

11011
682
F 3632
TTES/MEC

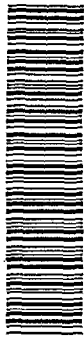
81205

1015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**EFEITO DA ADIÇÃO DE PÓ DE CARBONETO DE SILÍCIO NOS
FLUIDOS DIELÉTRICOS SOBRE O DESEMPENHO DA USINAGEM
POR DESCARGAS ELÉTRICAS DO AÇO-RÁPIDO ABNT M2**

DIRBI/UFU



1000189879

Dissertação apresentada
à Universidade Federal de Uberlândia por:

LUCIANO ANTÔNIO FERNANDES

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

Aprovada por:

- | | |
|------------------------------------|-------------------------|
| Prof. Dr. Claudionor Cruz | - (UFU) – Orientador |
| Prof. Dr. Alberto Arnaldo Raslan | - (UFU) – Co-orientador |
| Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva | - (UFU) |
| Prof. Dr. Fernando Soares Lameiras | - (CDTN) |



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA
Av. João Naves de Ávila 2160 Campus Santa Mônica Uberlândia - MG 38408-100
Fone: 0342394149- FAX: 034 2394282

ALUNO: LUCIANO ANTÔNIO FERNANDES

NÚMERO DE MATRÍCULA: 5972627-7

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação

PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

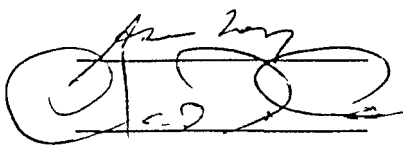
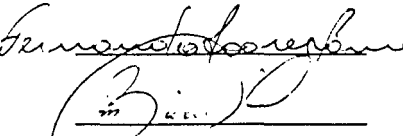
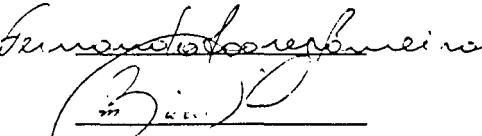
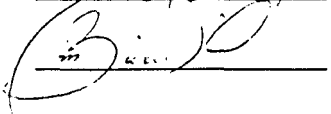
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

Efeito da Adição de Pó de Carboneto de Silício nos Fluidos Dielétricos sobre o Desempenho da Usinagem por Descargas Elétricas do Aço-Rápido ABNT M2

ORIENTADOR: Prof. Dr. Claudionor Cruz

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Alberto Arnaldo Raslan

A Dissertação foi APROVADA em reunião pública, realizada no Anfiteatro da Biblioteca do Campus Santa Mônica, em 21 de dezembro de 1999, as 9 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME	ASSINATURA
Alberto Arnaldo Raslan, Prof. Dr.	UFU 
Claudionor Cruz, Prof. Dr.	UFU 
Fernando Soares Lameiras, Prof. Dr.	CDTN 
Marcio Bacci da Silva, Prof. Dr.	UFU 

Uberlândia, 21 de dezembro de 1999.

A Deus acima de todas as coisas,
cujo nome é Jeová (Sal 83:18),
À minha esposa Alexandra,
ao meu filho Gabriel,
e aos meus queridos pais
Onésimo e Vanda.

AGRADECIMENTOS

- ☞ Ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEEME), à Coordenação do Curso de Pós-graduação, principalmente às pessoas de Álisson Rocha Machado, Márcio Bacci da Silva e Claudionor Cruz, pelo que foi disponibilizado em termos de infra-estrutura;
- ☞ Ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) pela parceria no desenvolvimento da pesquisa, em especial aos professores Alberto Arnaldo Raslan e Sinésio Domingues Franco;
- ☞ Ao órgão financiador da pesquisa, Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES;
- ☞ A LIASA, por meio da pessoa do Eng^o Glênio de Melo Mendonça, no fornecimento do Silício, contribuindo em muito na obtenção dos resultados preliminares para o direcionamento da pesquisa;
- ☞ Aos professores do curso de Pós-graduação pelos conhecimentos ministrados;
- ☞ Aos colegas que fazem parte do grupo de pesquisa do laboratório de usinagem não-tradicional (UÑT): Evaldo Malaquias da Silva, Jean Robert Pereira Rodrigues, João Cirilo da Silva Neto, Carlos Alberto D. Ramos, Gualter Aurélio A. de Souza, Rafael Luís Teixeira e Luciano J. Arantes pelos conhecimentos, apoio e companheirismo demonstrados;
- ☞ A todos os técnicos que apoiaram o desenvolvimento da pesquisa, cada qual nas suas especialidades e mesmo pelas sugestões relevantes, que sem dúvida foram recebidas de bom grado;
- ☞ A Juliana Fernandes e Marcelo Ferreira Motta pelo incentivo na busca de um caminho - que mostrou ser o caminho da pós-graduação;
- ☞ A todos que de algum modo colaboraram para que este trabalho tornasse realidade;

**EFEITO DA ADIÇÃO DE PÓ DE CARBONETO DE SILÍCIO NOS FLUIDOS
DIELÉTRICOS SOBRE O DESEMPENHO DA USINAGEM POR
DESCARGAS ELÉTRICAS DO AÇO-RÁPIDO ABNT M2**

SUMÁRIO

Capítulo 1	Introdução.....	01
Capítulo 2	Considerações gerais sobre o processo EDM convencional.....	05
	2.1 - Princípio do processo.....	09
	2.2 - Textura e integridade superficial das peças usinadas por EDM.....	13
	2.3 - Taxa de remoção de material - TRM.....	19
	2.4 - Relação de desgaste - RD.....	20
	2.5 - Equipamento EDM.....	20
	2.6 - Fluido dielétrico.....	22
	2.7 - Ferramental no processo EDM.....	24
Capítulo 3	Efeitos da adição de pós ao fluido dielétrico no processo EDM.....	26
	3.1 - Interface ferramenta-peça.....	27
	3.2 - Dispersão das descargas e estabilidade do processo.....	29
	3.3 - Aspectos superficiais e área total acabada.....	29
	3.4 - Taxa de remoção de material – TRM.....	33
	3.5 - Relação de desgaste – RD.....	35

Capítulo 4	Procedimento Experimental.....	35
	4.1 – Etapa 1 - Definição de parâmetros.....	38
	4.2 – Etapa 2 - Testes preliminares.....	45
	4.3 – Etapa 3 - Testes definitivos.....	45
	4.4 – Etapa 4 - Avaliação dos resultados.....	47
Capítulo 5	Análise e Discussão dos Resultados.....	51
	5.1 – Taxa de remoção de material - TRM.....	51
	5.2 – Relação de desgaste - RD.....	53
	5.3 – Espessura da camada refundida.....	54
	5.4 – Perfil de microdureza.....	55
Capítulo 6	Conclusão.....	62
Capítulo 7	Referências Bibliográficas.....	65
Anexo	Testes Preliminares.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Operações realizadas pelo processo EDM (Pandey & Shan, 1985).....	05
Figura 2.2:	Esquema dos principais elementos constitutivos de um equipamento EDM a penetração (Benedict, 1987).....	06
Figura 2.3:	Comportamento característico da tensão e corrente em função do tempo, de equipamento EDM com gerador de controle de pulso.....	08
Figura 2.4:	Princípio de funcionamento do processo EDM: formação da descarga e remoção de material (Cruz et al., 1999) e detalhes de um pulso de descarga (Benedict, 1987).....	12
Figura 2.5:	Efeitos superficiais e sub-superficiais (Field et al., 1989).....	13
Figura 2.6:	Superfície de um aço usado para trabalho a quente (AISI H13) usinado por EDM com eletrodo de cobre, com duração de pulso de 400 μ s, ampliada 120 vezes, observada por MEV (Thomson, 1989).....	15
Figura 2.7:	Camadas superficiais e sub-superficiais de uma superfície usinada pelo processo EDM.....	16
Figura 2.8:	Esquema da microestrutura de resolidificação da camada refundida do aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM (A, B e C - denotação de sub-camadas), Lim et al. (1991).....	17
Figura 2.9:	Valores da TRM em função de T_{on} para vários valores da corrente média, empregando ferramenta de cobre-eletrolítico, usinando aço ABNT 1020, (Engemaq, 1996).....	19
Figura 2.10:	Equipamento EDM a penetração, com dispositivo auxiliar de adição de pós ao fluido dielétrico, (Sodick, 1999).....	21
Figura 2.11:	Circuito controle de pulso transistorizado empregado nos atuais equipamentos EDM, (Weller, 1984).....	21
Figura 2.12:	Ferramental empregado em EDM CNC, (Cruz et al., 1999).....	25
Figura 2.13:	Esquema dos principais sistemas de lavagem no processo EDM, (Cruz et al., 1999).....	25
Figura 3.1:	Eficiência do fluido dielétrico (Kurafuji & Suda, 1965).....	26
Figura 3.2:	Mecanismo de propagação de descarga elétrica (Kurafuji & Suda, 1965)	27
Figura 3.3:	Efeito da concentração sobre o comprimento do gap (Narumiya et al., 1989).....	28

Figura 3.4:	Diagrama esquemático do <i>gap</i> , (Okada & Uno, 1997).....	28
Figura 3.5:	Relação entre o <i>gap</i> e a dispersão de descargas, (Kobayashi, 1995)	30
Figura 3.6:	Aspecto superficial e vistas tridimensionais das crateras geradas por uma descarga de um único pulso em aço-carbono - 0,30% de C, SK3 da norma JIS, (Okada & Uno, 1997).....	30
Figura 3.7:	Relação entre a rugosidade superficial média (R_a) e a área usinada (Kobayashi, 1995).....	32
Figura 3.8:	Efeito do tempo de usinagem sobre a rugosidade superficial, em operações de acabamento, (Narumiya et al., 1989).....	33
Figura 3.9:	Queda de tensão nos processos EDM com e sem adição de pó (Jeswani, 1980, com interpretação de Fernandes).....	34
Figura 3.10:	Curvas de TWR em função da concentração da adição, obtidas em regime de usinagem de fino e médio acabamento, (Ming & He, 1995).....	35
Figura 4.1:	Esquema sob diagrama de blocos da metodologia empregada.....	37
Figura 4.2:	Equipamento de eletroerosão a penetração - ENGEMAQ 440NC.....	38
Figura 4.3:	Detalhe final da peça usinada, aço-rápido ABNT M2, por EDM.....	40
Figura 4.4:	Representação esquemática da ferramenta de cobre-eletrolítico.....	41
Figura 4.5:	Sistema de fixação e alguns de seus componentes: 1 - corpo semi-circular não usinado; 2 - pontos de fixação e nivelamento; 3 - bit de aço-rápido ABNT M2; 4 - pontos de fixação do bit; 5 - captador do elemento 1; 6 - base de apoio.....	42
Figura 4.6:	Vista do dispositivo auxiliar de mistura e injeção do FAP (fluido com adição de pó), com seus respectivos componentes.....	43
Figura 4.7:	Dispositivo auxiliar de mistura e injeção do FAP.....	44
Figura 4.8:	Detalhes de como foram executadas as medições da espessura da camada refundida.....	49
Figura 5.1:	TRMs - geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B e C, com e sem adição de SiC.....	51
Figura 5.2:	RDs - geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B e C, com e sem adição de SiC.....	53
Figura 5.3:	Comparação entre as espessuras da camada refundida formadas pelo processo EDM, com e sem adição de SiC, utilizando três fluidos dielétricos comerciais.....	54

Figura 5.4:	Micrografias (a) e (b) obtidas respectivamente por MEV e MO de amostras de aço-rápido ABNT M2 usinadas por EDM com fluido dielétrico B com adição de SiC.....	55
Figura 5.5:	Perfil de microdureza do aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM com fluido dielétrico A sem adição de SiC.....	56
Figura 5.6:	Perfil de microdureza do aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM com fluido dielétrico A com adição de SiC.....	56
Figura 5.7:	Perfil de microdureza do aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM com fluido dielétrico B sem adição de SiC.....	57
Figura 5.8:	Perfil de microdureza do aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM com fluido dielétrico B com adição de SiC.....	57
Figura 5.9:	Perfil de microdureza do aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM com fluido dielétrico C sem adição de SiC.....	58
Figura 5.10:	Perfil de microdureza do aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM com fluido dielétrico C com adição de SiC.....	58
Figura 5.11:	Micrografias (a) e (b) obtidas respectivamente por MO e MEV de amostras de aço-rápido ABNT M2 usinadas por EDM com fluido dielétrico C com adição de SiC.....	59
Figura 5.12:	Impressões de microdureza Vickers, com carga de 50g, em aço-rápido ABNT M2, observada em MO, (fluido dielétrico B, sem adição de SiC).....	59
Figura 5.13:	Ensaio esclerométrico retilíneo, com carga de 50g, em aço-rápido ABNT M2, observado em MO, (fluido dielétrico B, sem adição de SiC).....	60
Figura 8.1:	Teste preliminar para avaliação da adição de pó de Si e SiC comparados ao fluido dielétrico (querosene) sem adição, em termos da TRM e Ra.....	69
Figura 8.2:	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.....	70
Figura 8.3:	Teste preliminar para avaliação do efeito das concentrações do fluido dielétrico (querosene com adição de SiC) em granulometria de 600 mesh, em termos da TRM e Ra.....	71
Figura 8.4:	Esquema de medição do parâmetro Ra: (a) Perspectiva do bit usinado (b) Vista superior, na qual a linha de centro define onde foram realizadas as medições.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Distribuição das camadas de resolidificação em função do regime empregado, da camada refundida, Lim et al. (1991).....	17
Tabela 4.1: Variáveis de corte adotadas para usinagem em regime de desbaste.....	39
Tabela 4.2: Composição do aço-rápido ABNT M2 em (%).....	40
Tabela 4.3: Propriedades físicas e elétricas do cobre-eletrolítico.....	43
Tabela 4.4: Parâmetros definidos nos testes preliminares.....	45
Tabela 4.5: Propriedades químicas dos fluidos dielétricos identificados por seus respectivos fabricantes usados nos ensaios definitivos para usinagem no regime de desbaste do aço-rápido ABNT M2.....	46
Tabela 4.6: Parâmetros empregados nos testes definitivos.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS

Al	- Alumínio;
Cu	- Cobre eletrolítico;
EDM	-Electrical discharge machining;
FAP	- Fluido com adição de pó;
Gr	- Grafite;
LTM	- Laboratório de tribologia e materiais;
MEV	- Microscopia eletrônica de varredura;
MO	- Microscopia ótica;
Óleo A	- Valvoline DNC 03218;
Óleo B	- Querosene desodorizado;
Óleo C	-Tutela Agip-ut 396/EE;
Si	- Silício;
SiC	- Carboneto de silício;
UÑT	- Laboratório de usinagem não tradicional;
UNT	- Usinagem não tradicional
ZAC	- Zona Afetada pelo calor.

LISTA DE SÍMBOLOS

I	- Corrente elétrica [A];
R_a	- Rugosidade média aritmética [μm];
R_D	- Relação de desgaste;
R_q	- Rugosidade média geométrica [μm];
R_t	- Rugosidade total [μm];
R_y	- Rugosidade máxima [μm];
T_{off}	-Tempo inativo de cada descarga [μs];
T_{on}	-Tempo de duração de cada descarga [μs];
TRM	- Taxa de remoção de material [mm^3/min];
TWR	- Tool wear ratio (taxa de desgaste da ferramenta) [mm^3/mm^3];
V	- Tensão elétrica [V].
V_f	- Volume de material gasto da ferramenta [mm^3];
V_p	- Volume de material removido da peça [mm^3];
Δm_f	- Diferença entre a massa inicial e final da ferramenta [g];
Δm_p	- Diferença entre a massa inicial e final do material da peça [g];
γ_f	- Massa específica do material da ferramenta [g/mm^3];
γ_p	- Massa específica do material da peça usinada [g/mm^3];

Fernandes, L. A., 1999, "Efeito da Adição de Pó de Carboneto de Silício nos Fluidos Dielétricos sobre o Desempenho da Usinagem por Descargas Elétricas do Aço-Rápido ABNT M2", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG

Resumo

Como em outros processos de fabricação mecânica, o processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) está sendo alvo de intensas pesquisas no sentido de melhorar tanto a taxa de remoção de material como a relação de desgaste da ferramenta, a qualidade das superfícies usinadas e a acuracidade dimensional e de forma das peças. Uma linha dessas pesquisas diz respeito à adição de pós ao fluido dielétrico. O presente trabalho relata experimentos feitos em moderno equipamento EDM na usinagem de entalhes semi-circulares em aço-rápido ABNT M2 em regime de desbaste. As condições dos experimentos incluem o uso de pós de silício e carboneto de silício, com diferentes granulometrias e concentrações, adicionados a três diferentes fluidos dielétricos comerciais. Além da taxa de remoção de material, foram investigados o desgaste da ferramenta e dois parâmetros relacionados com a qualidade da superfície usinada: a camada refundida e o perfil de microdureza. Os resultados indicam que a adição de SiC é mais benéfica ao processo que a adição de Si nos testes realizados com querosene. Os testes realizados com adição de SiC com granulometria de 15 μ m (600 mesh) na concentração de 30 g/l indicaram os seguintes resultados: melhora significativa na taxa de remoção de material, razoável melhoria na relação de desgaste, redução apreciável na espessura da camada refundida e nenhuma alteração apreciável no perfil de microdureza da superfície usinada em comparação com os testes realizados sem adição de SiC.

