinagem por Jato Abrasivo Eletroquímico (AEJM).

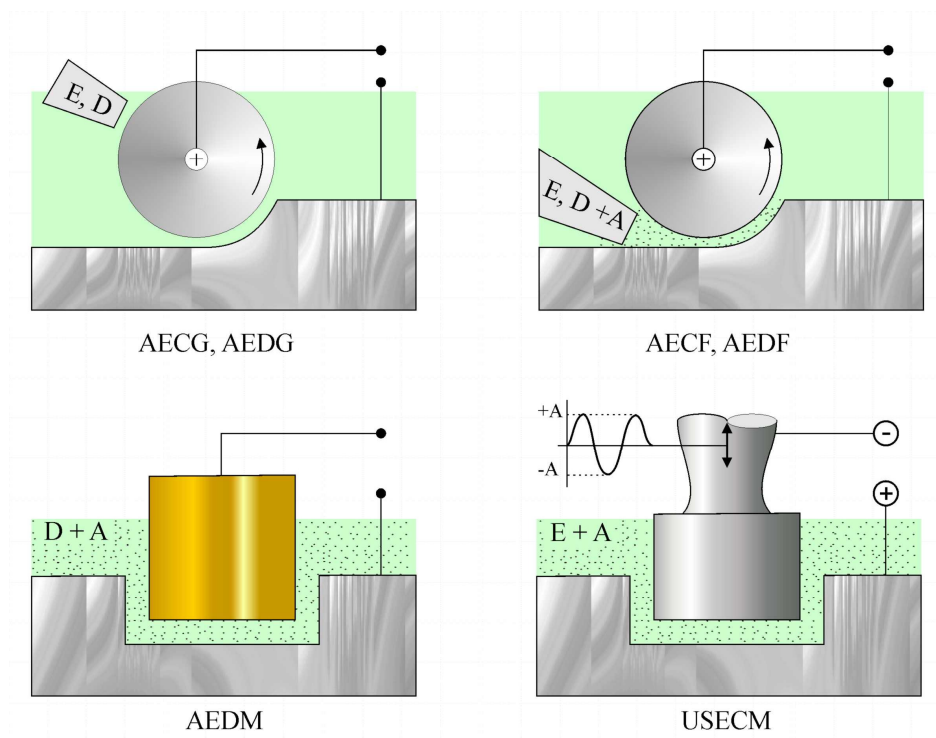


Figura 3.1. Diagrama esquemático dos métodos de usinagem abrasiva elétrica - A: abrasivo; D: dielétrico; E: Eletrólito (KOZAK; PAJURKAR, 2001).

### 3.1. Diagrama de Energia dos Processos Híbridos

Um processo híbrido pode ser representado por um diagrama de energia, que ilustra as condições do processo. Esse diagrama consiste em um triângulo, representando o tipo de cada interação, tal como se segue:

- ◆ **Interação Térmica:** como resultado da ação de um feixe de elétrons (**EB**) feixe de plasma (**PB**), feixe laser (**LB**) e descargas elétricas (**ED**);
- ◆ **Interação Eletroquímica (EC) e Química (CH);**

- ◆ **Interação Mecânica:** por abrasão **A** (retificação, fluxo abrasivo), corte **C** (torneamento, furação, fresamento, etc.), onda ultra-sonora **US**, e ação fluídica **F** (jato de água a alta pressão).

O lado esquerdo do triângulo representa os aportes energéticos que são utilizados pelas interações, como segue:

- ◆ Fótons;
- ◆ Elétrons;
- ◆ Íons;
- ◆ Plasma;
- ◆ Abrasivos;
- ◆ Cunhas de Corte;
- ◆ Jato de Fluido.

O lado direito do triângulo consiste no tipo de meio de trabalho para que ocorra a interação:

- ◆ Partículas Sólidas;
- ◆ Eletrólito;
- ◆ Fluido;
- ◆ Dielétrico;
- ◆ Gás.

Como exemplo de utilização do Diagrama de Energia, segue uma análise sobre o processo EDM, onde a interação principal é térmica por descargas elétricas (ED), cuja remoção de material ocorre por fusão e evaporação (como se pode ver na linha conectando o ponto ED ao “Ciclo do Processo” EDM, na Figura 3.2). No lado esquerdo do triângulo, durante as descargas elétricas, energia acumulada no gerador de pulso é transferida para a peça de trabalho e para a ferramenta-eletrodo, pelos elétrons e íons no canal de plasma (linhas finas ligando os pontos dos Elétrons e Íons até a linha Plasma-EDM).

Em todo o processo, o dielétrico é utilizado como meio de trabalho (linha do ponto Dielétrico do lado direito do triângulo até o círculo EDM).



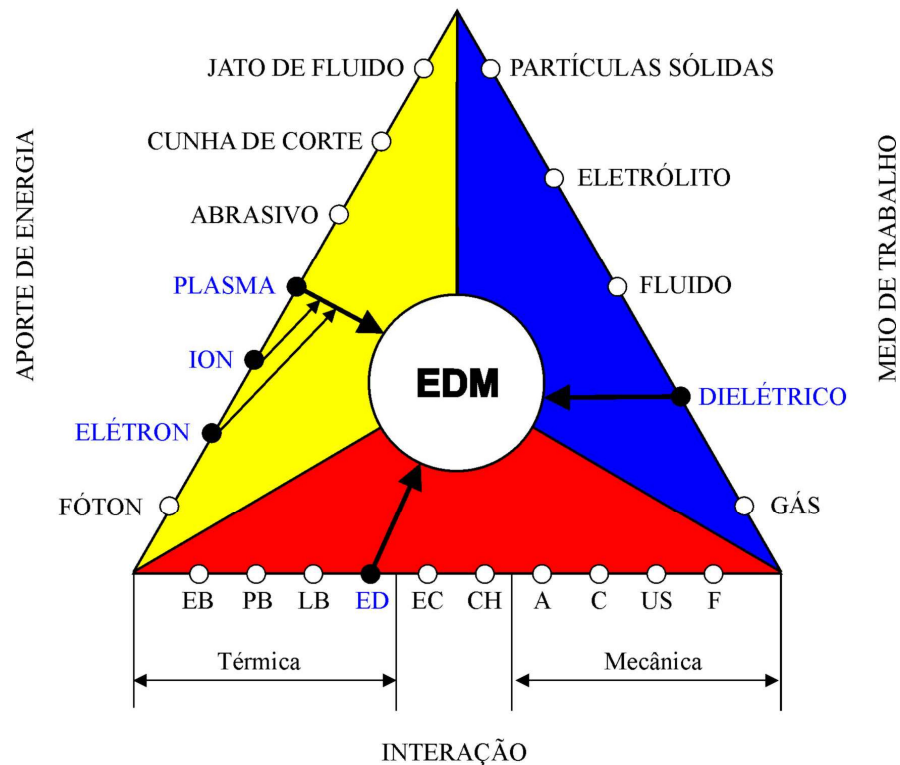


Figura 3.2. Diagrama de Energia para o processo de Usinagem por Descargas Elétricas (EDM) (KOZAK; RAJURKAR, 2001).

### 3.2. Usinagem Abrasivo-Eletroquímica (AECM)

As iterações entre os mecanismos de usinagem, que fazem parte do processo de remoção de material, mostram que a produtividade da usinagem híbrida é geralmente muito maior que a simples soma dos processos individuais (assumindo que os mesmos parâmetros, característicos de cada processo, sejam mantidos). Foram obtidos resultados positivos quanto à energia consumida e ao acabamento superficial.

Retificação Eletroquímica com rebolo abrasivo e borda metálica (AECG) consiste na combinação dos processos mecânico e eletroquímico, agindo na peça de trabalho, que mudam consideravelmente os índices de desempenho do processo. A produtividade do processo aumenta várias vezes, as propriedades da camada superficial são melhoradas, enquanto que o desgaste da ferramenta e consumo de energia caem. O processo AECG é particularmente eficiente na usinagem de peças de difícil usinagem, tais como carbonetos sinterizados, ligas de alta resistência, compósitos com matriz metálica (PCD-Co, Al-SiC, Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (OCZOS, 1996). Essa melhoria no desempenho dos processos híbridos é resultante das iterações entre micro-corte, dissolução eletroquímica, mudanças nas propriedades da camada superficial e o

processo que toma lugar na camada ativa da superfície do rebolo de retificação (processo AECG).

### 3.3. Usinagem Abrasiva por Descargas Elétricas (AEDM)

Os primeiros passos para a utilização dessa tecnologia foram dados por Kurafuji e Suda (1965), que, ao analisarem a influência de vários fluidos dielétricos, perceberam que o tempo de uso dos pós abrasivos aumentava a Taxa de Remoção de Material (TRM). Esse comportamento foi atribuído ao fato de os resíduos serem formados em uma concentração específica. Além disso, afirmaram que a maior estabilidade no processo foi devido à resistência no “GAP” ser consideravelmente menor e ao fato de haver um aumento no decorrer do processo (FURATINI et al, 2001).

Narumiya et al (1989) concluíram que é possível gerar áreas especulares relativamente grandes (acima de  $10\text{cm}^2$ ) na operação de acabamento, ao se utilizar um eletrodo de silício no processo de usinagem por descargas elétricas. O mesmo autor apresentou resultados, mostrando que a adição de pó de silício no fluido dielétrico promove uma superfície especular com uma área acima de  $500\text{cm}^2$ . A Figura 3.3 mostra a relação entre rugosidade superficial ( $R_a$ ) e a área usinada. Observa-se que a rugosidade ( $R_a$ ) gerada por processo de usinagem por descargas elétricas, com fluido misturado com pó de silício, quase não aumenta mesmo com o aumento da área usinada. Essa tendência baseia-se na larga dispersão das descargas sobre a peça. Essa dispersão é muito relacionada com o “GAP” (distância entre os eletrodo-ferramenta e a peça), que se torna grande pela mistura do pó de silício no fluido dielétrico. O “GAP” relativamente grande garante descargas elétricas estáveis e conseqüentemente bem dispersas sobre uma extensa área da peça. A Figura 3.4 apresenta a relação entre o comprimento do “GAP” e a dispersão das descargas. O processo de usinagem por EDM com fluido misturado com pó de silício permite uma maior dispersão das descargas, além de reduzir a capacitância no “GAP” pelo aumento do seu comprimento em aproximadamente 3 vezes em relação à EDM convencional, tornando a superfície mais polida, sendo que em muitos casos de acabamento apresenta “GAP” tão pequeno, que descargas anormais ocorrem durante o processo, gerando desestabilização das descargas e perda de potência de usinagem (CHOW et al, 2000).

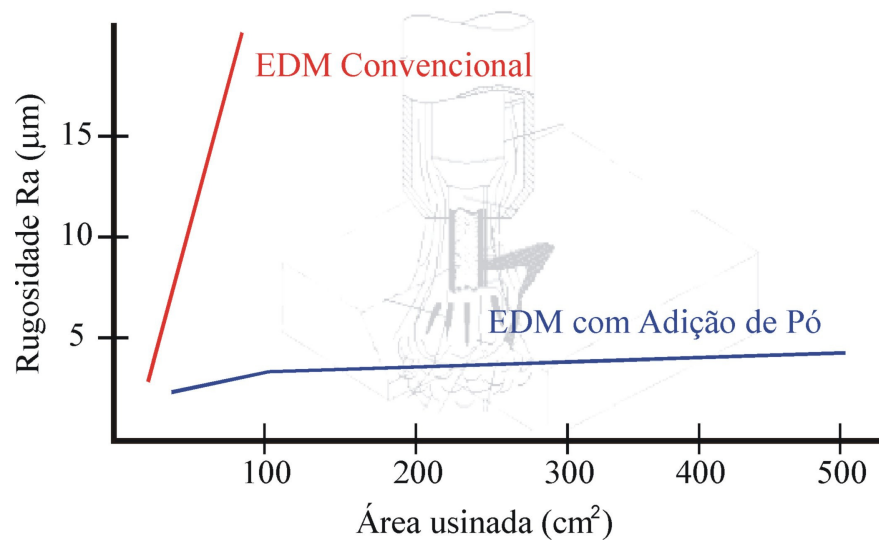


Figura 3.3. Relação entre a rugosidade superficial média (Ra) e a área usinada (NARUMIYA ET AL, 1989).

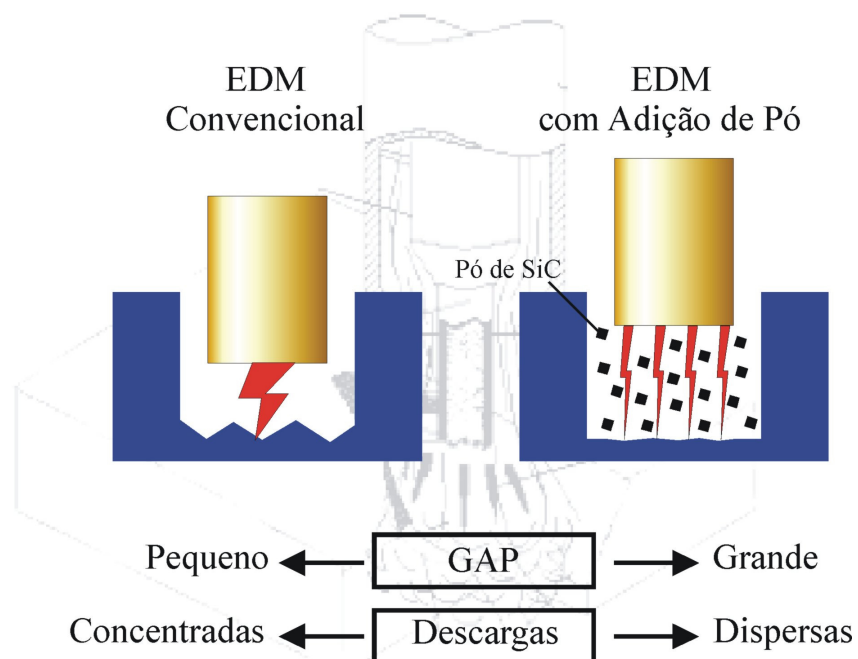


Figura 3.4. Relação entre o “GAP” e a dispersão das descargas (NARUMIYA ET AL, 1989).

No processo AEDM, a principal interação (Térmica) é adicionada à assistência mecânica-abrasiva (linha ligando o ponto A ao ciclo AEDM, do Diagrama de Energia, Figura 3.5). O aporte térmico é realizado pelo plasma e pelos grãos abrasivos. O meio de trabalho

consiste no fluido dielétrico e nas partículas sólidas, como indicado pelas duas linhas conectando o lado direito do triângulo ao círculo AEDM.

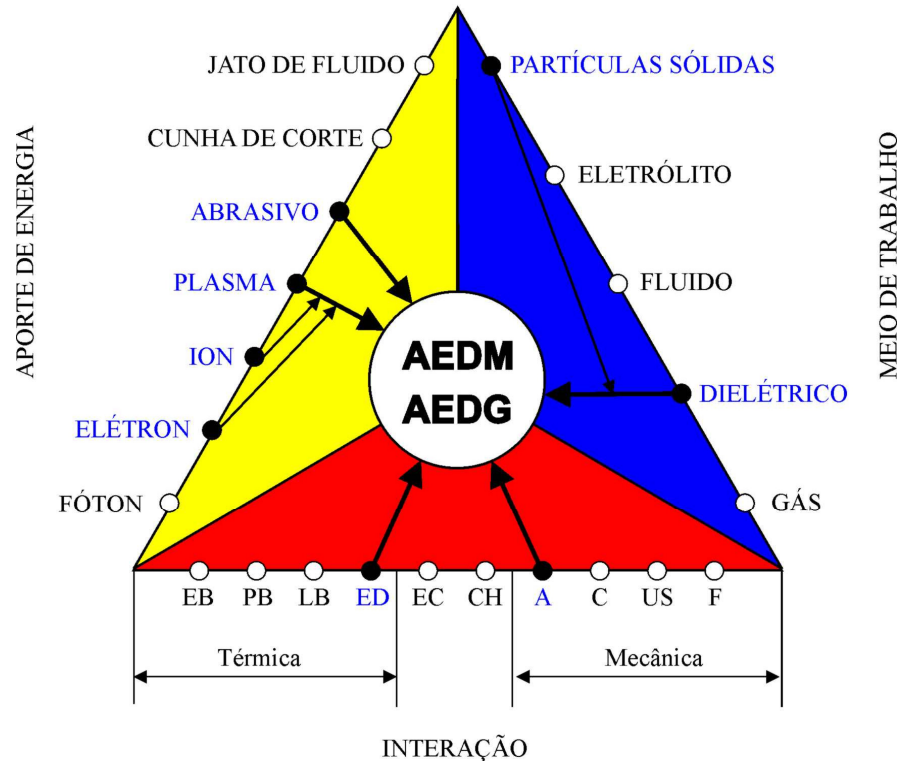


Figura 3.5. Diagrama de Energia para o processo de Usinagem Abrasiva por Descargas Elétricas (AEDM) (KOZAK; RAJURKAR, 2001).