Palavras-chave: Usinagem por descargas elétricas; Carboneto de silício; Pó em suspensão; Fluido dielétrico; Espessura da camada refundida; Taxa de remoção de material; Relação de desgaste; Aço-rápido ABNT M2.

x

Fernandes, L. A., 1999, "Effect of the Addition of Silicon Carbide Powder to Dielectrics Fluids in the Performance of Electrical Discharge Machining of ABNT M2 High Speed Steel", Master dissertation, Federal University of Uberlândia, MG.

Abstract

There are some research in Electrical Discharge Machining that sought improvement in the material removal rate, tool wear ratio, quality of machined surfaces, dimensional and geometric accuracy of workpieces. Adding powder to the dielectric fluid can help to achieve these objectives. This work relates experiments carried out in modern EDM machine when rough cutting ABNT M2 high speed steel. Three distinct commercial dielectric fluids, silicon and silicon carbide powder, with several concentrations and grain sizes are used. It was investigated the effects on the material removal rate, tool wear ratio and two parameters related to the surface integrity: recast layer thickness and microhardness profile. The results show that when using kerosene as dielectric fluid, SiC powder gives better results than Si. When adding SiC powder (600 mesh) in a concentration of 30 g/l the followings results are obtained: great improvement in the material removal rate, increasing tool wear ratio, reduction of the recast layer thickness and none appreciable alteration in microhardness profile compared to fluid without powder.

Keyword: Electrical discharge machining; Silicon carbide; addition of powder; Dielectric fluid; recast layer ; Metal removal rate; Wear ratio; ABNT M2 high speed steel.

Capítulo 1

Introdução

Explorar os efeitos tecnológicos dos vários processos de usinagem tem sido uma necessidade imposta a muitos campos da pesquisa, principalmente no que concerne à usinagem não-tradicional. Segundo Benedict (1987), a designação "usinagem não-tradicional" (UNT) é o resultado do emprego de novas ferramentas e de outras formas de energia empregadas no arranque de material além da energia mecânica, como por exemplo a energia elétrica, a química e a térmica ou a combinação delas.

Os processos UNT têm viabilizado a usinagem de novos materiais, quase sempre de baixa usinabilidade e possibilitado a execução de projetos de componentes em formas complexas, além de se adequar às atuais exigências de qualidade da superfície usinada.

Entre esses processos não-tradicionais destaca-se o processo de usinagem por descargas elétricas, a seguir simplesmente referido pela abreviação EDM (do inglês Electrical Discharge Machining), objeto deste trabalho.

Conforme Mohri et al. (1993), o processo EDM é reconhecido, atualmente, como um processo fundamental na produção de matrizes. Tem sido um dos responsáveis pelo grande crescimento econômico japonês até a década de 90, segundo Kobayashi (1995). Este fato justamente se deve ao crescimento da indústria de matrizes, que alavancou outros setores, como por exemplo o automobilístico e o dos equipamentos eletro-eletrônicos. Segundo Lima (1996), a criação de revistas especializadas tais como EDM Today e EDM Digest revelam o interesse pelo processo EDM, tanto pelos meios científicos como industrial. Entre os renomados fabricantes internacionais podem ser citados a Charmilles (Suíça), a Mitsubishi (japonesa) e a AGIE (Alemã). Entre os fabricantes nacionais, destaca-se a empresa Engemaq, tanto com equipamentos EDM por penetração como EDM à fio.

Apesar do grande crescimento verificado nas últimas décadas, o processo EDM ainda é referenciado como um processo que afeta metalurgicamente a superfície e camadas sub-superficiais das peças usinadas, de ter uma limitação no nível de acabamento superficial e por apresentar uma baixa taxa de remoção de material, quando comparado com os processos tradicionais, Kobayashi (1995).

De acordo com as recomendações de alguns pesquisadores como, Sakay (1987), Rhoades (1990), Risko (1990) e Gilmore (1991), as superfícies usinadas por EDM devem ser acabadas por um processo eletroquímico, ultra-som ou fluxo abrasivo, para eliminação da camada refundida, pobre em propriedades mecânicas, e mesmo para melhorar o acabamento superficial, visando a otimização do desempenho das peças submetidas, principalmente, a esforços dinâmicos.

Atualmente, esta recomendação tem sido reavaliada para operações de acabamento e semi-acabamento, embora a recomendação ainda seja aplicável às operações de desbaste. Além disso, esta recomendação é discutível, pois a própria concepção dos meios de produção atuais visam diminuir as operações de fabricação e o número de processos envolvidos. Estes fatores têm sido os impulsionadores da própria evolução que o processo EDM tem experimentado.

É digno de nota que este processo, por se tratar de um dos primeiros a serem estabelecidos na indústria, é também um dos processos em franca evolução pelo que apresenta em potencialidade de corresponder a novas exigências da engenharia de fabricação.

A experiência tem mostrado que o processo EDM tem contribuído consideravelmente na obtenção de peças com boa integridade superficial, principalmente com a adição de pós ao fluido dielétrico. Além disso, esta tecnologia tem apresentado outras vantagens, como melhoria do acabamento e da taxa de remoção de material, além de promover maior estabilidade do processo de geração de descargas pela fonte de alimentação.

Destaca-se a seguir alguns dos trabalhos relacionados com o tema da adição de pós aos fluidos dielétricos, que foram de fundamental importância para elaboração deste trabalho.

Kobayashi (1995) e Narumiya et al. (1989) relatam que a adição de pó de silício e outros ao fluido dielétrico no processo EDM tem sido considerado uma tecnologia altamente promissora para a geração de superfícies finamente acabadas, com ganhos consideráveis na taxa de remoção de material. Jeswani (1980) mostra que a adição de pó de grafite em querosene como fluido dielétrico, é responsável por um aumento na taxa de remoção de material e também na diminuição no desgaste da ferramenta.

Masui et al. (1995), apresentam resultados onde é possível produzir uma camada superficial, em torno de 10 μm , resistente à corrosão e com melhores propriedades tribológicas pela adição de tungstênio, elemento de liga, ao fluido dielétrico.

Mohri et al. (1989), usando vários tipos de pós, como silício (Si), grafite (Gr) e alumínio (Al), mencionam que o uso destes pós ao fluido dielétrico proporciona algum ganho na estabilidade do processo EDM em regimes de acabamento. Mencionam também que tal estabilidade é conseqüência do aumento da interface ferramenta-peça e da maior dispersão de descargas.

Uno & Okada (1997) investigaram a superfície gerada por EDM com o uso de adição de pó pela análise da cratera formada por um simples pulso de descarga. Afirmam que a forma da cratera formada está diretamente relacionada com a distância ferramenta-peça e por consequência do impacto da força das descargas, medida através de um dinamômetro Kistler. Por meio de seus estudos experimentais mostraram que o mecanismo de geração da superfície acabada não é bem compreendido e que é dependente do tipo de pó empregado.

Todos os trabalhos anteriormente mencionados investigaram o efeito da adição de pós ao fluido dielétrico em regimes de acabamento e semi-acabamento. Um dos poucos trabalhos, que se tem conhecimento, de adição de pós ao fluido dielétrico empregando regime de desbaste são o de Wong et al. (1998) e Rodrigues (1999).

Como os trabalhos publicados a respeito da adição de pós no fluido dielétrico, na sua grande maioria, têm se restringido aos regimes de acabamento e semi-acabamento, surgiu a proposta de avaliar tal comportamento no regime de desbaste.

Além do regime de desbaste, o pó de carboneto de silício (SiC) é pouco empregado para estudar os efeitos sobre a taxa de remoção de material (TRM), a relação de desgaste (RD), a camada refundida e o perfil de microdureza da superfície usinada.

O material escolhido para usinagem foi o aço-rápido ABNT M2 por ser um aço-ferramenta de baixa usinabilidade por processos tradicionais e apresentar elevado grau de uniformidade em suas características físicas e estruturais. Os fluidos dielétricos empregados foram o querosene e dois "óleos para eletroerosão" comerciais disponíveis no mercado brasileiro.

Os ensaios foram feitos em moderno equipamento EDM, uma Engemaq 440 NC, implementado por um sistema de mistura e injeção de dielétrico com adição de pós, referido à frente como dispositivo auxiliar, projetado e construído especialmente para este trabalho e para o trabalho de Rodrigues (1999).

Além desta breve introdução, este trabalho compõe-se em mais capítulos, na qual uma revisão bibliográfica é apresentada nos capítulos 2 e 3. O capítulo 2 trata de algumas considerações gerais sobre o processo EDM convencional, ou seja, com fluidos dielétricos sem adição de pós. Ênfases são dadas para o princípio do processo, a textura e integridade das superfícies usinadas e alguns parâmetros do processo tais como, a taxa de remoção de material, relação de desgaste, o equipamento, o ferramental e o fluido dielétrico.

O capítulo 3 aborda alguns efeitos da adição de pós ao fluido dielétrico. Ocupa-se principalmente dos parâmetros de avaliação usados neste trabalho, apresentando alguns resultados de pesquisa sobre o tema, embora poucos deles se apliquem ao uso do regime de desbaste e do pó de SiC.

Na seqüência, capítulo 4, o procedimento experimental é apresentado, enquanto que os resultados e conclusões são apresentados nos capítulos 5 e 6, respectivamente.

As referências bibliográficas estão listadas no capítulo 7, caso haja maior interesse por parte do leitor sobre aspectos específicos abordados neste trabalho. Um anexo também foi incluído e se refere aos testes preliminares usados para definir alguns parâmetros relativos ao tipo de pó a ser empregado nos testes definitivos.

Capítulo 2

Considerações gerais sobre o processo EDM convencional.

A usinagem por descargas elétricas, ou **eletroerosão**, ou ainda, **EDM*** como é mais conhecido, é, dentre todos os processos *não tradicionais de usinagem*, aquele que primeiro se popularizou. Apesar disso, a menção EDM convencional refere-se ao processo EDM sem adição de pó ao fluido dielétrico. A EDM é um processo que permite a usinagem de furos, ranhuras e superfícies, nas formas mais complexas, em materiais condutores elétricos, especialmente aqueles que apresentam alta dureza, que dificilmente seriam produzidos pelos processos tradicionais de usinagem.

Na Figura 2.1 são ilustradas várias operações possíveis com o processo, apenas com a utilização de diferentes movimentos do porta-ferramenta e da mesa. Na referida figura, pode-se observar também a possibilidade de serem utilizados vários tipos de ferramentas.

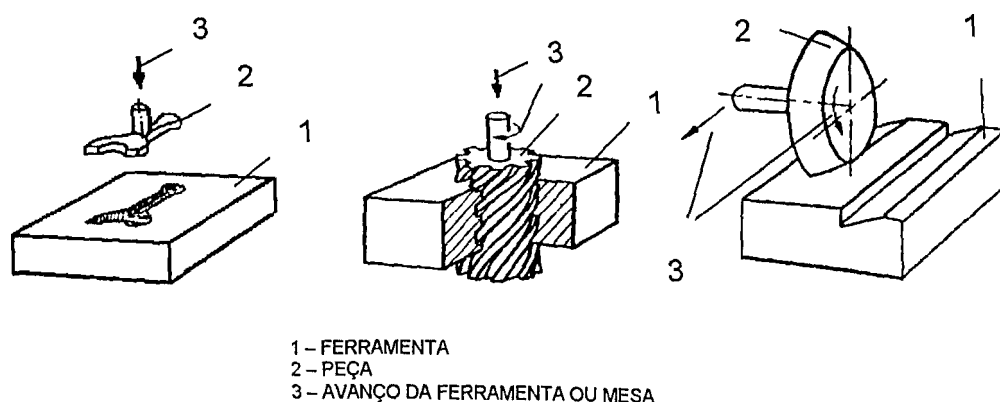


Figura 2.1 - Operações realizadas pelo processo EDM (Pandey & Shan, 1985).

Além disto, a forma final da peça a ser obtida é resultado da combinação dos movimentos da ferramenta como da mesa ou de ambos, tanto no eixo horizontal como no eixo vertical, podendo ainda a ferramenta ter movimento rotativo ou não.

As maiores aplicações do processo EDM estão em atender o setor de ferramentaria em geral e aos processos tradicionais de usinagem. A fabricação de matrizes para estampagem, forjamento, extrusão, fieiras para trefilação, moldes de injeção de plástico, usinagem de materiais de baixa usinabilidade e mesmo na afiação de ferramentas ultra-duras (CBN e PCD) são realizados com sucesso por EDM, geralmente por meio de uma única operação.

* EDM - *Electro Discharge Machining*, em alusão à sigla inglesa internacionalmente consagrada.

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

A Figura 2.2 mostra esquematicamente as partes constitutivas principais de um equipamento EDM por penetração.

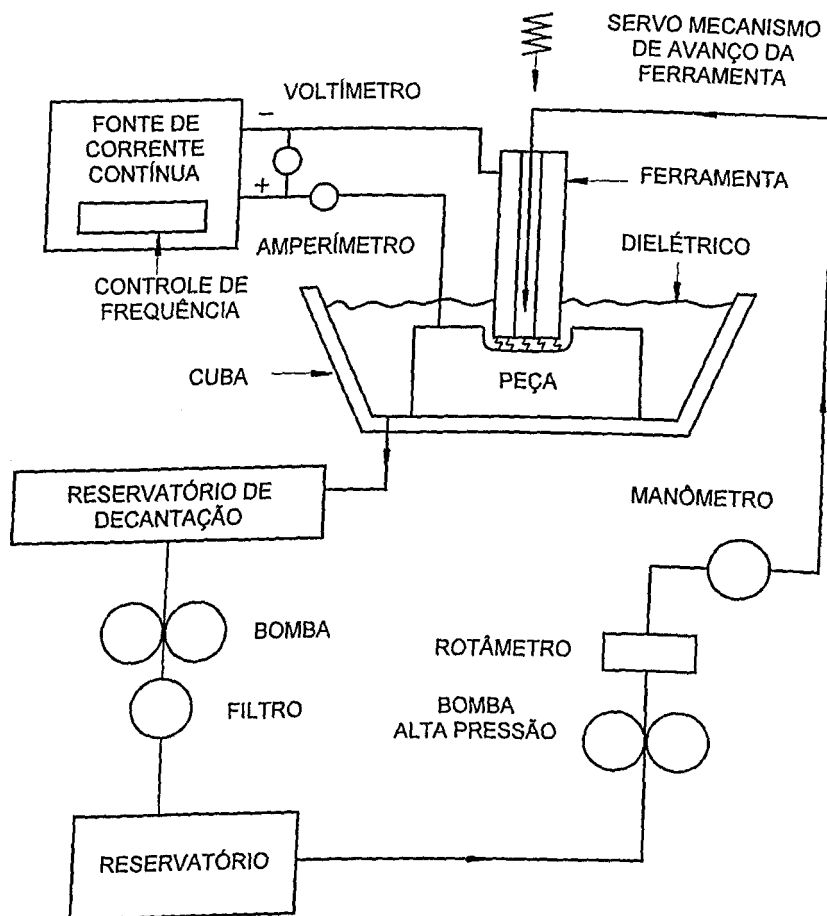


Figura 2.2 - Esquema dos principais elementos constitutivos de um equipamento EDM a penetração (Benedict, 1987).

Pelo esquema da Figura 2.2, nota-se que a ferramenta é colocada próxima à peça a ser usinada, sendo separada desta por uma distância muito pequena, normalmente referida por *gap*, cujos valores típicos acham-se na faixa de 0,01 - 0,05 mm, conforme Benedict (1987).

A distância entre ferramenta-peça é preenchida por um fluido dito dielétrico, bombeado e filtrado de um reservatório até a região de usinagem. O fluido dielétrico tem um papel importante no processo EDM: por refrigerar a região de usinagem, por conduzir as partículas removidas bem como por controlar a potência de abertura da descarga, conforme Fuller et al. (1989). Maiores detalhes serão abordados em tópico relacionado com este assunto.

Outro detalhe importante, mostrado na Figura 2.2, é que normalmente a peça é ligada ao polo positivo e a ferramenta ao polo negativo da fonte, esta ligação é chamada polaridade direta. Neste caso, tem-se um maior arrancamento de material, relativamente menor é o desgaste da ferramenta e pior a qualidade da superfície usinada. Porém, quando o objetivo é obter peças com melhor acabamento superficial, sem se importar com o maior desgaste da ferramenta e a baixa taxa de remoção, inverte-se a polaridade, referida como polaridade inversa. Estes efeitos provenientes da polaridade serão melhor compreendidos em princípios do processo, tópico subsequente a este.