A aplicação de pós ao meio de trabalho no processo AEDM tem como principal finalidade a obtenção de peças com acabamento superficial espelhado e de formas complexas, além de menor ZAC (Zona Afetada pelo Calor) e menor número de trincas na camada refundida. Portanto, a AEDM produz um molde ou matriz sem a necessidade de remoção da camada afetada, por exemplo, por polimento, sendo, portanto, muito utilizado em moldes para injeção de termo-plásticos e matrizes de conformação mecânica (YIH-FONG; FU-GHEN, 2005).

A Taxa de Remoção de Material (TRM) de um processo híbrido de usinagem, que seja, por exemplo, a combinação de dois processos, A e B, pode ser expressa como:

$$TRM_{Total} = TRM_{(A/B)} + TRM_{(B/A)} \quad (3.1)$$

Onde  $TRM_{(A/B)}$  é a taxa de remoção do processo A com a assistência de B e  $TRM_{(B/A)}$  a taxa de remoção do processo B com a assistência de A.

Geralmente,  $TRM_{(A/B)} > TRM_{(A)}$  e  $TRM_{(B/A)} > TRM_{(B)}$ ; portanto, a TRM total dos métodos híbridos é maior que a somatória das taxas de cada processo isoladamente,  $TRM_{(A)}$  e  $TRM_{(B)}$ .

Em muitos processos híbridos, em adição à contribuição dos processos componentes, uma nova formulação pode ocorrer levando-se em consideração um termo de interação dos processos, A e B, por exemplo:

$$TRM_{Total} = TRM_{(A)} + TRM_{(B)} + TRM_{(A \rightarrow B)} \quad (3.2)$$

As duas equações, (3.1) e (3.2) ilustram o feito sinérgico na TRM nos processos híbridos. Entretanto, não é possível usar a primeira equação para os cálculos porque a determinação dos termos seria muito difícil e complexa. Para a aplicação da segunda equação, é necessária a determinação, experimentalmente, dos valores de  $TRM_{(A \rightarrow B)}$ .

### 3.4. Usinagem Eletroquímica por Descargas (ECDM)

É o processo que combina os princípios EDM com o processo ECM. Uma combinação dos processos EDM e EDM em um único processo (ECDM) em uma solução de eletrólito, mostra conter os benefícios de ambos os processos, desde que os parâmetros do processo combinado sejam apropriadamente selecionados (YANG et al, 2006; WÜTHRICH, FASCIO, 1998). A Figura 3.6 apresenta o Diagrama de Energia para o processo ECDM por penetração.

Nos parâmetros críticos do processo, tais como Voltagem Crítica  $U_{cr}$  e Densidade de Corrente Crítica  $i_{cr}$ , a solução começa a ferver e evaporar, como resultado do calor gerado pela passagem de corrente. O gás gerado auxilia nas reações eletroquímicas do processo. Uma camada de vapor-gás resulta em um GAP de elevada resistência (KUTITA, 2006).

O processo ocorre, como aporte de energia (Figura 3.6), através do arco de plasma (descargas elétricas) e pela transferência de íons (reações eletroquímicas). O meio de trabalho é uma solução eletrolítica, não um dielétrico (linha que deixa o ponto do Eletrólito e vai até o círculo ECDM).

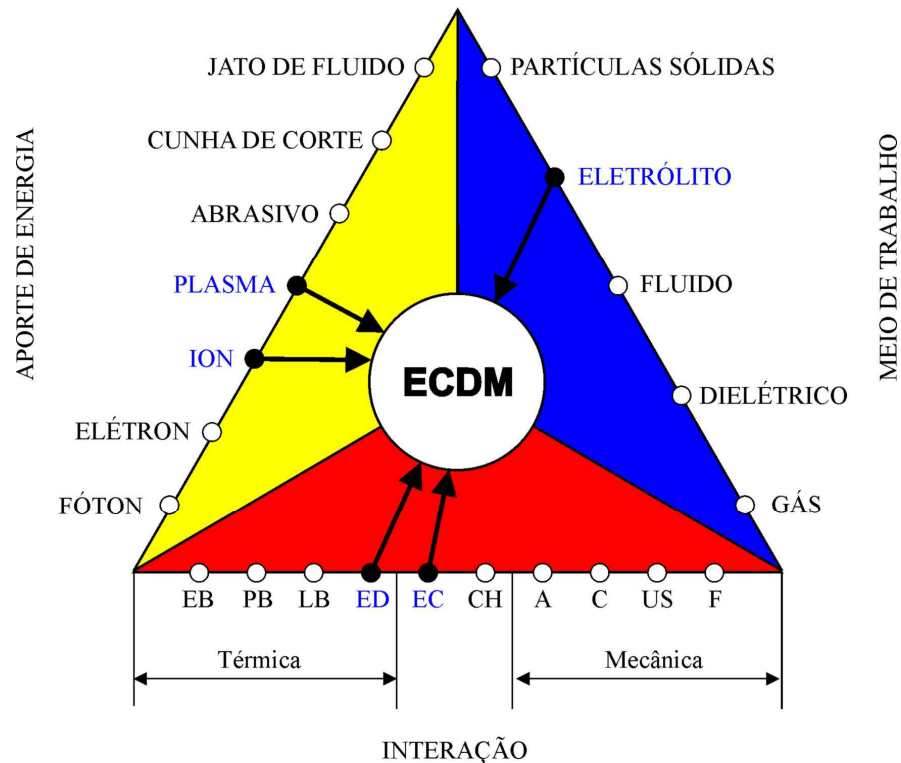


Figura 3.6. Diagrama de Energia para o processo de Usinagem Eletroquímica por Descargas (ECDM) (KOZAK; PAJURKAR, 2001).

O processo ECDM é especialmente eficiente na usinagem de materiais com tensão de escoamento superior a  $1500 \text{ N/mm}^2$  e ligas resistentes ao calor. A capacidade de usinagem é da ordem de  $10^4 \text{ mm}^3/\text{min}$ , precisão de 0,04-0,2 mm e rugosidades superficiais ( $R_a = 1,25\text{-}2,5 \text{ }\mu\text{m}$ ) podem ser obtidas.

### 3.5. Usinagem por Descargas Elétricas com Assistência Ultra-sônica (EDMUS)

Na EDM assistida por ultra-som, sabe-se que a onda acústica e o fenômeno de cavitação auxiliam na melhor remoção e fluxo de material das crateras usinadas. Essas condições de processo são importantes em micro-furação e produção de ranhuras e rebaixos, com elevada precisão geométrica.

O movimento vibratório do eletrodo-ferramenta ou da peça de trabalho melhora consideravelmente a ação de bombeamento e circulação das partículas erodidas e age sugando dielétrico “limpo” e resfriado para a interface ferramenta-eletrodo/peça, o que promove

condições otimizadas para as descargas elétricas, melhorando assim sua eficiência e as Taxas de Remoção de Material (WANSHENG et al, 2002).

O segundo efeito observado é a modificação estrutural. O movimento alternado da ferramenta-eletrodo/peça com alta frequência devido ao movimento ultra-sônico, cria mais turbulência e cavitação, o que resulta numa melhor remoção de material fundido das crateras. Isso, claro, aumenta a TRM, mas também deixa menos material na camada refundida. Portanto, as modificações estruturais são minimizadas, menos microtrincas são geradas e a resistência à fadiga é aumentada (WANSHENG et al, 2002).

Os princípios do processo EDMUS são mostrados na Figura 3.7. A interação é Térmica, através das descargas elétricas **ED** e Mecânica, através da frequência ultra-sonora **US** (indicado pelas linhas ED-EDMUS e US-EDMUS). O aporte energético é feito pelo plasma (íons e elétrons), segundo as linhas Plasma-EDMUS, onde chegam as linhas finas que saem de Íon e Elétron. O meio de trabalho é o fluido (fluxo) e o dielétrico (isolante), lado direito do triângulo.

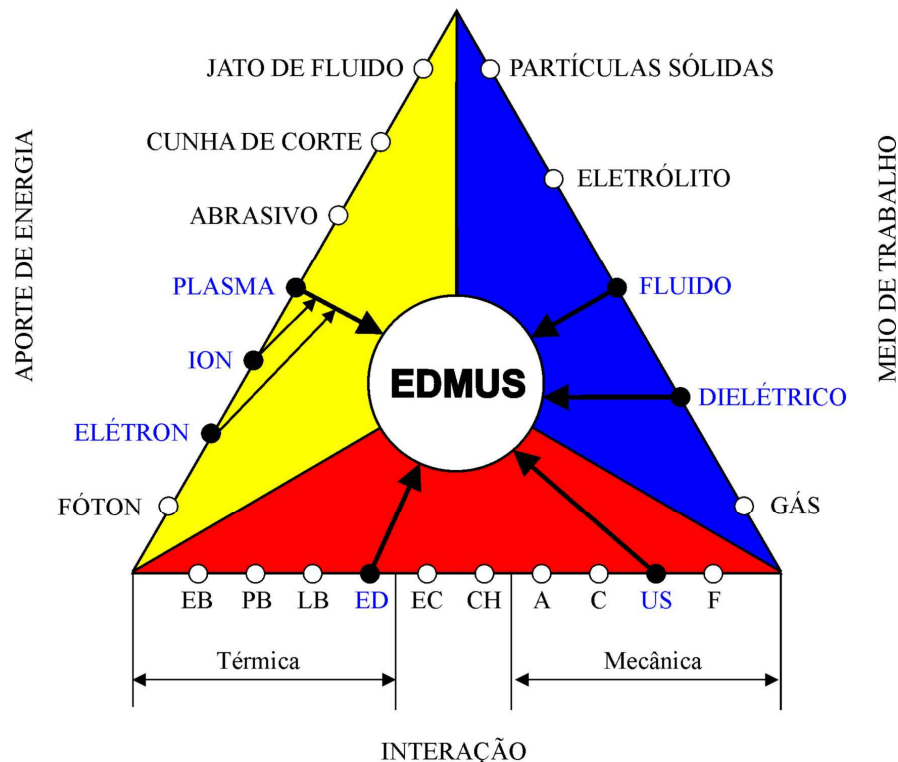


Figura 3.7. Diagrama de Energia para o processo de Usinagem por Descargas Elétricas com Assistência Ultra-sônica (EDMUS) (KOZAK; PAJURKAR, 2001).

A assistência ultra-sônica é particularmente adaptada para a produção de eletrodos de grafite para EDM. A associação da EDM com a USM pode levar a considerável melhoria na produção de peças com formatos complexos e de pequenas dimensões.

### **3.5. Retificação Abrasiva por Descargas Elétricas (AEDG)**

Um exemplo de alta eficiência dos processos híbridos de usinagem é o processo de retificação abrasiva por descargas elétricas (AEDG), onde o efeito sinérgico quanto à TRM pode ser notado. No processo AEDG, o eletrodo metálico ou de grafite, que são utilizados no processo de Retificação por Descargas Elétricas (EDG) são substituídos por um rebolo abrasivo e bordas metálicas. Como consequência, há a assistência mútua de ambos os processos, chamado processo eletro-erosivo ou de micro-corte, junto com o efeito mecânico do impacto dos grãos abrasivos. A melhoria do desempenho desse processo torna-se evidente na usinagem de materiais super-duros (peças de diamante sintético PCD), cerâmicas, carbonetos sinterizados, dentre outros (KOZAK & OCZOS, 2001).

Além de todos os efeitos já mencionados, as descargas elétricas causam a diminuição das forças de retificação, menor desgaste do rebolo abrasivo e ainda promove a sua reafiação durante o próprio processo de usinagem, ou seja, as descargas promovem a erosão de material da peça de trabalho e ainda afia a ferramenta simultaneamente (SHEU, 2004).

Os princípios do processo híbrido (AEDG) são apresentados na Figura 3.8 com o Diagrama de Energia. Como se pode observar, a interação é a mesma do processo (AEDM), sendo que a modificação está no percentual de assistência da abrasão no processo EDM. Nesse processo em questão, a abrasão tem maior parte na TRM, considerando-se que os abrasivos realmente agem arrancando material da peça, não somente melhorando o poder das descargas elétricas, como no caso do AEDM (KOSHY; JAIN; LAL, 1997).



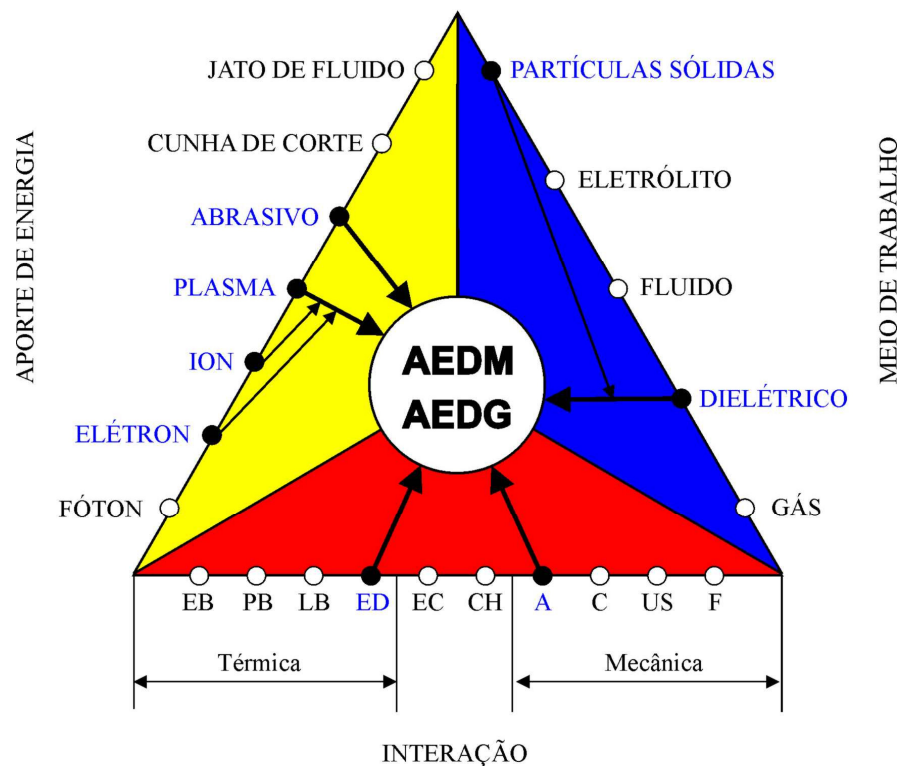


Figura 3.8. Diagrama de Energia para o processo de Retificação Abrasiva por Descargas Elétricas - AEDG (KOZAK; PAJURKAR, 2001).

Os resultados de testes experimentais realizados por Kozak e Oczos (2001), da usinagem AEDG de uma liga de titânio e compósito com matriz metálica será apresentado a seguir.

Foram realizados ensaios no processo EDG (Retificação por Descargas Elétricas) e AEDG (Retificação Abrasiva por Descargas Elétricas). As especificações são mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Especificações dos ensaios nos processos EDG e AEDG (KOZAK; OCZOS, 2001).

	EDG	AEDG
<b>Rotação</b>	500-1000 rpm	500-1000 rpm
<b>Diâmetro do rebolo</b>	152 mm	152 mm
<b>Espessura do rebolo</b>	5 mm	5 mm
<b>Material do rebolo</b>	Diamante com borda de cobre	Grafite
<b>Tamanho dos grãos</b>	220 $\mu$ m	-

O aumento da produtividade do processo EDG em relação ao EDM é determinado em maior parte pela melhoria das condições hidrodinâmicas do fluxo de dielétrico (Figura 3.9). Essa melhoria é resultante da rotação do eletrodo de trabalho em relação à peça fixa.

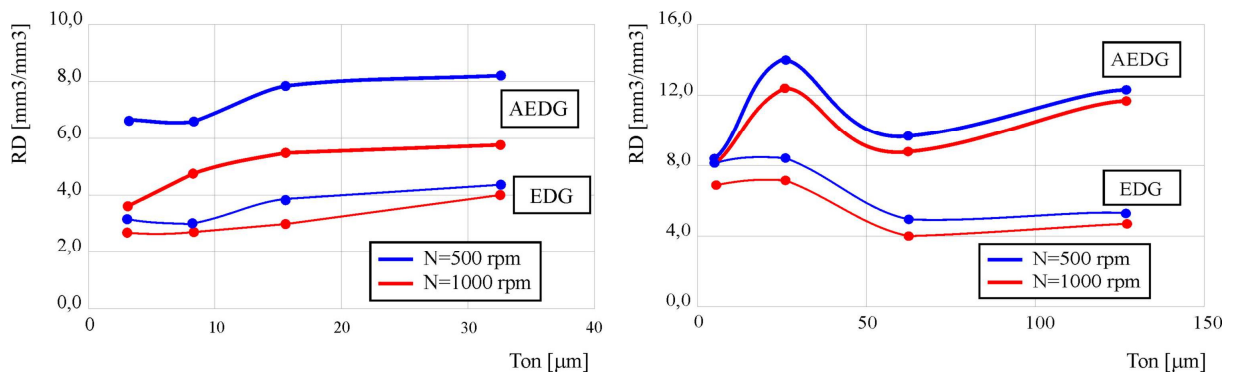


Figura 3.9. O efeito do Tempo de Descarga (Ton) na relação de desgaste dos processos AEDG e EDG (KOZAK; PAJURKAR, 2001).