Portanto, as descargas elétricas que ocorrem entre a ferramenta e a peça são as responsáveis pela usinagem. No processo EDM, a descarga prefere a menor distância entre a ferramenta e a peça (Benedict, 1987). Por isso é necessário que o avanço da ferramenta em direção à peça seja controlado por um servo-mecanismo que atue no sentido de manter a distância ferramenta-peça constante. Este avanço é conseguido por meio da fonte através do controle da voltagem entre o par ferramenta-peça. A partir disso, a fonte retorna um sinal para o servo-mecanismo avançar de maneira automática a ferramenta em direção à peça, gerando com isso, a forma negativa da ferramenta na peça usinada. Sem dúvida um meio prático de executar furos e outras formas geométricas complexas desejadas.

A energia de cada descarga é uma função da potência elétrica (tensão x corrente) e da duração do pulso elétrico. Toda energia, de natureza elétrica, é convertida em energia térmica. Uma parcela considerável da energia térmica é consumida para fundir e mesmo vaporizar o material da peça. Portanto, a integral da potência elétrica em relação ao tempo de descarga representa a energia transferida ao processo de usinagem, como apresenta a equação 2.1.

$$E = \int_0^t P \times dt \quad (2.1)$$

Por sua vez, a energia assim calculada define o regime de operação aplicado. Conforme Cruz et al. (1999), para que seja possível o controle desta energia elétrica sob forma de arco voltaico, é preciso que as descargas sejam pulsadas.

Entretanto, se o arco fosse contínuo o resfriamento e, conseqüentemente, a fusão e vaporização da peça seria desordenada. A Figura 2.3 apresenta o comportamento da voltagem e corrente em relação ao tempo de um equipamento EDM com gerador de controle de pulso tal como o equipamento usado na parte experimental deste trabalho.

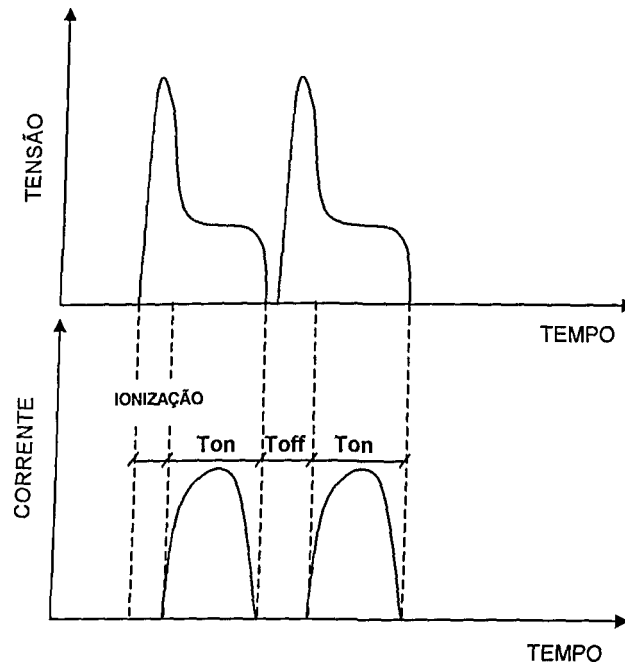


Figura 2.3 - Comportamento característico da tensão e corrente em função do tempo, de um equipamento EDM com gerador de controle de pulso.

Segundo o manual de tecnologia Engemaq (1996), o ciclo de trabalho é dividido em ciclos ativo e inativo, conforme as expressões, 2.2 e 2.3:

$$\text{Ciclo ativo (\%)} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \times 100 \quad (2.2)$$

$$\text{Ciclo inativo (\%)} = 100 - \text{ciclo ativo} \quad (2.3)$$

Onde o período no qual há passagem de corrente é chamado " T_{on} ". Analogamente, durante o período em que não se tem corrente, na interface ferramenta-peça, " T_{off} ". Com relação ainda ao T_{off} , a Figura 2.3 mostra que uma parte considerável deste período deve-se à ionização da interface ferramenta-peça. Estes dois períodos definem a freqüência de aplicação da descarga, expressos através dos ciclo ativo e inativo da descarga dado acima. De forma que a sucessão de aplicação destes ciclos, proporciona a remoção de material, McGeough & Rasmussen (1997).

2.1 – Princípio do Processo

O princípio fundamental é a remoção do material pelo efeito térmico das descargas provenientes da abertura de arco de plasma, ou seja, pela ionização do fluido dielétrico.

Ainda segundo Wick & Drozda (1983), a remoção de material no processo EDM se baseia no efeito erosivo das descargas elétricas que ocorrem entre dois *eletrodos*, um sendo a ferramenta e o outro a peça a ser usinada. Conforme os referidos autores, diversas teorias tem sido desenvolvidas na tentativa de elucidar o complexo fenômeno de remoção de material no processo EDM. Uma destas teorias sugere que, devido ao campo elétrico bastante concentrado, as partículas de material são arrancadas como que por um efeito abrasivo. Este arrancamento de material, segundo propõe esta teoria, baseia-se no fato de que as forças devido ao campo elétrico superam as forças de coesão da rede cristalina do material. Esta teoria negligencia qualquer efeito térmico, além do que, faltam evidências experimentais para dar suporte à mesma.

Outra teoria citada por Wick & Drozda (1983), ao contrário desta, sugere que a remoção de material no processo EDM é atribuída à fusão do material da peça por *flame jets*. Estes chamados *flame jets* são resultantes de vários efeitos elétricos durante a descarga. Porém, esta teoria não concorda com os dados experimentais e falha em dar uma explicação razoável no que diz respeito ao efeito erosivo das descargas.

Conforme mencionado no início deste tópico, a melhor teoria, apoiada pela evidência experimental, sugere que a remoção de material no processo EDM é o resultado de uma alta temperatura gerada por uma alta intensidade de corrente de descarga. Embora esteja bem fundamentada, esta teoria não deve ser considerada como definitiva e completa por causa das dificuldades em sua interpretação (Wick & Drozda, 1983).

Embora existam controvérsias, a interpretação da teoria da descarga, base do complexo mecanismo de remoção de material no processo EDM, pode ser compreendida por dividi-la em etapas distintas. Basicamente são três as etapas comumente referenciadas por muitos pesquisadores tais como Wick & Drozda (1983), McGeough (1988), Rebelo et al. (1997), Cruz et al. (1999). Estas são: (1) iniciação da descarga, (2) fusão e vaporização de material e (3) ejeção de material.

A primeira etapa, conhecida também com *fase preparatória* (Rebelo et al., 1997), desenvolve-se em um intervalo de tempo bem reduzido, de cerca de 10^{-7} a 10^{-8} segundos.

Durante esta fase, um campo elétrico concentrado ioniza o fluido dielétrico que preenche o espaço compreendido entre a ferramenta e a peça.

A consequência desta ionização é a formação de um canal altamente condutivo para a passagem de corrente entre os dois eletrodos.

A fase de ionização tem início quando a rigidez dielétrica do fluido, ou seja, quando a capacidade de resistir à passagem de corrente, é superada. Este canal condutor nada mais do que plasma, submetido a temperaturas da ordem de 3000 a 12000 °C, (McGeough, 1988). Este plasma é constituído por átomos metálicos evaporados de ambos os eletrodos, elétrons e íons positivos emitidos respectivamente do catodo (ferramenta) e anodo (peça).

Estes últimos, elétrons e íons positivos, são formados principalmente pela ação do campo elétrico imposto e por efeito termo-iônico, segundo Thomson (1989). A partir destes, novos elétrons e íons positivos são formados pelas colisões e pelo consequente desbalanceamento elétrico a que ficam sujeitos os átomos neutros do fluido dielétrico. A rápida multiplicação torna-se então uma avalanche de íons positivos e elétrons como é referenciada por pesquisadores como McGeough & Rasmussen (1997).

Conforme comenta McGeough (1988), este canal de plasma tem um diâmetro estimado em torno de 10 µm, com alto fluxo de calor. Em decorrência da energia cinética das partículas que converte em calor após as colisões, principalmente nas superfícies dos eletrodos, a temperatura local se eleva (entre 3000 a 12000 °C como dito anteriormente) superando em muito o ponto de fusão dos materiais da ferramenta e peça. Neste ponto, inicia-se a segunda etapa do processo de remoção de material, na qual ocorre a fusão e a vaporização de pequenas quantidades de material da peça e da ferramenta.

Conforme se depreende do exposto, a ferramenta também se desgasta no processo EDM, tal como ocorre na maioria dos processos de usinagem. Entretanto, na maioria dos casos, este desgaste da ferramenta ou a perda de material é menor quando comparado aos verificados na peça. Geralmente a peça está ligada ao polo positivo, (anodo) e recebe os impactos dos elétrons, ao passo que a ferramenta, ligada ao polo negativo, (catodo) recebe os impactos dos íons positivos. Como está em Cruz et al. (1999), "os íons positivos tem muito menos energia cinética que os elétrons por serem muito menos velozes, com isto transferem uma energia de impacto muito menor à ferramenta e consequentemente menor remoção de material da mesma, em comparação com o material removido da peça que recebe os impactos dos elétrons".

Ainda com relação à segunda etapa, é importante salientar que a descarga é fortemente concentrada, o que resulta em densidades de corrente elevadas, da ordem de 10^4 A mm⁻², (McGeough & Rasmussen, 1997). Em muito isto se deve à pequena secção transversal do canal de plasma e por este estar confinado em pontos estratégicos, ao longo dos picos de irregularidades de toda a superfície do material usinado, que propiciam a formação do campo elétrico com maior facilidade.

Na terceira etapa ocorre a ejeção de material. A abrangência desta etapa tem início durante a segunda etapa e pode prosseguir mesmo depois do fim da descarga, ou seja, no fechamento do circuito elétrico. Descrever a dinâmica desta última etapa tem sido alvo de intensos trabalhos por parte de pesquisadores como Wick & Drozda (1983), Rebelo et al. (1997) e Luo (1998).

Segundo Benedict (1987), ao fim de um pulso elétrico, a descarga e a ação térmica são interrompidos instantaneamente, causando um colapso no canal de plasma. Diferentemente, Thomson (1989) e Rebelo et al. (1997) relatam que o colapso do canal de plasma se deve à alta pressão gerada pelas mudanças termodinâmicas dos materiais de ferramenta e peça bem como do fluido dielétrico. Rebelo et al. (1997) apresentam valores de pressão no interior do canal de plasma como sendo superiores a 10^3 bar.

Rebelo et al. (1997) apresentam duas propostas para descrever o modo de ejeção de material dos eletrodos. Na primeira, uma parte do volume do metal líquido superaquecido entra em ebulição, sendo ejetado sob a forma de vapor e de gotas líquidas, devido ao efeito de expansão do gás. Pela Segunda, o canal de plasma se expande até que sua pressão interna seja tão pequena que, sob o efeito da pressão hidrostática do fluido dielétrico, o volume do canal de plasma diminua. Em consequência deste fato, a frente de fusão do material dos eletrodos decresce e uma parte do material, ainda no estado líquido, é ejetado através do impacto com o fluido dielétrico, adquirindo grande energia cinética durante a implosão. Esta segunda proposta concorda com Benedict (1987), o qual se refere à diminuição do volume do canal de plasma como implosão da bolha.

O material fundido ejetado no fluido dielétrico é formado por pequenas partículas esféricas de diâmetro em torno de 10^{-3} a 10^{-1} mm. Como consequência da ejeção de material fundido há formação de crateras em cada eletrodo. A parte do material fundido não ejetado resolidifica-se na região onde se formou o canal de plasma.

Do exposto acima, ainda não há um consenso a respeito desta terceira etapa, pois, pelo que propõem Rebelo et al. (1997), a ejeção de material não tem qualquer vínculo com os parâmetros elétricos. Porém, estes fatores são a base para as afirmações de Benedict (1987) a respeito de se ocorrer a implosão do canal de plasma e posterior arraste de material por parte do fluido dielétrico. Muito mais genéricos ainda são Wick & Drozda (1983), quando mencionam que nenhum dos fatores podem ser desconsiderados.

Conforme comentado anteriormente, a interpretação da teoria da descarga é algo complexo e ainda assunto de questionamento.

As três etapas anteriormente comentadas constituem todo o processo de remoção de material no processo EDM. Uma visualização do exposto acima é apresentada na Figura 2.4.

Na referida figura estão esquematizados os detalhes da seqüência das três etapas dentro de um pulso elétrico, cuja duração está na faixa de alguns microsegundos a alguns milissegundos.

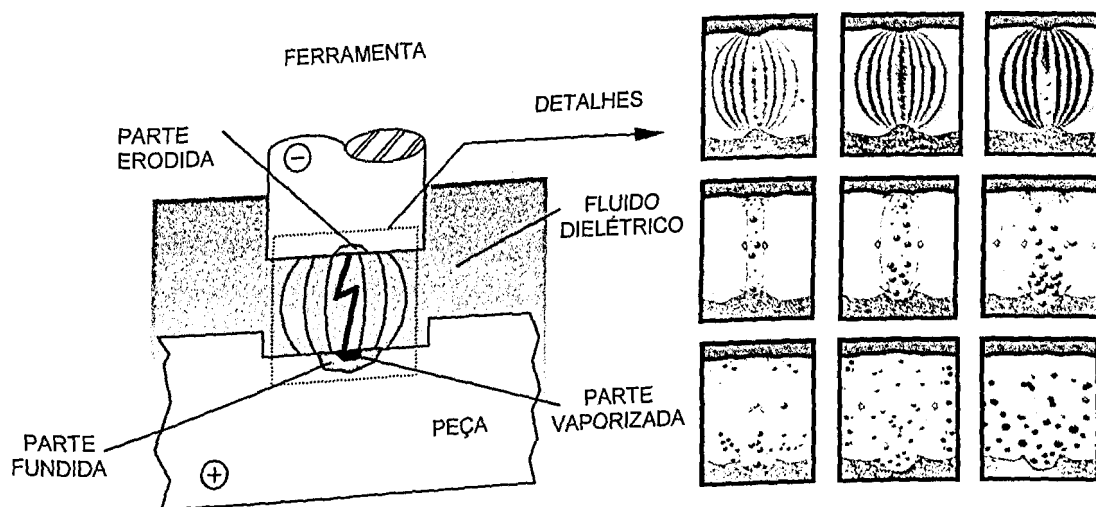


Figura 2. 4 - Princípio de funcionamento do processo EDM: formação da descarga e remoção de material (Cruz et al., 1999), detalhes de um pulso de descarga (Benedict, 1987).

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.

2.2 – Textura e integridade superficial das peças usinadas por EDM.

Conforme Fuller et al. (1989), qualquer processo de remoção de material produz alterações superficiais e sub-superficiais na região usinada. Estas, por sua vez, influem decisivamente no desempenho da peça em trabalho, principalmente aquelas que estão sujeitas a esforços dinâmicos, as que devem resistir a altos esforços estáticos além daquelas expostas a ambientes agressivos.

Essas alterações, em geral, se subdividem em alterações nos aspectos da textura superficial e integridade superficial. A primeira se refere às irregularidades geométricas da superfície e a segunda tem relação com as alterações metalúrgicas superficiais e sub-superficiais da peça usinada.

Diferentes processos produzem diferentes alterações, de acordo com o mecanismo de remoção. Os processos térmicos influenciam bastante nas alterações de fase e nas propriedades delas decorrentes, tais como profundidade endurecida, geração de camadas refundidas e microtrincas. Os processos mecânicos em geral produzem tensões residuais e os processos químicos podem produzir ataques intergranulares.

No caso específico do processo EDM, de acordo com Field et al. (1989), as principais alterações acham-se agrupadas na Figura 2.5. Estas alterações decorrem das altas temperaturas geradas no processo e de possíveis reações químicas que poderão ocorrer na microregião de usinagem.