Segundo Kozak e Oczos (2001), a introdução dos efeitos mecânicos no processo AEDG eleva consideravelmente a TRM. Por exemplo, no caso do Al-SiC, a TRM no processo AEDG (Ton = 100 μs e n = 500 rpm) foi 5 vezes maior que o processo EDM e duas vezes maior que o processo EDG. Com o aumento da rotação, o efeito da ação do abrasivo fica ainda mais evidente. A influência do Al-SiC na TRM é relativamente pequena no processo EDM com o aumento de Ton, de 8,3 para 10 mm³/min, quando se aumenta o tempo de pulso de 4 para 32 μs. Mas no caso dos processos EDG e AEDG, que foram realizados nas mesmas condições, a TRM foi consideravelmente elevada. Essa pode ser uma evidência da melhor utilização da energia das descargas elétricas. No caso da usinagem da liga 6Al-4V, um efeito similar pode ser notado com o aumento de 16 para 32 μs e de 64 para 128 μs e deve-se notar que esse fenômeno é ainda mais distinto em relação ao processo AEDG.

### 3.6. Usinagem por Descargas Elétricas e Erosão Abrasiva (AJEDM)

A usinagem atingiu nos últimos anos um estágio de busca por soluções para as necessidades de fabricação da indústria moderna. Engenheiros e pesquisadores têm desenvolvido cada vez mais novos processos híbridos de usinagem. No caso da Retificação por Descargas Elétricas (AEDG), estudos mostram que em todos os casos testados, a RD

(Relação de Desgaste) é até 3 vezes maior com o processo híbrido (Figura 3.9), quando comparado com a Usinagem por Descargas Elétricas isoladamente (KOZAK; OCZOS, 2001).

Esse efeito se deve ao fato de que as partículas abrasivas, além de agirem mecanicamente no processo, arrancando material da peça pelo processo erosivo, elas agem também como concentradoras das descargas elétricas, gerando menos perdas laterais e melhorando o controle dessas descargas (FERNANDES, 1999). Pode-se fazer uma comparação relativamente precisa ao se avaliar o processo de Retificação por Descargas Elétricas e o processo de Usinagem Abrasiva por Descargas Elétricas, uma vez que Kozak et al (2001) defendem que os dois processos são térmica e mecanicamente semelhantes e, portanto, os resultados de um podem ser extrapolados para análise em outro.

A Figura 3.10 apresenta o Diagrama de Energia para o Processo AJEDM. A interação principal é térmica por descargas elétricas (ED), cuja remoção de material ocorre por fusão e evaporação (linha conectando o ponto ED ao ciclo AJEDM). A interação secundária, ou de assistência é mecânica, da ação do abrasivo A e do fluxo do fluido dielétrico F. No lado esquerdo do triângulo, durante as descargas elétricas, a energia acumulada no gerador de pulso é transferida para a peça de trabalho e para a ferramenta-eletrodo, pelos elétrons e íons no canal de plasma (linhas finas ligando os pontos dos Elétrons e Íons até a linha Plasma-EDM). A presença do abrasivo A no processo atua de duas formas no processo híbrido. Primeiro, melhorando a dispersão das descargas elétricas e aumentando o GAP e segundo, pelo impacto das partículas abrasivas na superfície da peça de trabalho, promovendo erosão de material. Do lado direito do triângulo, tem-se os meios de trabalho: Dielétrico, onde estão as Partículas Sólidas (abrasivos) e que agem através da ação dinâmica desse Fluido (fluxo do fluido de trabalho), segundo as linhas que saem dos pontos citados e chegam ao círculo AJEDM.

Outra grande vantagem do processo AEDG e consequentemente do processo AEDM, é que não há formação de camada refundida. No processo EDM, sempre ocorre formação de uma camada branca, ou camada refundida, pois como a velocidade do fluido dielétrico nesse caso é pequena (chamamos de vazão de torneira), não se consegue evitar que algum material fundido volte a se solidificar por sobre a superfície usinada. Essa camada branca é prejudicial à peça, pois afeta as propriedades mecânicas da superfície gerada. Com a aplicação do jato abrasivo simultaneamente ao processo de eletroerosão, mesmo que ocorra deposição de material na superfície usinada, esse material será quase que instantaneamente removido pela ação erosiva do abrasivo, conforme ilustra a Figura 3.11.

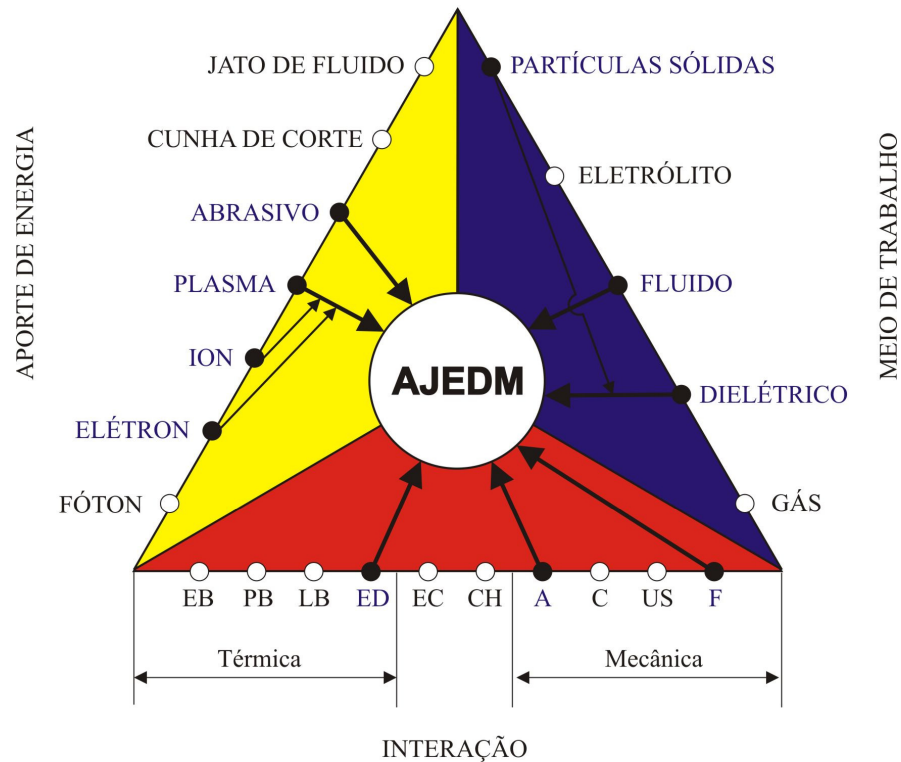


Figura 3.10. Diagrama de Energia para o processo de Usinagem por Descargas Elétricas e Erosão Abrasiva (AJEDM).

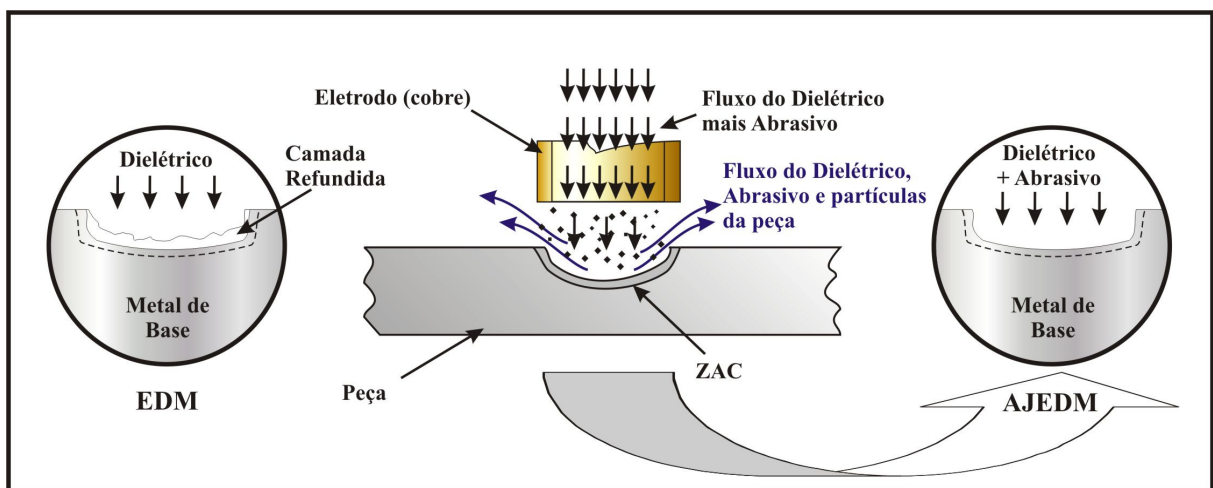


Figura 3.11. Princípio da Usinagem Híbrida (EDM + AWJM).

Como conclusões, pode-se, nesse estágio de desenvolvimento deste trabalho, somente apontar algumas vantagens e desvantagens teóricas do processo AJEDM (que podem ser retificadas ou ratificadas após a conclusão de todos os ensaios), a seguir:

### 3.6.1. Vantagens Teóricas do Processo AJEDM

Seguem as vantagens teóricas do processo AJEDM. Os resultados experimentais podem ou não corroborar essa análise:

- ◆ Não se faz necessário uma segunda operação de usinagem por jateamento (AWJM, WJM ou AJM) após o processo EDM, pois o processo Híbrido remove “constantemente” a camada branca, melhorando substancialmente o acabamento e diminuindo custos no processo.

- ◆ O processo híbrido pode ser até 3 vezes mais rápido que o processo EDM isoladamente, não somente pela aceleração causada pelos impactos das partículas abrasivas, mas também, pela melhoria do sistema de lavagem do material fundido e pelo fato de que pesquisas anteriores mostram que partículas dispersas no fluido melhoram a concentração das descargas elétricas (FERNANDES, 1999).

- ◆ O processo híbrido pode utilizar água deionizada misturada com partículas abrasivas. A água tem a desvantagem de não concentrar as descargas elétricas, o que diminui a eficiência do processo, deixando-o muito lento. A presença do abrasivo diminui consideravelmente esse problema, tornando o processo mais rápido e diminuindo muito os custos com fluidos dielétricos (FERNANDES, 1999).

- ◆ A utilização de água deionizada constitui numa das fontes de economia do processo AEDM, pois os fluidos dielétricos são muito caros e dependendo das condições de operação do equipamento EDM, se degradam rapidamente.

- ◆ Outra vantagem é quanto à saúde do operador, pois pesquisas mostram que ao longo dos anos, o manuseio de fluidos hidrocarbonetos derivados do petróleo pode causar até câncer de pele (ARANTES, 2001).

### 3.6.2. Desvantagens Teóricas do Processo AJEDM

- ◆ As partículas abrasivas podem danificar partes importantes do equipamento EDM, portanto, as máquinas devem estar protegidas e o sistema de filtragem do fluido dielétrico + abrasivo deve ser adequado.

- ◆ A Ferramenta (Cobre) deve ser protegida internamente, provavelmente com algum revestimento, pois mesmo com um ângulo de ataque de 180°, o desgaste pode ser considerável.

## CAPÍTULO 4

### METODOLOGIA

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

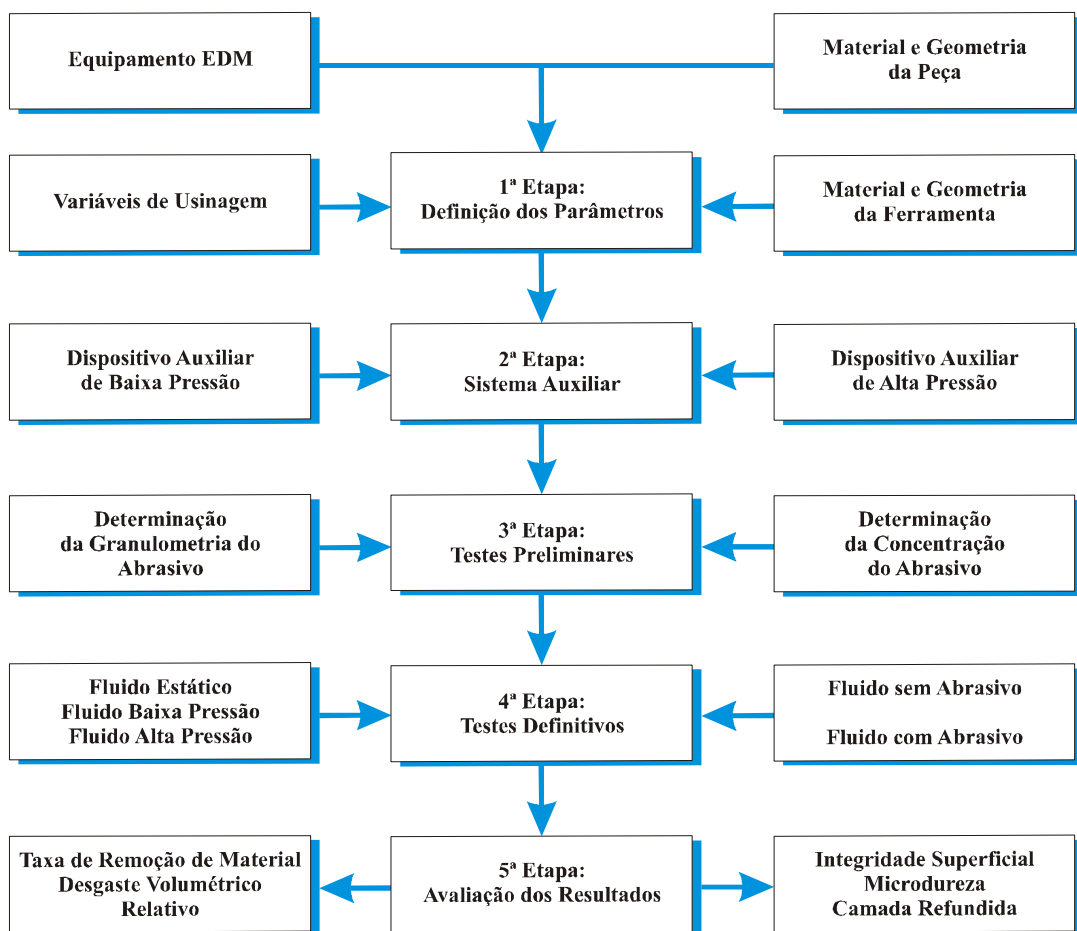


Figura 4.1. Esquema sob diagrama de blocos para a metodologia.

#### 4.1. Definição 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. 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 (1998), equipamentos com controle de pulso comparados com os de um circuito de relaxação apresentam melhor taxa de remoção de material com a grande vantagem de redução do desgaste do eletrodo, para acabamentos 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.

#### 4.1.2. Variáveis de Usinagem

O regime de usinagem utilizado nos ensaios foi de desbaste médio e ferramenta com polaridade positiva. Para cada regime, teoricamente espera-se que qualidades diferentes dos fluidos dielétricos promovam rendimentos diferenciados nas TRMs, RDs e acabamento superficial. Utilizou-se do manual do equipamento para auxílio na determinação das variáveis mais adequadas para essa pesquisa. As variáveis estão detalhadas na Tabela 4.1 a seguir:

Tabela 4.1. Parâmetros empregados nos testes definitivos.

REGIME	$T_{on}$ [ $\mu s$ ]	$D_T$ [%]	$T_S$	Corrente [A]	Tensão [V]
Desbaste	200	70	6	Variável*	Variável*

(\*) Os valores de Corrente e Tensão vão depender dos demais fatores que regem o processo EDM, tais como tipo de fluido dielétrico, sistema de lavagem (estático, jato baixa e alta pressão) e da presença ou não de pó abrasivo, da natureza desse abrasivo e sua concentração.

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 do equipamento EDM, 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 tem-se 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 pode-se visualizar o painel de controle (a) mostrador com os parâmetros de desbaste severo (b).

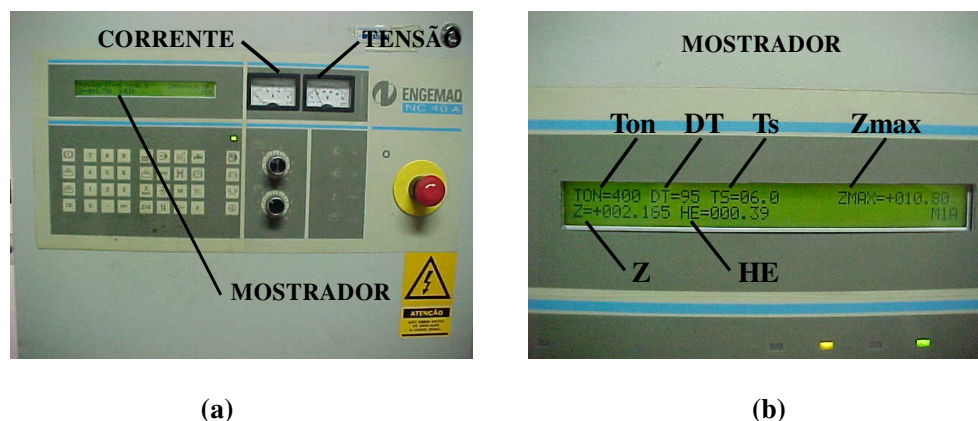


Figura 4.3. (a) Painel de controle e (b) mostrador com parâmetros de desbaste severo, no painel:  $T_{on} = 400$ ;  $DT = 95$ ;  $TS = 6$ ;  $Z = +2.165$ ;  $Z_{max} = +10.00$ ;  $HE = 0.39$ .