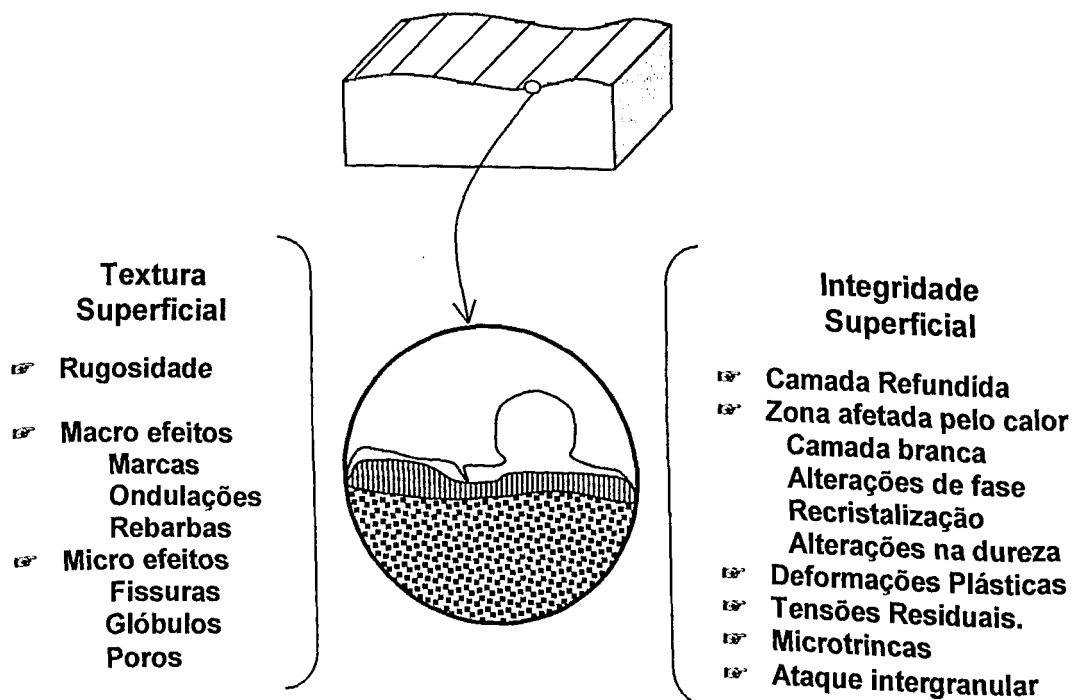


Figura 2.5 - Efeitos superficiais e sub-superficiais (Field et al., 1989).

Embora estes dois aspectos sejam de extrema relevância, maior ênfase é dispensada neste trabalho à camada refundida e a zona afetada pelo calor.

Textura Superficial

Uma característica básica das superfícies usinadas por EDM, observada sem o auxílio de equipamento óptico, é apresentar um acabamento opaco (Lim et al., 1991). A partir de maiores ampliações, a superfície observada apresenta-se repleta de crateras. Este fato deve-se principalmente ao efeito erosivo de cada descarga. Dependendo da energia das descargas, o tamanho da cratera pode variar de 20 a 50 μm em diâmetro e de 10 a 15 μm em profundidade. Estes resultados são similares aos apresentados por McGeough (1988), que utilizou regimes de baixa e alta energia produzindo crateras com diâmetros variando de 12,5 a 60 μm e profundidades entre 2,5 a 12 μm , respectivamente. Conforme Mamalis et al. (1987), a forma e o volume de uma cratera não está somente relacionada com o regime de usinagem mas também com a textura prévia da superfície a ser usinada. Thomson (1989) menciona que o volume das crateras depende não somente da energia do pulso de corrente empregada mas também das propriedades térmicas do material da peça.

De acordo com McGeough (1988), o material fundido resolidifica-se em pequenas esferas e seus diâmetros estão na faixa de 2 a 100 μm , formando uma superfície rugosa. As características da superfície obtida são, sobreposição de crateras, glóbulos de impurezas, e bolhas (formadas quando os gases presos se liberam através do material resolidificado), são reveladas através de uma análise por microscopia eletrônica de varredura.

A Figura 2.6 mostra como se apresenta a topografia da superfície usinada por EDM, evidenciando principalmente as formações globulares redepositadas. Um dado relevante mencionado por Lee et al. (1990) é que ao fim de uma descarga e erosão somente entre 10 a 15% de todo o material fundido é removido, enquanto que o restante permanece, resolidificando-se na forma de glóbulos e de uma camada refundida.

Segundo Fuller et al. (1989), o processo EDM apresenta valores de R_a (rugosidade média aritmética) na faixa de 0,2 a 12,5 μm .

A rugosidade da superfície usinada pelo processo EDM tende a diminuir, com o acréscimo da frequência e com a redução da corrente, para valores entre 0,05 a 0,1 μm , McGeough (1988). Além disso, comenta que o tamanho da cratera varia com a energia de descarga que por sua vez é função do regime de usinagem empregado.

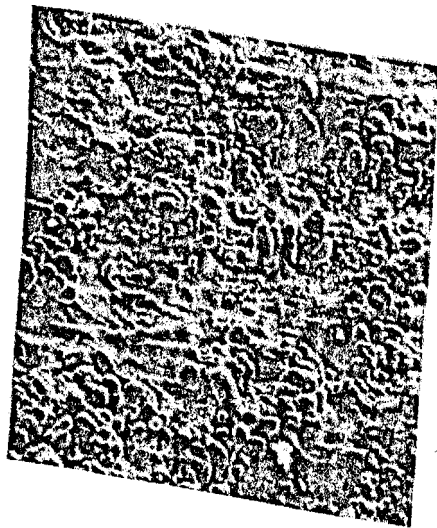


Figura 2.6 – Superfície de um aço usado para trabalho a quente (AISI H13) usinado por EDM com eletrodo de cobre, com duração de pulso de $400\mu\text{s}$, ampliada 120 vezes, observada por MEV, (Thomson, 1989).

A formação dessas crateras sofre influência também do fluido dielétrico empregado e do material do eletrodo (Thomson, 1989). De acordo com Field et al. (1989), outra característica importante de uma superfície usinada pelo processo EDM é que a mesma não apresenta marcas que denotam a direção de avanço da ferramenta, como se pode notar naquelas superfícies originadas por processos de usinagem convencional.

Integridade Superficial

De acordo com Pandey & Shan (1985), em decorrência do fato de a remoção de material no processo EDM ser um fenômeno térmico, com temperatura localizada variando de 8.000 a 12.000 °C, a usinagem por este processo trará conseqüências à estrutura e propriedades mecânicas da peça usinada.

Segundo Field et al (1989), as alterações metalúrgicas produzidas por condições abusivas de remoção de material, ou seja, alta energia de descarga, tem menores efeitos sobre as propriedades mecânicas do material quando este é solicitado estaticamente. Porém, a principal exceção a este fato tem sido um decréscimo da ductilidade e do limite de resistência à tração para materiais que sofreram um subsequente tratamento térmico de alívio de tensões. Constata-se que o carbono depositado na superfície usinada por EDM difundiu-se através dos contornos de grãos durante o alívio de tensões, causando uma precipitação de carbonetos nestas regiões, responsável pela redução da ductilidade e do limite de resistência.

Conforme Thomson (1989), a maior fonte deste carbono provém da pirólise do fluido dielétrico mais até que das ferramentas de grafite (Gr). Essencialmente quase todo o carbono fica confinado na camada refundida.

Segundo Miller & Guha (1999), os efeitos metalúrgicos no aço-ferramenta deixam claro que, à medida em que a temperatura se eleva e ocorre a ação erosiva, a superfície sofre fusão e transformação de fase. Em conseqüência desses fenômenos, pode-se observar o surgimento de tensões residuais e formação de trincas, além da formação de três camadas distintas.

A Figura 2.7 ilustra as três principais camadas geradas no processo EDM, melhor vistas quando se emprega um regime de alta energia de descarga, ou seja, um regime de desbaste.

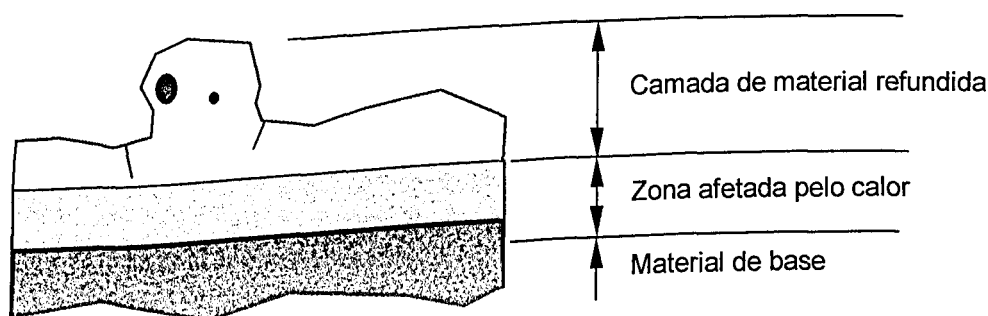


Figura 2.7 - Camadas superficiais e sub-superficiais de uma superfície usinada pelo processo EDM.

Ainda segundo Miller & Guha (1999), a primeira camada é uma camada refundida, cuja microestrutura é constituída a partir de uma mistura de austenita, cementita ou carbonetos. Esta camada também apresenta variações de composição química. Principalmente a presença de carbono é notória, pois esta é influenciada pelo meio dielétrico a principio e em segundo plano pelos eletrodos de grafite. Segundo os referidos autores, a dureza da camada refundida é uma variante do tipo de material processado. Segundo Lima & Cruz (1998), esta primeira camada de material apresenta-se de duas formas, uma de glóbulos salpicados, discretamente distribuídos sobre toda a superfície e outra na forma de uma camada, de espessura uniforme. Entretanto, o referido autor menciona que esta primeira camada não está presente na superfície de uma peça usinada em operações de baixa energia.

Conforme Lim et al. (1991), a maioria dos glóbulos produzidos pelo processo EDM são parte integral da camada refundida, nota-se ainda que estes não são removidos mesmo com ataque químico. Uma pequena porção destes glóbulos, porém, não está aderida à camada refundida de modo tão coeso, provavelmente, isto se deve ao produto formado da pirólise do dielétrico.

Um estudo microestrutural detalhado da solidificação da camada refundida do aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM, feito por Lim et al. (1991), ainda apresenta três distintas sub-camadas, conforme a Figura 2.8. A solidificação da camada superior A é influenciada pela interface com o fluido dielétrico e o metal fundido que se constitui na camada B. A camada inferior C tem influência também da camada intermediária B e do material base. Apesar desta definição, não é nítida a transição de uma camada para outra. Além disso, é significativa uma variação na espessura destas camadas, de posição para posição.

As camadas A e C são, na maior parte, de natureza dendrítica e, em alguns pontos onde a espessura é menor, apresenta-se sem características, por ser bastante atacada. A camada B consiste de uma estrutura de ledeburita e ocasionais dendritas. Estas variações são em partes devidas a uma micro-segregação associada a um resfriamento rápido.

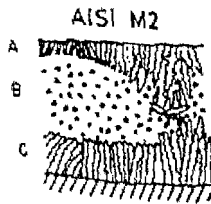


Figura 2.8 - Esquema da microestrutura de resolidificação da camada refundida do aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM (A, B e C - denotação de sub-camadas), Lim et al. (1991).

Outro fator que afeta a distribuição destas camadas é a energia da descarga, em outras palavras, o regime de trabalho empregado. A tabela 2.1 mostra a distribuição percentual de cada camada em função do regime de usinagem empregado.

Tabela 2.1 - Distribuição das camadas de resolidificação, em função do regime empregado, da camada refundida (Lim et al., 1991).

Energia Empregada	Percentual de ocorrência		
	camada (A)	camada (B)	camada (C)
Alta	70	20	10
Intermediária	50	20	30
Baixa	10	...	90

A segunda camada denomina-se zona afetada pelo calor, que divide-se em, uma camada retemperada e revenida. A primeira camada, retemperada, tem sido referida assim pois, a sua estrutura foi austenitizada e em seguida resfriada rapidamente, formando-se uma camada dura e frágil de martensita que talvez contenha alguma fração de austenita retida. A dureza desta camada é parecida com a do aço ferramenta no estado temperado.

A segunda camada é chamada de revenida, pois é submetida a temperaturas suficientes para manter o material aquecido e reduzir a sua dureza, que deve ser menor do que a do metal de base. A espessura das camadas bem como os níveis de tensões residuais e a formação de trincas presentes no material são funções de diversas variáveis, incluindo o tipo de processo EDM, tempo de aplicação do pulso de descarga, energia do pulso, tipo e condição do material, geometria da peça e tipo do meio dielétrico.

Conforme Field et al. (1989), em operações de acabamento a espessura da ZAC é da ordem de 0,01mm, enquanto que para operações de desbaste essa espessura é da ordem de 0,13mm. Porém, estes valores são dependentes da ação refrigerante do fluido dielétrico.

Em suma, para as ligas à base ferro (Fe), Lim et al (1991) comentam que é possível, dependendo das condições de usinagem e de reagentes adequados, observar todo tipo de estrutura do diagrama de fase ferro-carbono (Fe-C) ao longo da camada refundida e zona afetada pelo calor.

2.3 - Taxa de remoção de material - TRM.

Expressões empíricas para TRM tais como as apresentadas por Weller (1984), Bhattacharyya (1973), Pandey & Shan (1985) e Mamalis et al. (1987) dão um bom indicativo, qualitativo, do comportamento deste importante parâmetro no processo EDM, mas não se pode dizer o mesmo quanto aos resultados quantitativos. Segundo McGeough & Rasmussen, (1997), 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, sendo estes fornecidos em manuais de fabricantes de equipamento EDM, como resultados de pesquisas específicas, utilizando seus equipamentos. Um exemplo é o que consta da Figura 2.9, extraída do manual do equipamento Engemaq utilizado nos experimentos expostos no capítulo 4.

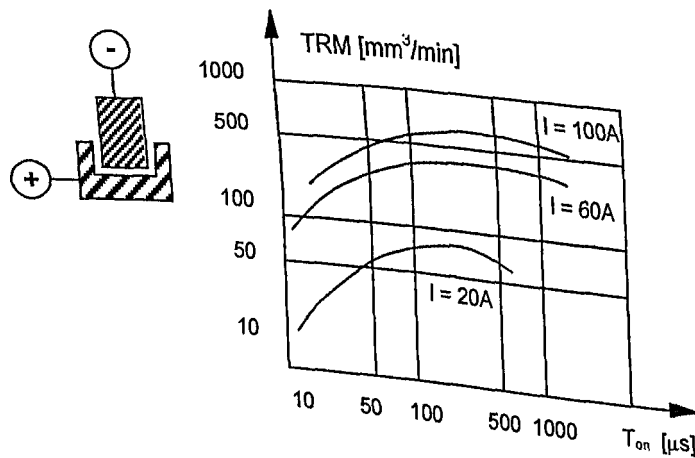


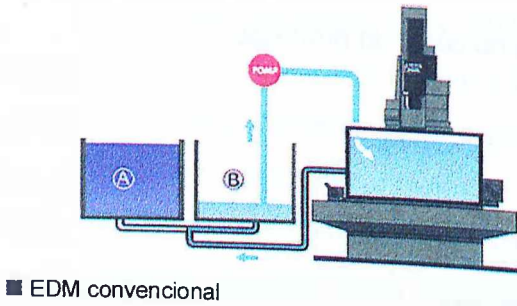
Figura 2.9 - Valores da TRM em função de T_{on} para vários valores da corrente média empregando, ferramenta de cobre-eletrolítico, usinando aço ABNT 1020 (Engemaq, 1996).

É de conhecimento geral que a TRM depende de uma série extensa de parâmetros. Entre esses destacam-se:

- ☛ as propriedades do material da peça, incluindo o ponto de fusão e calor latente,
- ☛ as propriedades do material da ferramenta, até mesmo os fatores geométricos,
- ☛ as condições de usinagem, dadas principalmente pelo par V e I
- ☛ as características elétricas da forma do pulso de descarga usadas, tais como, T_{on} , T_{off} ,
- ☛ sistema de lavagem (sucção, injeção - ambos através da peça ou ferramenta - e jateamento externo, de acordo com a Figura 2.13),
- ☛ natureza do gap (estático ou pulsante),
- ☛ fluido dielétrico (propriedades elétricas e térmicas, adição de pós ...)

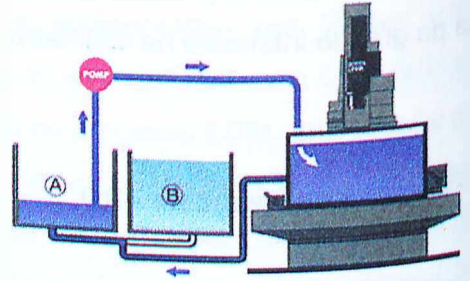
00833/00

- (A) Dielétrico com adição de pó
- (B) Dielétrico convencional



■ EDM convencional

- (A) Dielétrico com adição de pó
- (B) Dielétrico convencional



■ EDM com adição de pós ao fluido dielétrico

Figura 2. 10 - Equipamento EDM a penetração, com dispositivo auxiliar de adição de pós ao fluido dielétrico (Sodick, 1999).

Atualmente as fontes de potência, controladas eletronicamente, exercem um maior controle sobre vários parâmetros e com uma sensibilidade sem comparação. Por exemplo, o controle das descargas é definido por inúmeras combinações entre os ciclos T_{on} e T_{off} , do par V e I , do sistema de lavagem empregado e de várias outras que se poderia mencionar. Um equipamento destes emprega um circuito de pulso de descargas por meio de transistores como é ilustrado esquematicamente na Figura 2.11.