#### 4.1.3. Material e Geometria da Peça

O material da peça utilizado nos ensaios foi aço-rápido ABNT M2. A geometria da peça é de uma barra de seção quadrada (10 mm x 10 mm) de 95 mm de comprimento. Na cuba auxiliar são montadas duas dessas barras, uma ao lado da outra, para serem usinadas pela ferramenta cilíndrica, o que gera duas amostras com perfil semi-cilíndrico.

Os aços rápidos recebem esta denominação devido a sua capacidade de reter elevadas durezas (1000 HV ou 65-70 HRC) mesmo se utilizados no corte rápido de materiais (HOYLE, 1988). Além disso, essa característica promove a capacidade de manter durezas elevadas se submetidos a temperaturas de até 600°C, por exemplo, 48 HRC em temperaturas de 593°C (ROBERTS, 1980). Este fato habilita os aços rápidos como matéria-prima para a confecção de ferramentas de corte (tais como fresas, brocas, ferramentas de torneamento, serras e também machos e cossinetes para roscar, alargadores e escariadores), além de matrizes de estampagem, prensagem e forjamento que necessitem de elevada resistência ao desgaste.

A microestrutura desses materiais é composta basicamente por carbonetos primários, cuja principal função é fornecer proteção contra desgaste abrasivo, e uma matriz de martensita revenida reforçada por carbonetos finamente dispersos (precipitados durante o revenido, num processo onde ocorre endurecimento); cuja função é reter os carbonetos primários, mesmo sob as altas temperaturas e tensões cisalhantes criadas na interface entre a aresta de corte das ferramentas e o material que está sendo trabalhado na usinagem.

Os aços rápidos podem ser obtidos convencionalmente – por fusão, lingotamento e trabalho mecânico dos lingotes até a forma de barras, por exemplo – ou ainda por metalurgia do pó, onde o pó de determinada liga é compactado e sinterizado em formas muito próximas das que se deseja obter o produto final, obtendo inclusive uma maior isotropia de propriedades (HOYLE, 1998).

O *American Iron and Steel Institute* (AISI) divide os aços rápidos em duas categorias (BAYER et al, 1990):

- ◆ Aços rápidos ao tungstênio, ou série T, nos quais os principais elementos de liga são, além do próprio tungstênio, cromo, vanádio, cobalto e carbono.

- ◆ Aços rápidos ao molibdênio, ou série M, nos quais os principais elementos de liga são, além do molibdênio, os mesmo já citados para a série T. Essa série ainda apresenta uma subdivisão, classificada como aços rápidos intermediários, as quais apresentam menores

teores de elementos de liga e que são empregados em aplicações onde a resistência ao desgaste dos aços-carbono não é satisfatória e o custo dos aços rápidos é muito elevado, como ferramentas para corte de madeira, por exemplo. 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 (%) (BAYER, 1990).

Carbono	Cromo	Vanádio	Tungstênio	Molibdênio	Ferro
0,83	4,30	1,90	6,40	5,00	81,55

A estrutura do aço rápido ABNT M2 trabalhado, no estado recozido, é constituída de uma dispersão de carbonetos complexos numa matriz ferrítica (WILSON, 1975). Em termos de fração volumétrica, estes carbonetos representam de 25 a 30% do volume total, sendo que aproximadamente 16% seriam do tipo  $M_6C$ , 9% do tipo  $M_{23}C_6$  e 3% do tipo MC. Assim, como em quase todos os tipos de aços rápidos recozidos, tem-se matriz pobre em carbono e elementos formadores de carbonetos (V, W, Mo e Cr).

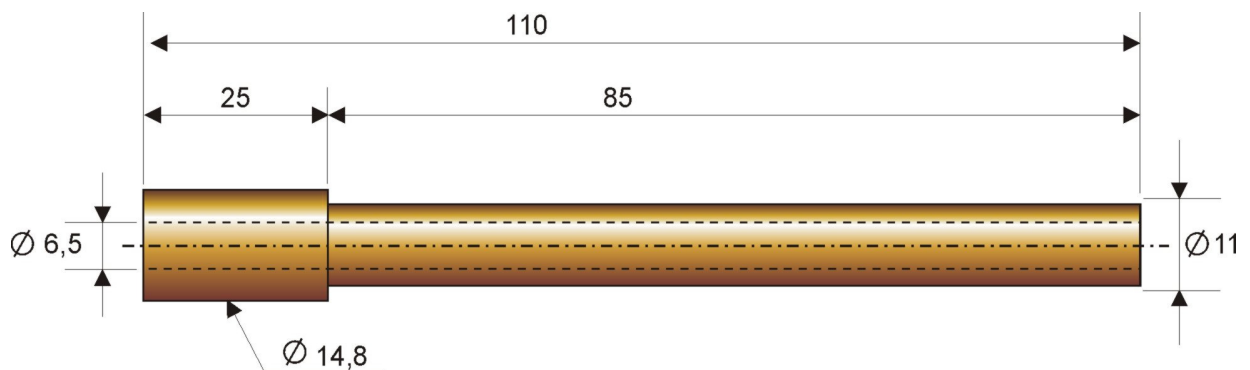
Portanto, os aços rápidos, na condição usual de utilização (temperados e revenidos) apresentam frações consideráveis de carbonetos não dissolvidos durante a austenitização (de fórmulas gerais MC e  $M_6C$ ) que conferem excelente resistência ao desgaste. Tais carbonetos são suportados pela matriz de martensita revenida que têm suas propriedades mecânicas incrementadas pelo fenômeno de endurecimento secundário provocado pela precipitação de carbonetos do tipo MC e  $M_2C$  finamente dispersos na matriz.

#### 4.1.4. Geometria da Ferramenta

A geometria da ferramenta 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 e depende também da área frontal do eletrodo, da pressão de injeção e do grau de contaminação do fluido dielétrico (AMORIM, 2002).

Para compensar o efeito da conicidade, a geometria da extremidade da ferramenta pode possuir 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. É importante lembrar que, a forma na extremidade da ferramenta pode aumentar o fluxo do dielétrico, o que garante melhor taxa de remoção de material. Entretanto, como esse trabalho consiste na utilização de pós de abrasivos com baixa e alta pressão, optou-se pela ferramenta com ponta reta, considerando que a ponta cônica poderia apresentar desgaste muito acentuado, devido à ação erosiva dos grãos abrasivos na superfície interna e externa da ponta da ferramenta, incompatível com os objetivos da



Usinagem por Descargas Elétricas (ZHAO et al, 2002).

Figura 4.4. Geometria da ferramenta de cobre vazada utilizada nos ensaios.

O material empregado na fabricação da ferramenta é o cobre eletrolítico. De acordo com Mohri et al (1991), 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. Outro material muito empregado em EDM é o grafite, que apresenta elevado ponto de fusão como principal vantagem em relação ao cobre. Porém, sua excessiva fragilidade e pior resistividade elétrica restringem sua aplicação. A Tabela 4.3 apresenta as principais propriedades do cobre eletrolítico.

Tabela 4.3. Propriedades físicas e elétricas do cobre eletrolítico (MOHRI et al, 1991).

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 de Baixa Pressão

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) (Figura 4.5). Este dispositivo torna possível a utilização de apenas 40 litros do fluido dielétrico, ao passo que o reservatório da máquina tem capacidade de 600 litros.

São partes do dispositivo auxiliar de baixa pressão: um reservatório para dielétrico com capacidade para 40 litros, uma bomba centrífuga com as características apresentadas na Tabela 4.4 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.

Tabela 4.4. Especificação da Bomba de Baixa Pressão utilizada no sistema auxiliar.

Bomba de Baixa Pressão	
Potência do Motor [Watts]	330
Voltagem [Volts]	220
Pressão [bar]	25
Rotação do Motor [rpm]	1250
Vazão [litros/min]	32,9

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, 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 ímãs que retêm esses resíduos metálicos provenientes processo EDM.

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 à utilização de uma outra bomba no sistema.

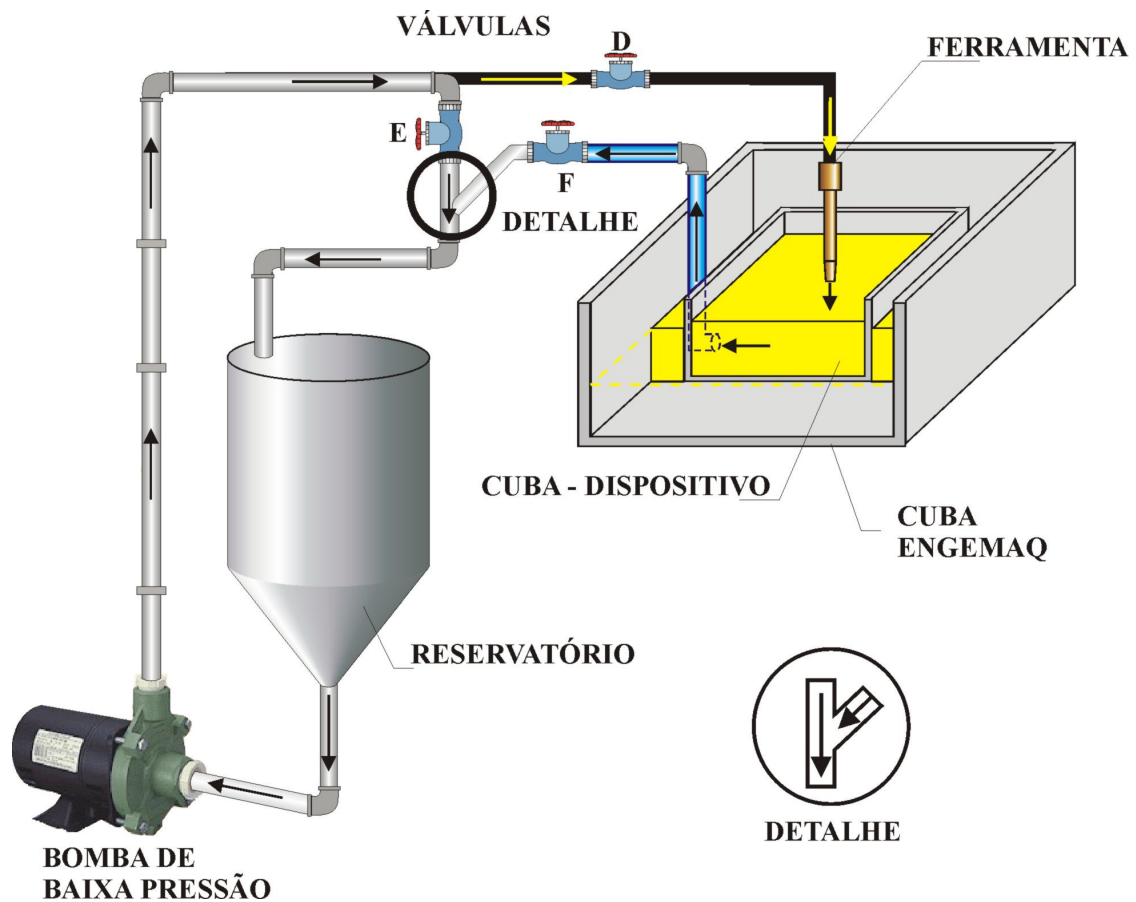


Figura 4.5. Esquema de montagem do dispositivo auxiliar de baixa pressão acoplado ao equipamento EDM.

Na Figura 4.6 encontram-se diferentes vistas da cuba auxiliar montada dentro da cuba do equipamento EDM por penetração. Na Figura 4.6 (a) pode-se ver o posicionamento da cuba auxiliar em relação à cuba da máquina e ferramenta. Na Figura 4.6 (b) a cuba ENGEMAQ encontra-se aberta. As Figuras 4.6 (c) (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.

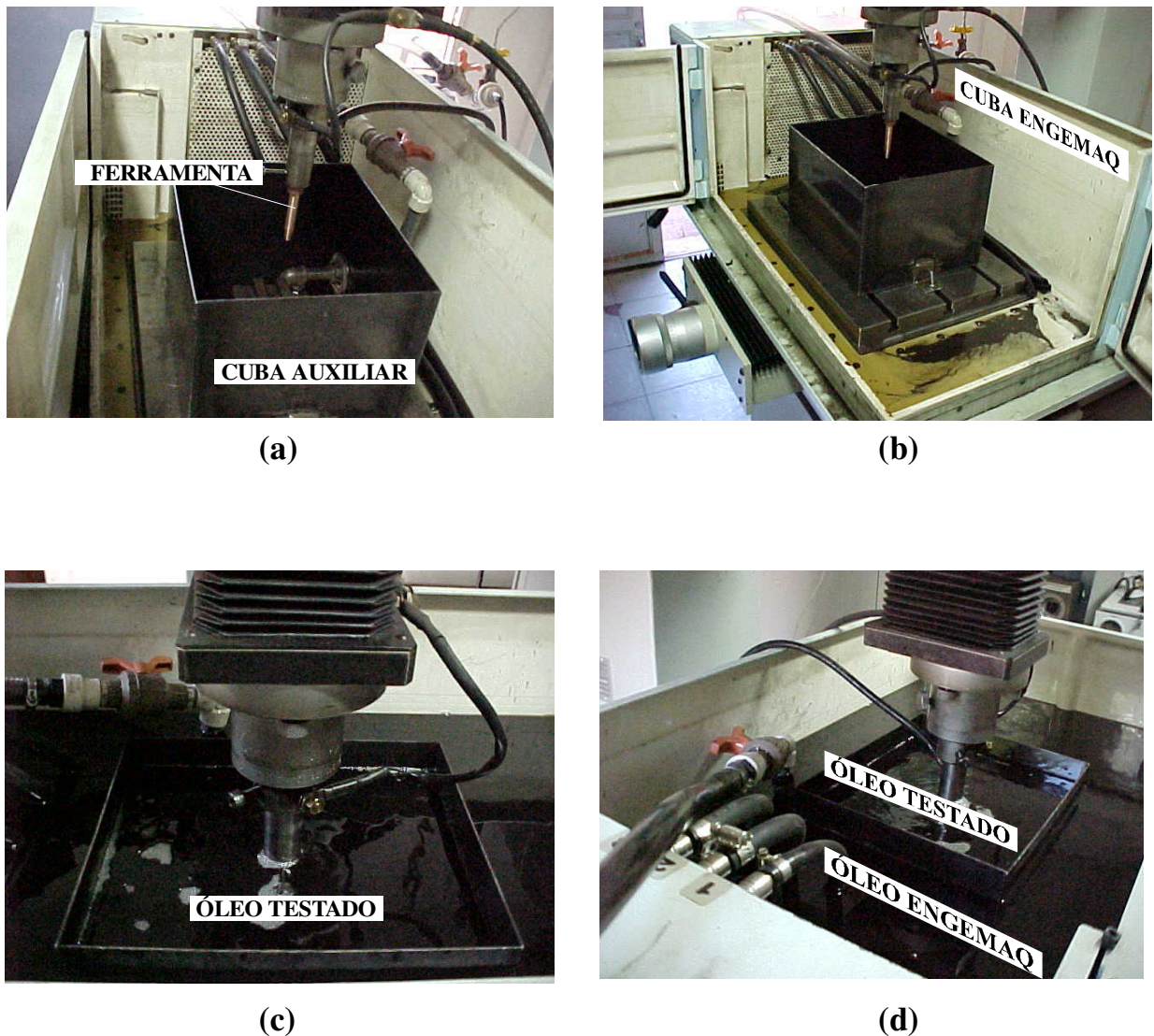


Figura 4.6. Cuba auxiliar montada no interior da cuba do equipamento EDM.

#### 4.2. Dispositivo Auxiliar de Alta Pressão

Sabe-se que um aumento do fluxo do dielétrico promove um aumento da Taxa de Remoção de Material e mudança na Relação de Desgaste e na rugosidade da superfície acabada. Portanto, foi adaptado ao dispositivo auxiliar do LTM (Laboratório de Tribologia e Materiais), uma bomba de alta pressão de 100 bar para injetar fluido dielétrico com alta velocidade, aliando o efeito térmico das descargas com o efeito erosivo do jato com abrasivo (carboneto de silício). O esquema mostrado na Figura 4.7 apresenta as modificações necessárias para passar o sistema auxiliar de baixa pressão para alta pressão. As configurações da Bomba de Alta Pressão encontram-se na Tabela 4.5.