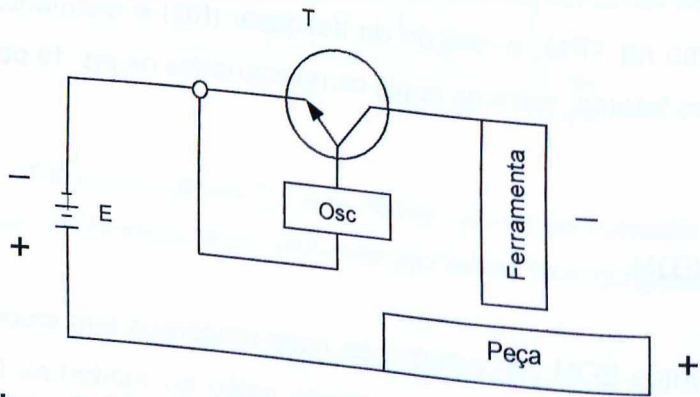


Figura 2.11 - Circuito de controle de pulso transistorizado empregado nos atuais equipamentos EDM (Weller, 1984).

Um oscilador de frequência mostrado na Figura 2.11 controla o fluxo de corrente, sendo um componente de segurança em casos de curto-circuito na região entre a ferramenta e a peça. Basicamente, este circuito funciona à baixas tensões e altas correntes. A vantagem de um equipamento deste tipo é eliminar os curtos-circuitos, proporcionar maiores taxas de remoção de material aliado a menores desgastes de ferramenta, muito superiores aos circuitos de relaxação. No entanto, estes últimos são um bom recurso em operações de acabamento, apresentando melhores resultados de acabamento superficial do que os de controle de pulso.

Tanto isto é verdade, que os modernos equipamentos EDM a penetração com cor de pulso são implementados com um circuito de relaxação auxiliar para esta finalidade (McGegough, 1989).

O comando numérico permite a realização de peças com alto grau de complexidade e estas podem ser executadas independentemente de se ter uma ferramenta também complexa e a utilização de outros processos para fabricar tal ferramenta, pois a ferramenta se resume a uma fina haste de extremidade esférica (tal como é apresentada na Figura 2.12, pg. 25, sobre o tópico, ferramental no processo EDM).

O controle adaptativo tem um papel importante, como os demais, de aumentar a eficiência do processo EDM. Este independe das condições pré-definidas, de forma que as compensações de desgaste de ferramenta, sensibilidade a peças compostas de diferentes tipos de materiais, condições da interface ferramenta-peça e outros podem ser controladas em tempos mínimos com respostas imediatas.

2.6 - Fluido dielétrico

Conforme Fuller et al. (1989), o fluido dielétrico tem um papel fundamental no processo, por controlar a potência de abertura da descarga. O referido fluido pode ser o querosene, hidrocarbono aditivado - ambos derivados do petróleo - a água desionizada e até mesmo certas soluções aquosas. Ele exerce duas outras importantes funções no processo: promovem a lavagem da interface ferramenta-peça (gap), arrastando para fora as partículas erodidas e auxiliam no arrefecimento do sistema, nas vizinhanças das descargas.

Benedict (1987) diz que das três funções, a primordial para eficiência do processo é a lavagem dos produtos gerados do corte. O objetivo é evitar curtos circuitos e ou uma baixa taxa de remoção pela estagnação do fluido dielétrico. Segundo o manual da Engemaq (1996), 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.

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

- ☛ Rigidez dielétrica;
- ☛ Tempo de desionização;
- ☛ Viscosidade;
- ☛ Calor específico;

- Condutividade térmica;
- Ponto de ebulição;
- Ponto de fulgor;
- Perigo à saúde.

Maior rigidez dielétrica implica em menor distância entre ferramenta-peça, com a conseqüente maior precisão da usinagem. Um dos fatores que implicam em altas TRMs é o tempo de desionização. Este refere-se ao tempo para ions e elétrons se recombinarem depois de uma descarga. Quanto menor é o tempo de desionização, menor é o tempo (T_{off}) necessário entre os pulsos subsequentes. Esta característica faz com que se evitem condições de arco.

Alta viscosidade prejudica a expulsão dos produtos da erosão da interface ferramenta-peça. Para pulsos de pequena energia é aconselhável uma baixa viscosidade, mas para pulsos de alta energia são produzidas partículas erodidas maiores e uma viscosidade superior do dielétrico é recomendada para maior eficiência do processo. Baixa viscosidade é recomendada também no caso onde se requeiram boa precisão dimensional e em usinagem de acabamento onde se necessita que o fluido circule com facilidade por folgas e orifícios diminutos.

Quanto maior o calor específico, mais energia térmica pode acumular sem grande aumento na temperatura. Quanto maior a condutividade térmica do fluido dielétrico, menor é o tempo necessário para solidificar e refrigerar as gotas de metal expelidas da zona de erosão. Isto reduz a possibilidade de partículas se aderirem ao eletrodo ou repositarem na superfície da peça. Estas duas características aliadas dão alta capacidade de refrigeração, preservando a integridade da estrutura metalúrgica do material da peça durante a operação.

Quanto maior o ponto de ebulição do dielétrico, mais estável se mantém o fluido em temperaturas elevadas sem perder suas propriedades originais, perdendo menos frações de componentes pela evaporação seletiva das frações mais voláteis. Quanto menos o fluido dielétrico puder absorver os produtos gasosos da erosão ou dissolver seus produtos sólidos, por 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.

Além das referidas propriedades são exigidas ainda do fluido dielétrico características tais como alto ponto de fulgor, dando maior segurança operacional diminuindo os riscos de incêndios e mesmo no manuseio e estocagem. Ser quimicamente neutro, para evitar a corrosão de partes constitutivas da máquina, como a pintura e tubulações de borracha, bem como não agredir a pele do operador.

Devido aos fatores de proteção ambiental, tem crescido a aplicação de soluções aquosas.

Segundo König & Siebers (1998), a maior parte do gás produzido com estes tipos de fluido é vapor de água, que é invisível e, mais importante, não é prejudicial à saúde e não causa problemas ambientais. Particularmente na faixa extrema de desgaste, a substituição por um meio aquoso pode trazer uma contribuição eficiente para melhorar as condições no local de trabalho.

Além disso, König & Siebers (1998) mostram que os aumentos na taxa de remoção podem ser bastante superiores quando comparados com os fluidos dielétricos à base de óleo, confirmados em testes práticos na usinagem de matrizes de forjamento e de matrizes para fundição sob pressão. Uma explicação para tal fato reside no efeito de um resfriamento mais pronunciado e por possuírem maior estabilidade térmica, sendo possível aplicar correntes altas mesmo em áreas pequenas. Os referidos autores também concluíram que por proporcionar menor produção de gás no canal de plasma, torna-se mais concentrada a energia do processo, com a conseqüente melhoria na TRM.

As considerações acima ressaltam a importância do fluido dielétrico no desempenho do processo EDM. Além de fluido dielétricos à base de água, outra estratégia importante atualmente em estudo para melhorar a eficiência do processo EDM tem sido a adição de pós de diferentes naturezas aos mesmos. Devido à sua importância este trabalho procurou o seu estudo mais detalhado, conforme está no capítulo 3 seguinte.

2.7 - Ferramental no processo EDM.

Entende-se por ferramental o conjunto que engloba a geometria da ferramenta, o sistema de fixação da peça e o sistema de lavagem (Cruz et al., 1999).

Em geral, a ferramenta propriamente dita, construída em cobre, grafite e outros materiais condutores menos usuais, é projetada de acordo com a geometria da cavidade que se quer produzir. Evidentemente que devem ser consideradas as tolerâncias dimensionais para compensar o sobre-corte lateral e também detalhes para compensar a conicidade e facilitar o sistema de lavagem. Este, de acordo com a Figura 2.13, pode ser por injeção, sucção ou jateamento, (Cruz et al., 1999).

O projetista do ferramental deve pensar no todo, tanto para o aspecto de usinagem mais rápida quanto para a consecução do nível de acabamento e acuracidade de forma desejadas. Por exemplo, se uma ferramenta tubular for usada para execução de furos passantes, não se faz necessário erodir toda a seção transversal do material correspondente ao diâmetro da ferramenta, mas somente a área delimitada pela espessura da ferramenta tubular.

Desta forma, a operação de usinagem se torna mais rápida pois o volume de material efetivamente removido será menor ao fim da operação.

O próprio dispositivo de fixação deve ser projetado para facilitar não apenas a boa fixação da peça a ser usinada, mas também proporcionar boa lavagem e facilidade de troca de peça. Atualmente, com o advento das máquinas CNC, as ferramentas se restringem a uma fina haste com extremidade esférica, conforme Figura 2.12. Com métodos computacionais, são possíveis traçar trajetórias definidas, o que viabiliza obter superfícies complexas. Isto favorece o processo EDM, pela dificuldade de fabricar ferramentas com geometrias não convencionais, que com o decorrer da usinagem requerem novas correções de forma.

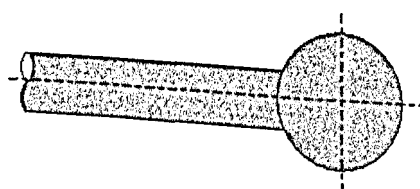


Figura 2.12 - Ferramental empregado em EDM CNC (Cruz et al., 1999).

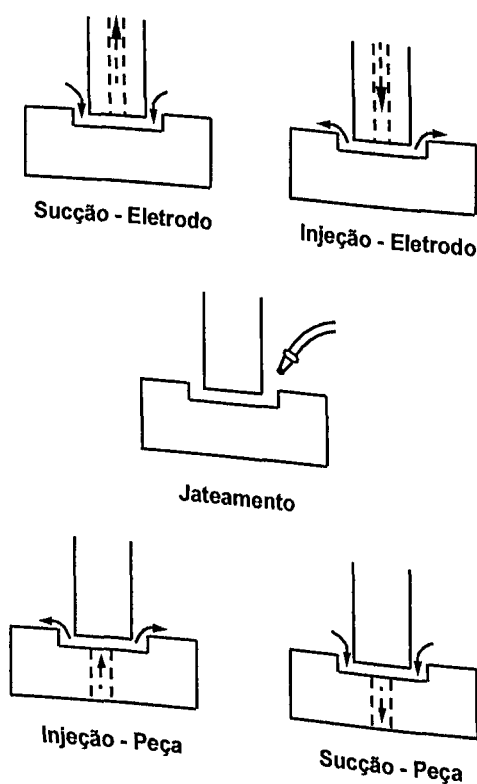


Figura 2.13 - Esquema dos principais sistemas de lavagem no processo EDM (Cruz et al., 1999).

Capítulo 3

Efeitos da adição de pó ao fluido dielétrico no processo EDM.

Apresentam-se neste capítulo características específicas relacionadas com adição de pó ao fluido dielétrico. Contudo, uma breve abordagem introdutória será feita com o propósito de situar esta tecnologia que, segundo Kobayashi (1995), tem sido referida como uma nova tecnologia.

O primeiro passo da tecnologia de adição de pó ao fluido dielétrico veio de forma indireta, através do estudo de Kurafuji & Suda (1965). Estes pesquisadores analisavam a influência dos vários fluidos dielétricos na taxa de remoção de material. Os referidos pesquisadores perceberam um efeito importante no qual o tempo de uso de um dielétrico fazia aumentar a TRM. Concluíram que a concentração dos resíduos formados promovia o aumento na TRM. Esta conclusão inicial conduziu a uma outra mais importante e que levaria a pesquisa futuras sobre a adição de pó ao fluido dielétrico. A Figura 3.1, extraída do referido trabalho, apresenta a TRM em função da concentração dos resíduos que aumentaram em função do tempo de uso do fluido dielétrico (querosene, no caso).

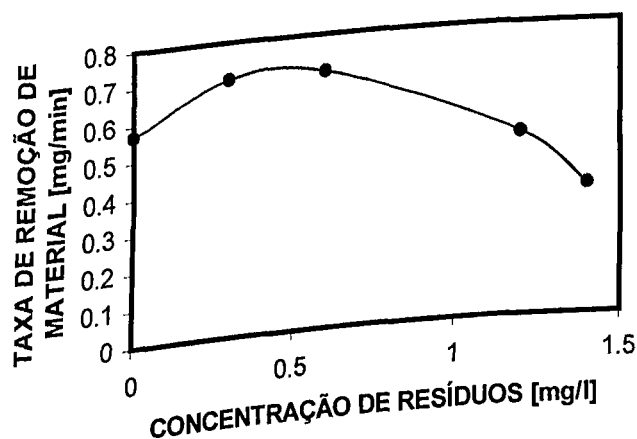


Figura 3.1 – Eficiência do fluido dielétrico (Kurajufi & Suda, 1965).

Analisando-se a Figura 3.1, tem-se que a máxima TRM alcançada se dá para uma determinada concentração de resíduos, depois de um certo tempo de uso do dielétrico novo. A partir destas constatações, foram comprovados os mesmos resultados com a adição de grafite em pó em querosene.

A adição de grafite se deveu ao fato de que grande parte dos resíduos formados terem sido carbono, proveniente principalmente da quebra do fluido dielétrico (Thomson, 1989).

Kurafuji & Suda (1965) afirmaram também que houve maior estabilidade no processo. Tal estabilidade, segundo os pesquisadores, era devido ao fato de se conseguir menor resistência na interface ferramenta-peça, apesar do aumento verificado no *gap*. Estas afirmações são justificadas através do modelo de propagação da descarga na presença dos resíduos (fragmentos de usinagem) desenvolvido por Kurafuji & Suda (1965), apresentado na Figura 3.2. Pelo modelo, a descarga propaga da ferramenta para as partículas dos resíduos mais próximas e destas para outras até atingir a peça. Sem dúvida, a presença de tais partículas condutoras altera a física do arco e uma das evidências então constatadas foi o aumento do *gap* com a conseqüente maior estabilidade do processo.

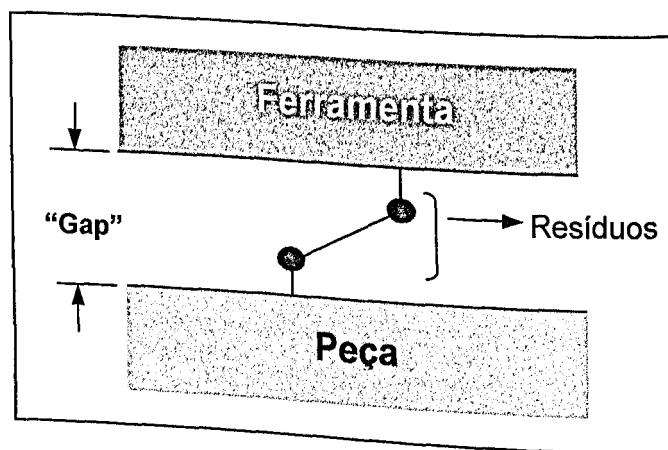


Figura 3.2 - Mecanismo de propagação da descarga elétrica (Kurafuji & Suda, 1965).

Nas décadas de 60 e 70, os trabalhos de pesquisa com adição de pó ao fluido dielétrico foram poucos explorados cedendo lugar aos avanços tecnológicos nos equipamentos EDM, principalmente aos novos circuitos de geração de pulsos de descarga. Entretanto, a partir da década de oitenta, os trabalhos foram retomados na tentativa de compreender seu mecanismo de forma mais detalhada, bem como os seus efeitos sobre o desempenho do processo EDM. Na maioria dos trabalhos, a adição de pós ao fluido dielétrico foi conduzida para regimes de acabamento. Entretanto, Wong et al. (1998) e Gangadhar (1991), desenvolveram suas pesquisas empregando o regime de desbaste e sugeriram que outros pesquisadores também o fizessem.

3.1 - Interface ferramenta-peça.

A estabilidade do processo EDM, referida por Kurafuji & Suda (1965), tem relação direta com a distância ferramenta-peça. Segundo Narumiya et al. (1989) e Kobayashi (1995), esta distância sofre um aumento considerável pela adição de pó.

Conforme Okada & Uno (1997), este aumento deve-se à menor resistividade na interface ferramenta-peça devido às partículas semi-condutoras e condutoras quando adicionadas ao fluido dielétrico, em granulometria e concentração ideais. Narumiya et al. (1989), apresenta resultados do "gap" em função da concentração de pó, conforme a Figura 3.3. Os resultados mostram que adições de pó de alumínio e silício ao fluido dielétrico pode aumentar bastante o gap em relação ao fluido convencional (sem adição de pó). Muito se discute a respeito da concentração ideal a ser empregada e um consenso ainda não é evidenciado pela maioria dos pesquisadores.

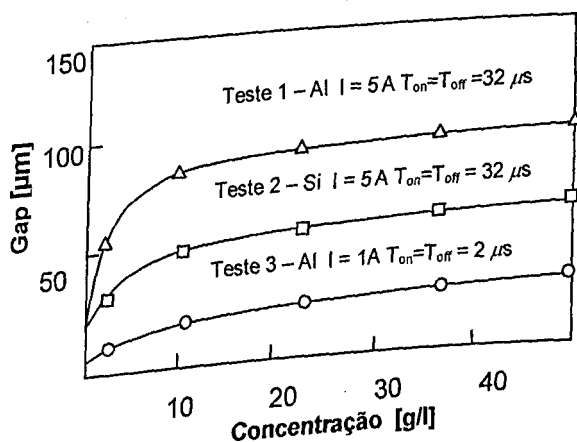


Figura 3.3 – Efeito da concentração sobre o comprimento do gap (Narumiya et.al., 1989).

Mas pode-se concluir pelos resultados da Figura 3.3, em três diferentes condições de usinagem, que tal concentração deve ser acima de 10g/l. No entanto concentrações acima de 40 g/l não apresentam resultados compensatórios importantes.

Okada & Uno (1997), utilizando querosene com adição de Si, tensão - 90 volts, corrente de 3 ampères e duração de pulso de 2μs, verificaram que este aumento pode ser em torno de cinco vezes, como apresenta o esquema da Figura 3.4.

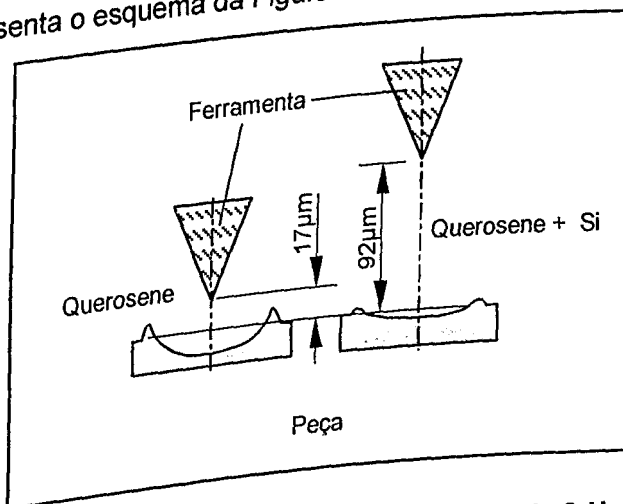


Figura 3.4 - Diagrama esquemático do gap (Okada & Uno, 1997).

As vantagens do aumento do "gap" refletem-se em avanços estáveis da ferramenta devido a maior facilidade de escape dos produtos formados pela erosão, evitando ainda os curto-circuitos.

3.2 - Dispersão das descargas e estabilidade do processo.

Narumiya et al. (1989) menciona que em condições de fino acabamento, utilizando fluido dielétrico normal, as condições de usinagem se tomam irregulares. A razão disto é que a dispersão de corrente de descarga ocorre dentro de certas regiões limitadas que percorrem toda a extensão de área transversal da ferramenta. Este fato foi constatado através da análise osciloscópica do comportamento da corrente de duas ferramentas idênticas, alimentadas simultaneamente, primeiramente sem adição de pó ao fluido dielétrico e depois com adição aos mesmos. No caso do processo EDM convencional, isto é, sem adição de pó, quase todas as descargas ocorreram em uma só ferramenta, descargas estas que se alternavam em longos intervalos de tempo em cada ferramenta. Pelo contrário, com a adição de pós, resulta em descargas alternadas em ambas as ferramentas em frações de tempo bem menores.

A dispersão de descarga é desejável no processo EDM. As vantagens são a obtenção de superfícies mais uniformes, prevenção contra descargas concentradas e menores tempos de usinagem.

Outro aspecto positivo da dispersão de descarga é a estabilidade do processo EDM. Segundo o trabalho de Narumiya et al. (1989), esta estabilidade depende de algumas características das descargas tais como distância ferramenta-peça, tensão e corrente elétricas aplicadas. Por análise osciloscópica, os referidos pesquisadores informam que estas características se mantêm constantes por mais de dez segundos. Esta estabilidade, como menciona o referido autor, não é vista em um processo EDM convencional. A Figura 3.5 resume os efeitos da distância ferramenta-peça (gap) e da dispersão de descargas, já abordados.

3.3 - Aspectos superficiais e área total acabada.

Okada & Uno (1997), ao analisarem o mecanismo de geração de uma superfície usinada por EDM com adição de Silício, comparam o formato das crateras produzidas com e sem adição de pó, que são apresentadas na Figura 3.6.

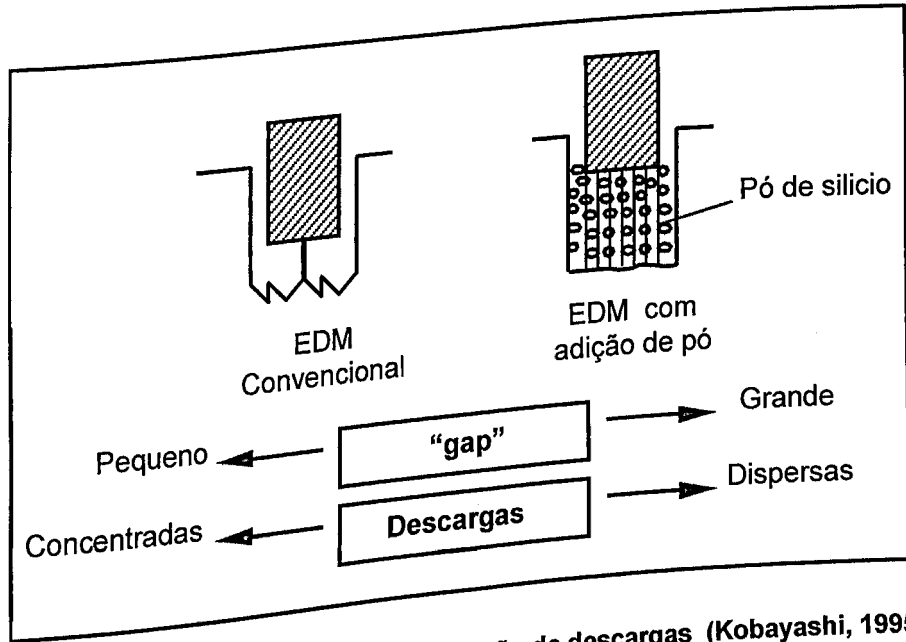


Figura 3.5 - Relação entre o gap e a dispersão de descargas (Kobayashi, 1995).

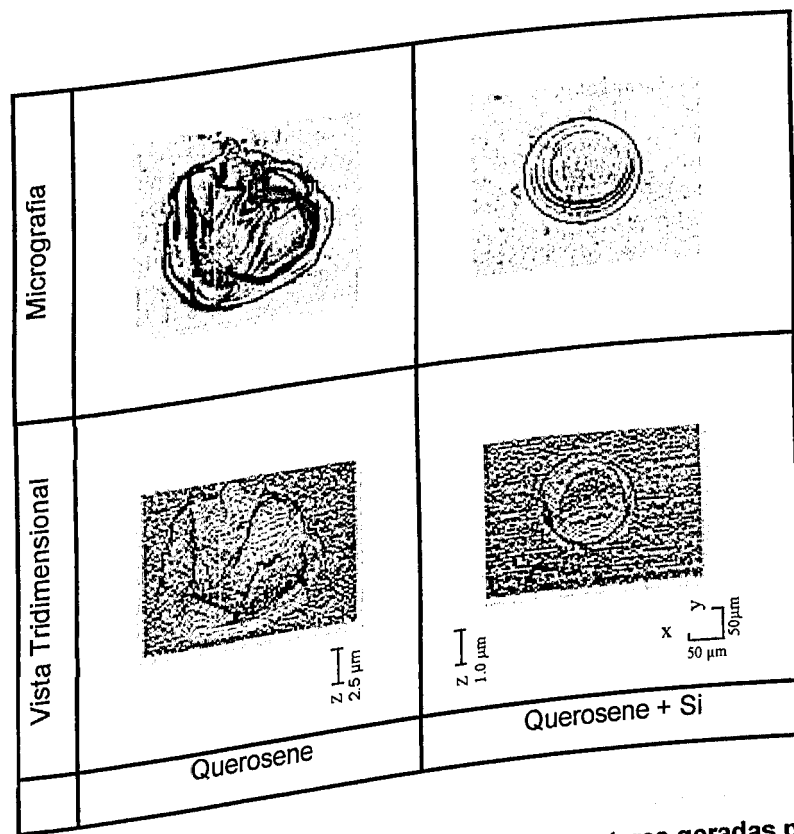


Figura 3.6 - Aspecto superficial e vistas tridimensionais das crateras geradas por uma descarga de um único pulso em aço-carbono - 0,30% de C, aço SK3 da norma JIS (Okada e Uno, 1997).

Na referida figura torna-se claro o efeito da adição de pó na forma da cratera e um pulso de descarga no aço SK3. Percebe-se com isso o benefício desta tecnologia no aspecto superficial, principalmente com relação ao acabamento superficial.

Okada e Uno (1997) concluem que a forma das crateras geradas diretamente com o impacto da força das descargas sobre a peça. Resultados similares obtidos em amostras de aço-carbono SKD11 e SKD61 (especificações da JIS). O processo EDM seja referenciado como sendo um processo térmico, o efeito de descargas na forma de impacto mecânico também se faz presente, sendo isto avaliado por referidos pesquisadores através de um dinamômetro Kistler.

Outro detalhe diz respeito à menor quantidade de material fundido e resolidificado na superfície da peça, reduzindo consideravelmente a espessura da camada refundida. Ao longo do tempo, grande parte das microtrincas que estão presentes nesta camada são eliminadas. Rodrigues (1999) apresenta resultados onde a redução na quantidade das trincas é considerável com a utilização da adição de SiC em três tipos de fluidos dielétricos como água desionizada em regime de alta energia de descarga. De acordo com Ming e He (1995), uma explicação para tal fato, quando se adicionam pós ao fluido dielétrico, é que as descargas atuam em áreas maiores e mais uniformemente, reduzindo as tensões térmicas na peça. Com isso, tem-se uma camada refundida mais fina e mais uniformemente distribuída sobre a região usinada. Como consequência, ainda, a formação de microtrincas pode ser reduzida consideravelmente.

Investigações realizadas por Ming e He (1995) destacam que durante o processo EDM convencional os elementos de liga no material da superfície usinada podem ser reduzidos, enquanto que a quantidade de carbono aumenta. Com a adição de pós pode-se reduzir a quantidade de elementos de liga, porém não pode-se afirmar que a quantidade de carbono também seja reduzida. Este aspecto superficial reflete num aumento na resistência à fadiga. Os referidos autores constataram através de difração de raios-X que, ao se usar com pós, pode-se aumentar a quantidade de martensita e reduzir a quantidade de austenita retida e cementita remanescentes na superfície usinada.

Gangadhar (1991) e Masui et al. (1998) mostram as potencialidades do processo EDM com adição de pós condutores para a produção econômica de revestimentos superficiais no combate à corrosão e ao desgaste abrasivo.

Outro aspecto positivo do processo EDM com adição de pó está relacionado com a área total acabada. Kobayashi (1989) menciona que em operações de acabamento com o fluido convencional, a distância entre ferramenta e peça é tão pequena que descargas anormais ocorrem várias vezes, dificultando o acabamento em áreas acima de 10 cm².

O referido autor apresenta ainda alguns resultados que mostram que a adição de pó de silício ao fluido dielétrico pode promover uma superfície especular em uma área acima de 500 cm^2 , conforme se nota na Figura 3.7.

Além disso, a Figura 3.7, extraída das investigações de Kobayashi (1995), mostra a relação da rugosidade média aritmética (R_a) e a área usinada, tanto para EDM sem como com adição de pós. Os resultados com e sem adição de pós são altamente divergentes. Enquanto que a rugosidade aumenta rapidamente com a área usinada em EDM convencional, na EDM com adição de pós a rugosidade cresce muito pouco com a área usinada. Este efeito se deve à maior dispersão de descarga devido à presença das partículas na interface ferramenta-peça.

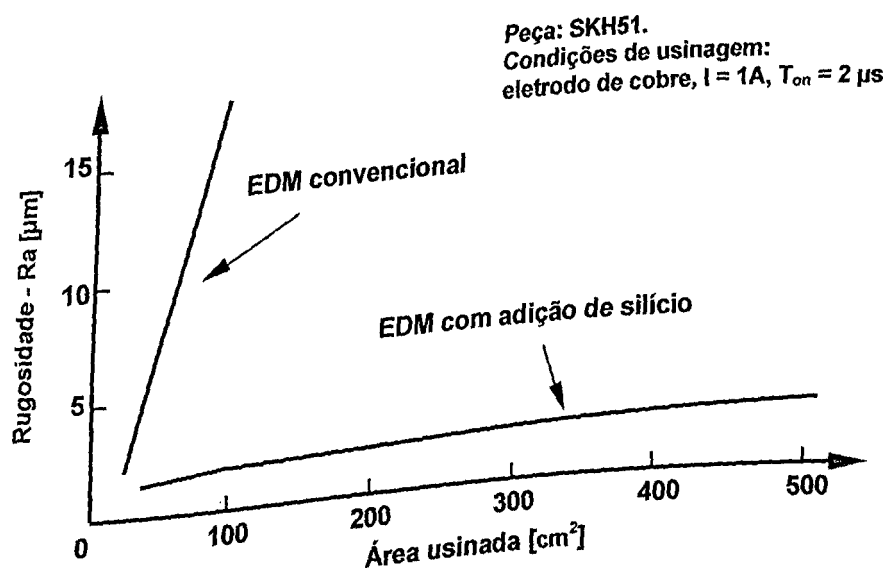


Figura 3.7 - Relação entre a rugosidade superficial média (R_a) e a área usinada (Kobayashi, 1995).

O uso de eletrodo de silício sinterizado apresenta resultados razoáveis, quando comparado ao processo EDM convencional e mesmo com adição de pós, para áreas acabadas menores do que 300 cm^2 . Porém, o processo de fabricação de sinterização de uma ferramenta de materiais semi-condutores e condutores não é ainda economicamente viável para dimensões consideráveis como 500 cm^2 .

Estes aspectos tomam o processo EDM com pós adicionados ao fluido dielétrico altamente atrativo para a indústria, uma vez que podem ser obtidas peças com melhores características tanto de textura quanto de integridade superficial.

3.4 - Taxa de remoção de material - TRM.

Em um processo EDM convencional, o tempo de usinagem para a operação de acabamento é bastante superior ao de uma operação de desbaste. Portanto, o tempo de usinagem para operação de acabamento é um dos problemas mais importantes no processo EDM (Narumiya et al., 1989).

Estes pesquisadores mostram, através da Figura 3.8, que a adição de pó de alumínio ao fluido dielétrico torna o processo EDM muito mais eficiente, sendo capaz de melhorar o tempo de usinagem alcançando, simultaneamente, um alto nível de acabamento quando comparado com o EDM convencional. Tal constatação é verificada por meio de uma usinagem de duas peças com rugosidade máxima de aproximadamente $20\mu\text{m}$, e de mesma seção transversal, uma por EDM com adição de Al e depois por EDM convencional, representadas pelas curvas em linha contínua e tracejada respectivamente na Figura 3.8.

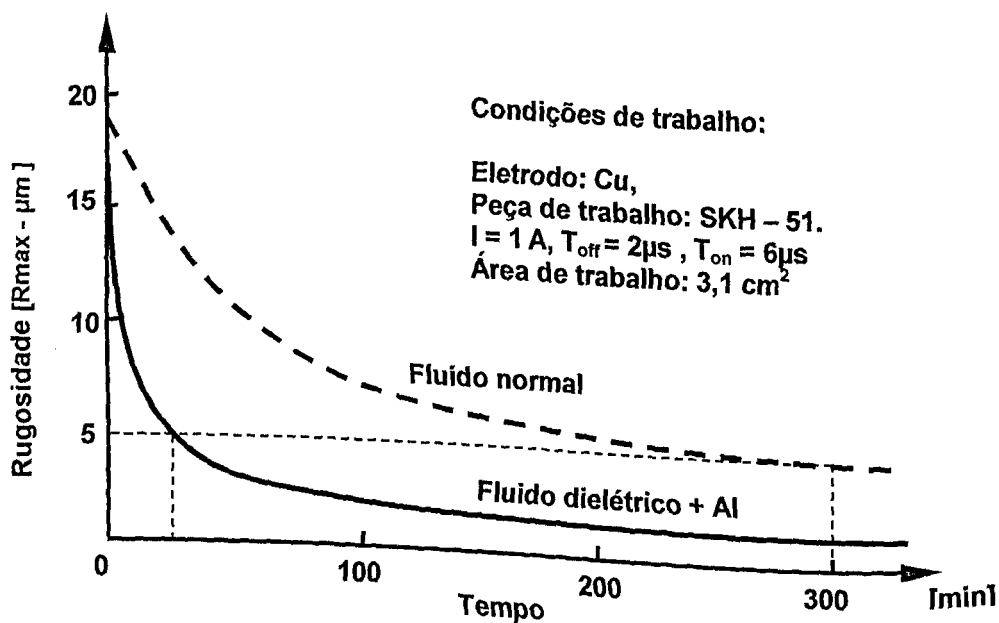


Figura 3.8 - Efeito do tempo de usinagem sobre a rugosidade superficial em operações de acabamento (Narumiya et al., 1989).

Da Figura 3.8, para se ter uma idéia, obter uma rugosidade máxima em torno de $5\mu\text{m}$ no processo convencional requer cerca de 300 min, enquanto que no processo com adição de pó este tempo diminui para aproximadamente 15min. Isto é uma redução considerável no tempo de usinagem, cerca de 95%. O aumento na taxa de remoção de material está relacionada diretamente com a redução do ciclo inativo das descargas, ou seja, desionização da interface ferramenta-peça. A completa desionização desta interface é necessária para não se desenvolver descargas anormais e de menor energia.

Reduzindo-se o ciclo inativo permite-se uma grande quantidade de descargas elétricas por unidade de tempo. Conforme Jeswani (1980), um fator crítico no processo EDM convencional é uma queda brusca de tensão assim que se inicia uma descarga, alterando por conseqüência a física da mesma. Entretanto, o referido autor, investigando a influência da adição de grafite (Gr) de granulometria de $10\ \mu\text{m}$ em querosene, empregando regimes de baixa energia (1 - 500 mJ), percebeu uma melhora significativa deste problema.

Dos resultados apresentados pelo referido autor, cerca de 30% desta queda foi reduzida pela adição de Gr. O resultado é uma eficiência maior do ciclo ativo da descarga, proporcionando um aumento de 60% na taxa de remoção de material. A Figura 3.9 ilustra qualitativamente o exposto, mostrado como o processo EDM convencional pode apresentar maior desempenho através da adição de pós ao fluido dielétrico.

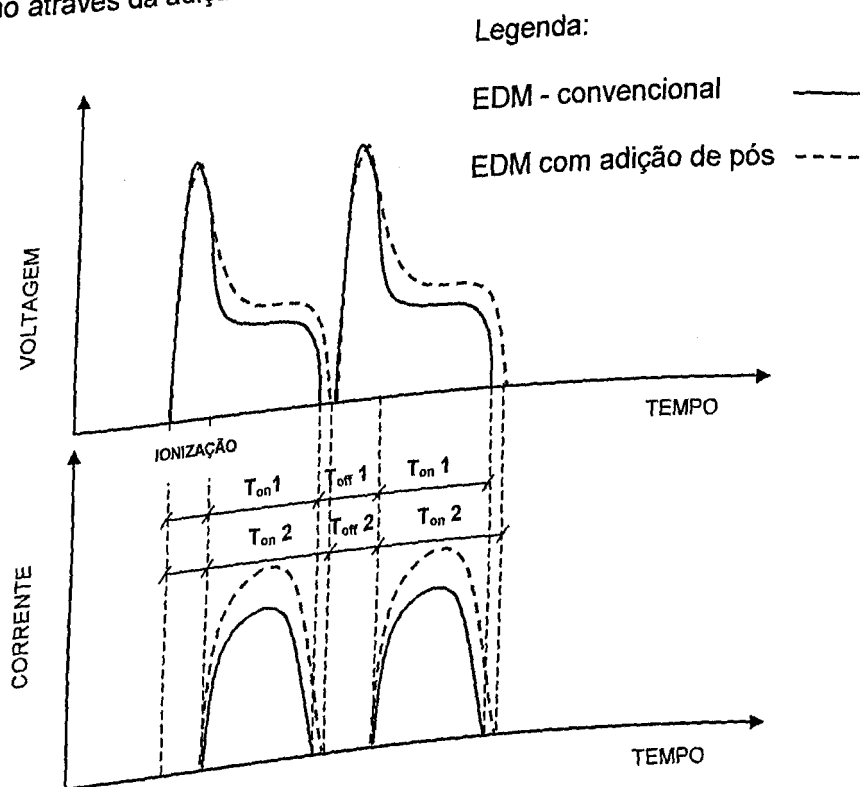


Figura 3.9 - Queda de tensão nos processos EDM com e sem adição de pó (Jeswani, 1980, com interpretação de Fernandes).

Na Figura 3.9, percebe-se ainda que o T_{off} é reduzido praticamente ao tempo de ionização. Isto resulta em ciclos ativos mais longos, até certo ponto, possíveis devido a maior estabilidade do processo EDM com adição de pós, pelo efeito de dispersão das descargas. Outro fator que infere no aumento da eficiência é o aumento na corrente. Isto está relacionado com a maior diferença de potencial imposta, devido ao decréscimo de queda de tensão.

De forma que, os ganhos na tensão e corrente redundam em potências de descargas maiores compensando em parte a maior resistência no "gap", por este ser maior devido a presença das partículas adicionadas. Deve ser levado em consideração que a maioria das partículas adicionadas são de natureza condutora, o que poderia facilitar a propagação da descarga em potências menores. Entretanto isto não ocorre em concentrações adequadas <math><30\text{g/l}</math>, pelo contrário tem-se o comportamento apresentado na Figura 3.9.

3.5 - Relação de desgaste - RD.

A relação de desgaste (RD) também é sensível aos efeitos da adição de pós aos fluidos dielétricos. Poucos são, no entanto, as referências disponíveis sobre este aspecto que tratam do assunto. Cita-se o trabalho de Jeswani (1980), que mostra que a melhor relação de desgaste está relacionada com a máxima taxa de remoção de material, fato este que, nem sempre ocorre no processo EDM convencional.

Outro trabalho é o de Ming e He (1995), que avaliaram a TWR^* , definida como a relação entre o desgaste da ferramenta e o da peça, para operações de usinagem de média e alta energia de descarga. A TWR , portanto, é o inverso do conceito de RD usado neste trabalho. A Figura 3.10, mostra os resultados de TWR para ambos os casos.

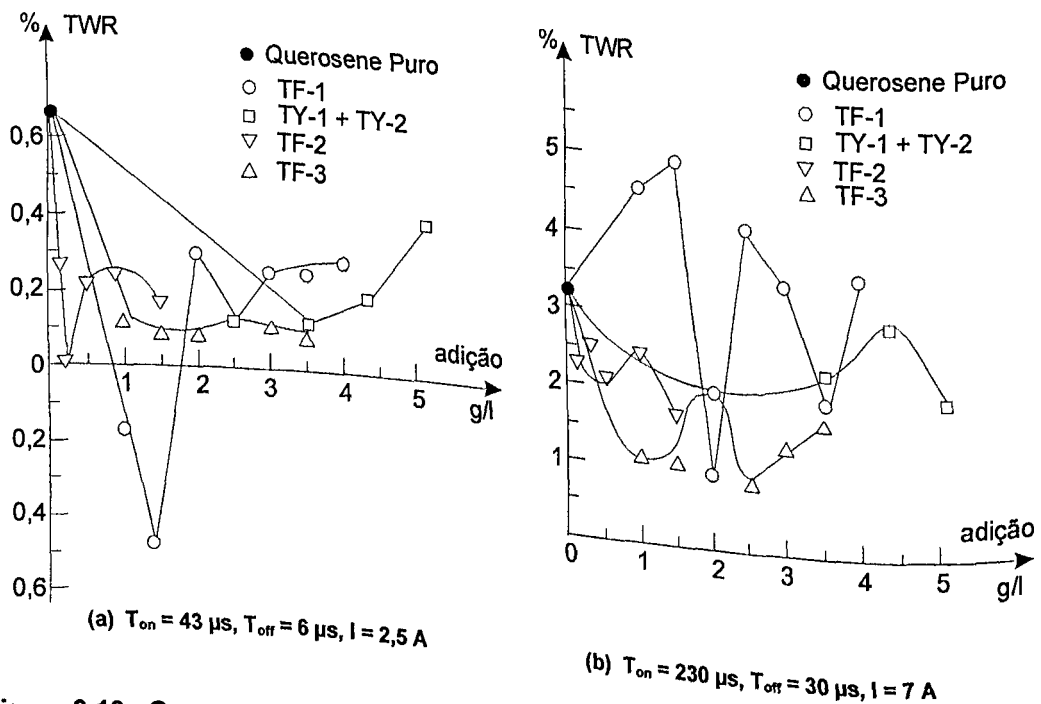


Figura 3.10 - Curvas de TWR em função da concentração da adição, obtidas em regime de usinagem de fino e médio acabamento (Ming & He, 1995).

* TWR - Tool Wear Ratio

Os referidos pesquisadores, investigaram este parâmetro, para cinco tipos diferentes de pós, referenciados apenas por símbolos (TF-1, TF-2, TF-3, TY-1 e TY-2), adicionados em querosene como fluido dielétrico, em função do regime de usinagem empregado e da concentração dos pós adicionados. Das curvas de TWR, percebe-se que o valor ideal da concentração a ser empregada na usinagem é baixo, para obter menor desgaste da ferramenta, entretanto estes são muito discutíveis, tanto pelos gráficos quanto por outras referências.

A Figura 3.10 (a) mostra que, em alguns casos, o desgaste da ferramenta não ocorre, por exemplo em adição em torno de 0,25 g/l utilizando TF-2. E em alguns casos pode mesmo formar um revestimento na ferramenta, é o caso por exemplo a adição na faixa de 1 a 1,5 g/l utilizando TF-1. Segundo Ming & He (1995), uma parcela considerável deste "revestimento" é carbono. Entretanto, neste último caso, nem sempre considera-se como sendo um fator positivo, principalmente, quando se espera usinagens de precisão.

Ainda a Figura 3.10 (a) apresenta a liberdade de se combinar diferentes tipos de adições no fluido dielétrico, garantindo mínimo desgaste da ferramenta em maiores faixas de concentração.

Da Figura 3.10 (b), segundo os referidos autores, mesmo quando se aumenta o desgaste da ferramenta, um aumento de cerca de 1,5 vezes é verificado na taxa de remoção de material, considerado ainda, economicamente viável. Este é o exemplo que ocorre para adições de TF-1 em concentrações em torno de 1,5 g/l.

Capítulo 4

Procedimento Experimental

Neste capítulo descreve-se o procedimento experimental adotado no trabalho, conforme está esquematizado na Figura 4.1.

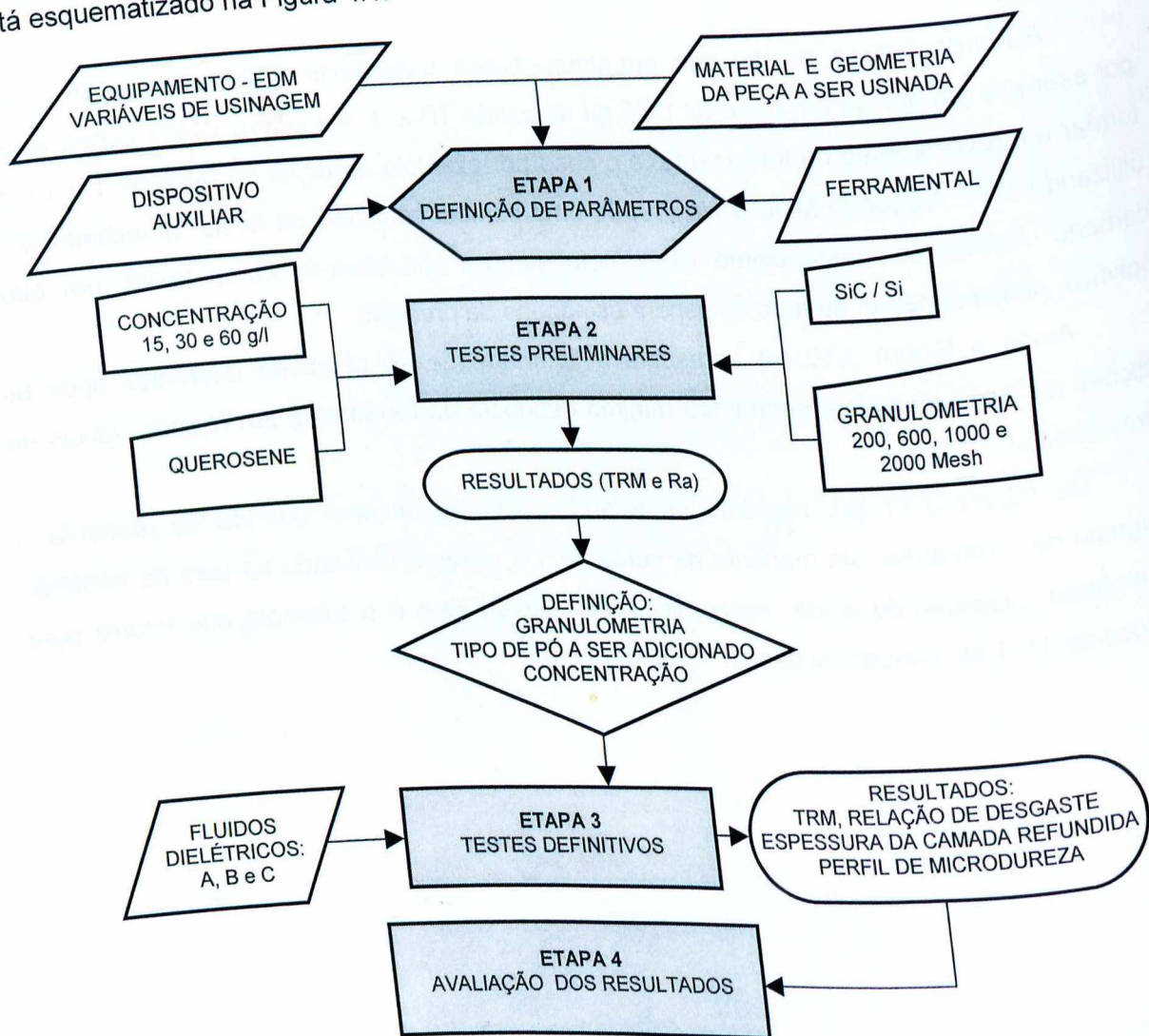


Figura 4.1 – Esquema sob diagrama de blocos da metodologia empregada.

Conforme é fácil de se notar, o procedimento comporta quatro etapas distintas, apresentadas nos subítemos seguintes deste capítulo, de acordo com a seqüência abaixo:

- Etapa 1 – Definição de parâmetros (item 4.1)
- Etapa 2 – Testes preliminares (item 4.2)
- Etapa 3 – Testes definitivos (item 4.3)
- Etapa 4 – Avaliação dos resultados (item 4.4)

4.1 Etapa 1 – Definição de 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 mistura e injeção do fluido dielétrico com adição de pó.

Equipamento EDM.

Os testes preliminares e definitivos (etapas 2 e 3, respectivamente) foram realizados em moderno equipamento EDM a penetração, uma ENGEMAQ 440NC, fabricado pela empresa Engemaq Eletroerosão S/A, adquirida em 1996. A Figura 4.2 apresenta este equipamento com seus elementos constitutivos principais. Trata-se de um equipamento EDM 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.

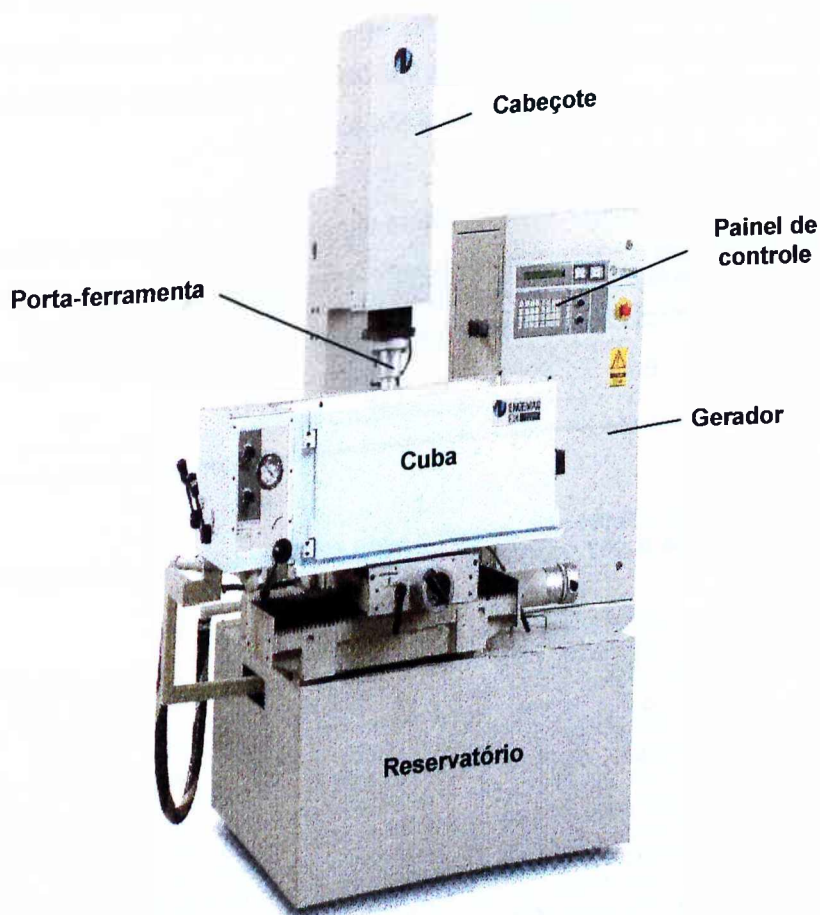


Figura 4.2 - Equipamento de eletroerosão a penetração - ENGEMAQ 440NC.

Segundo comenta McGeough (1989), equipamentos com controle de pulso comparados com os de circuito de relaxação apresentam melhor taxa de remoção de material com a grande vantagem de redução do desgaste do eletrodo, para acabamentos superficiais comparáveis. Estes resultados se devem ao melhor ciclo de trabalho dado por T_{on} e T_{off} , segundo manual Engemaq, (1996). Maiores detalhes vide também Figura 2.3 e expressões 2.2 e 2.3, pg. 8.

Estes 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 são possíveis de serem conseguidos.

O equipamento usado tem um sistema de lavagem pulsado eficiente que garante a presença do fluido dielétrico com adição de pó na interface ferramenta-peça. No referido sistema, o recuo da ferramenta é bastante pronunciado, fazendo com que a renovação do fluido dielétrico no "gap" se faça de forma mais eficaz.

Variáveis de Usinagem.

Conforme foi dito na Introdução, optou-se por realizar os ensaios utilizando um regime de desbaste, cujas variáveis se apresentam na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Variáveis de corte adotadas para usinagem em regime de desbaste.

Regime	Tensão [V]	Corrente [A]	T_{on} [μ s]	T_{off} [μ s]
Desbaste	60	25	200	10

Material e geometria da peça a ser usinada.

O material da peça utilizada nos testes foi o aço-rápido ABNT M2. Segundo o fabricante, Villares Metals S.A., este aço-ferramenta apresenta grande versatilidade, de usinagem em geral como brocas, fresas, machos e cossinetes, estampos de corte, punções, matrizes de estampagem profunda e outras ferramentas de deformação plástica a frio. Este material utilizado foi adquirido na forma de barras de secção quadrada de 9,525 mm, no comprimento de 127 mm.

As barras em questão foram retificadas e beneficiadas pela Tool Master Ind. Metalúrgica Ltda, apresentando uma dureza variando de 64 a 66 HRc e com a seguinte composição química apresentada na Tabela 4.2.

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

Carbono	Cromo	Vanádio	Tungstênio	Molibdênio	Ferro
0,85	4,30	1,90	6,40	5,00	81,55

Além do fato de ser largamente utilizado na manufatura de ferramentas, a escolha deste material se deu principalmente por ser considerado um material de difícil usinagem por processos convencionais, o que o torna altamente indicado para ser usinado por EDM. Além de apresentar elevado grau de uniformidade em suas características físicas e estruturais.

A geometria da peça a ser usinada é apresentada na Figura 4.3. Observa-se que a operação de usinagem no bits foi a realização do entalhe semi-cilíndrico. Esta configuração é similar à empregada por Lima (1997), que estudou vários aspectos da integridade superficial da usinagem desse aço por EDM.

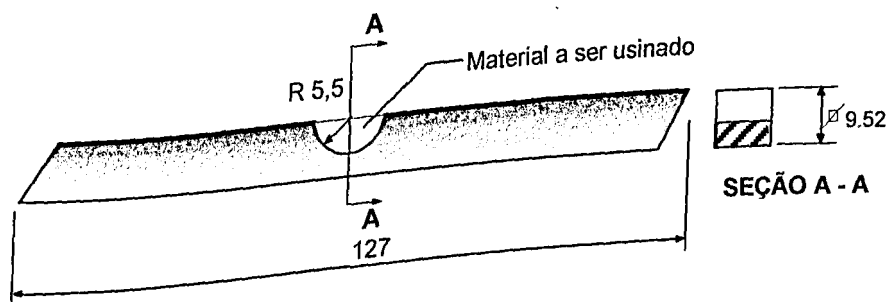


Figura 4.3 – Detalhe final da peça usinada, aço-rápido ABNT M2, por EDM.

De acordo com Lima (1997), a geometria apresentada na Figura 4.3 viabiliza a execução de vários tipos de estudo sem maiores problemas, como por exemplo, o da zona termicamente afetada e topografia da superfície (por meio de microscópio óptico e eletrônico de varredura, respectivamente), o da rugosidade e do perfil de dureza da superfície usinada. Ao mesmo tempo, futuros trabalhos de avaliação de outros aspectos da integridade superficial poderão ser desenvolvidos por causa desta geometria, como por exemplo, o estudo de tensões residuais e o estudo de resistência à fadiga por meio de ensaios de flexão.

Ferramental empregado

A geometria da ferramenta, bem como suas principais dimensões, é apresentada na Figura 4.4. A geometria tubular impõe um sistema de lavagem interno à ferramenta. Como o interesse é avaliar o efeito da adição de pó no desempenho do processo EDM, a presença das partículas de pó na região da interface ferramenta-peça é de fundamental importância.

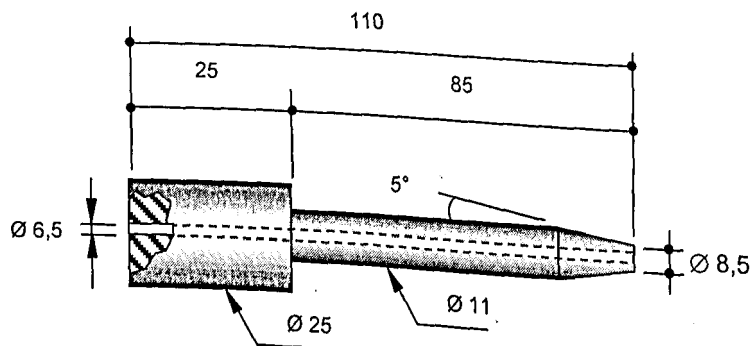


Figura 4.4 - Representação esquemática da ferramenta de cobre eletrolítico.

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 criado pelo arraste de partículas erodidas que emergem do fundo do furo para a superfície. Porém, quando se trabalha com adição de pó ao fluido dielétrico, o sistema de sucção é comprometido pela densidade do fluido. Uma tendência de precipitação do pó pode ocorrer, com o que resulta na perda de concentração ao longo de toda usinagem (Ming & He, 1995). De forma que um sistema de lavagem por sucção se torna inviável neste caso. Diante do quadro apresentado e das maiores dificuldades apresentadas pelo sistema de sucção, adotou-se o sistema de lavagem por injeção.

Entretanto, para compensar o efeito da conicidade, a geometria da extremidade da ferramenta foi modificada. Segundo os resultados de Kurafuji & Suda (1965), uma ferramenta com extremidade cônica atende melhor este requisito com a vantagem ainda de apresentar melhores valores de rugosidade na peça quando comparado com outras formas. Porém, é preciso salientar que a usinagem feita não tinha como objetivo ser uma usinagem de precisão. Ainda, segundo investigações do referido trabalho, uma alteração na forma da extremidade da ferramenta pode aumentar o fluxo de fluido dielétrico, garantindo com isto, melhor taxa de remoção de material.

Uma explicação para tais fatos pode estar relacionada com o menor volume de material que é retirado no primeiro estágio da usinagem (parte cônica). A partir de então, no segundo estágio (parte cilíndrica), a ferramenta terá menos trabalho de remover o restante de material da peça. Esta providência acelera também o tempo de usinagem, não dando tempo para que o sobre-corte lateral seja significativo. Além disso, com a geometria adotada, a facilidade de restauração da ferramenta após seu uso é rápida e o reaproveitamento ao longo de seu comprimento é mais eficiente.

Outro fator desfavorável à adoção de um sistema de lavagem por sucção, é o desprendimento de uma pequena parte do material usinado na forma de um semi-cilindro, que poderia se alojar dentro da ferramenta. Isto poderia obstruir o canal de sucção (prejudicando a eficiência do sistema de lavagem e a presença das partículas de SiC no "gap") e mesmo provocar curto-circuito, estagnando o processo a longos ciclos de usinagem. Em contrapartida, o sistema de lavagem por injeção se encarrega de retirar este pequeno corpo não usinado da região de usinagem, capturado por um pequeno reservatório incorporado abaixo do sistema de fixação, conforme é mostrado em detalhe na Figura 4.5, para que este não fosse para o reservatório e viesse a danificar o rotor da bomba centrífuga. Além disso, a referida figura mostra detalhes do sistema de fixação.

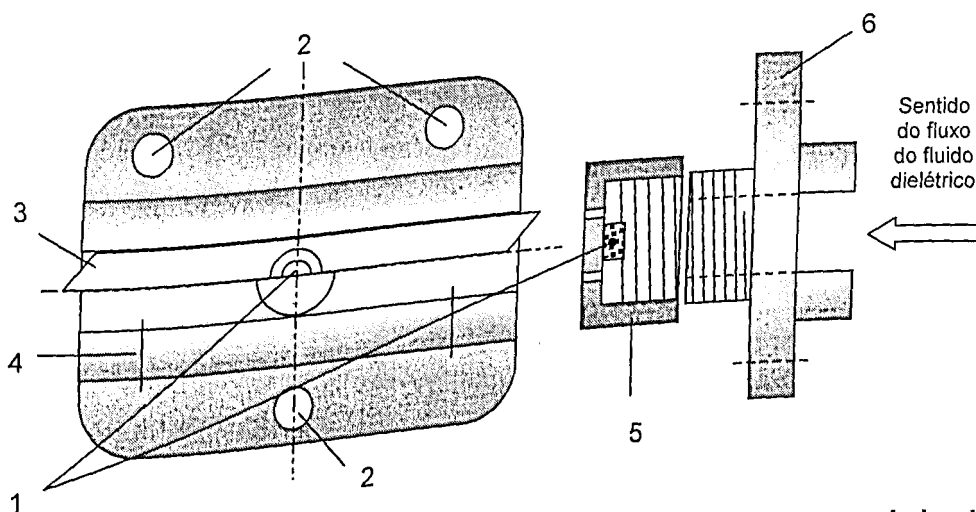


Figura 4.5 - Sistema de fixação e alguns de seus componentes: 1- corpo semi-circular não usinado; 2- pontos de fixação e nivelamento; 3- bit de aço-rápido ABNT M2; 4- pontos de fixação do bit; 5- captador do elemento 1; 6- base de apoio.

O sistema de fixação foi projetado para conseguir o perpendicularismo entre ferramenta e a base de apoio do material a ser usinado. Para isto, esta foi assentada em três pontos.

O material empregado para fabricação da ferramenta é o cobre-eletrolítico. De acordo com Mohri et al. (1993), este material é convencionalmente usado em EDM.

Segundo o referido autor, isto se deve ao fato de proporcionar alta relação de desgaste, devido à alta condutividade térmica. A Tabela 2.3 apresenta algumas propriedades deste material.

Tabela 2.3 - Propriedades físicas e elétricas do cobre-eletrolítico.

Peso específico	8,9 g/cm ³ ;
Ponto de fusão	1083° C;
Resistividade elétrica	0,0167Ωmm;
Condutividade térmica relativa (Ag = 100%)	94,3%;
Condutividade elétrica relativa (Ag = 100%)	96,3%.

Dispositivo auxiliar

Além do equipamento EDM descrito, utiliza-se um dispositivo auxiliar de mistura e de injeção do FAP (fluido com adição de pó), acoplado ao referido equipamento, especialmente apresentado na Figura 4.6, torna possível a obtenção de uma mistura homogênea, para uma concentração previamente estabelecida.

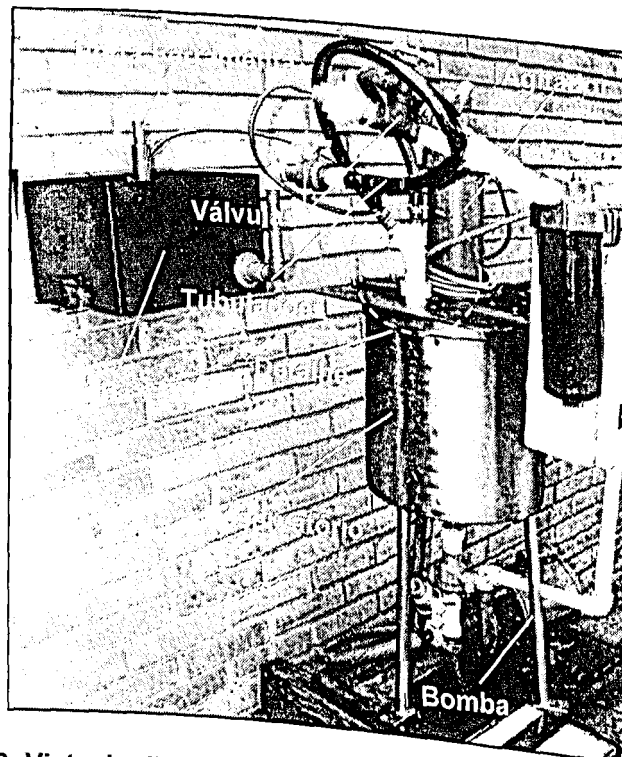


Figura 4.6: Vista do dispositivo auxiliar de mistura e injeção do FAP (fluido com adição de pó), com seus respectivos componentes.

Outro propósito deste dispositivo é garantir a presença do FAP na região da interface ferramenta-peça durante a usinagem dos bits. A Figura 4.7 mostra um desenho esquemático deste equipamento de mistura e de injeção do FAP. Além disso, este dispositivo presta-se a um terceiro objetivo, o de evitar que os 420 litros de fluido dielétrico do reservatório do equipamento EDM fossem contaminados com os resíduos do FAP e que as tubulações e conexões da máquina fossem danificados com a ação abrasiva dos pós.

É interessante ressaltar que os testes sem adição de pó foram feitos utilizando o mesmo dispositivo por uma questão de coerência, em vista da dinâmica do processo, para que os resultados viessem a ser compatíveis com os testes feitos com adição de pó.

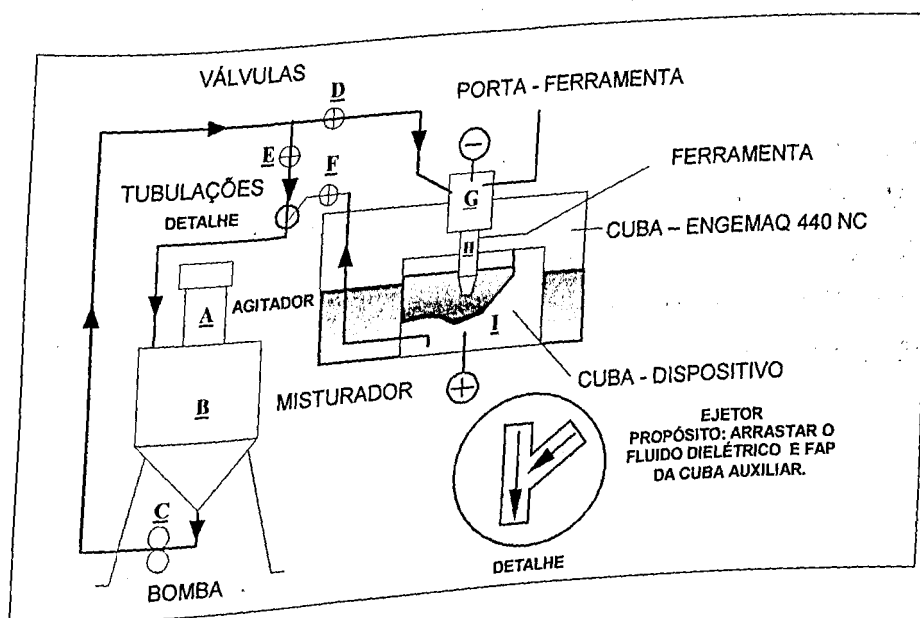


Figura 4.7 - Dispositivo auxiliar de mistura e injeção do FAP.

Fazem parte deste dispositivo auxiliar, um reservatório para dielétrico ou FAP com capacidade para 36 l (B) com agitador (A) com variação de velocidade até 3000rpm e potência de 0,42 CV, uma bomba centrífuga (C) de potência de 1/3 CV e 3480 rpm para impulsionar o fluido na região de trabalho, através de tubulações rígidas e flexíveis para dentro da cuba (I) de dimensões 250 x 250 x 250 mm.

O funcionamento deste dispositivo baseia-se no controle das válvulas (D, E, F). O controle da vazão do fluido através do porta-ferramenta (G) e ferramenta (H) é feito 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, que não passaria pela válvula (D), desviando este para o reservatório (B). Isto faz com que a bomba não sofra recalque e não se formem bolhas nas tubulações, que aqueceriam todo o sistema.

As válvulas (D e F) controlam o nível de fluido dentro da cuba do dispositivo (I), um balanço entre entrada e saída do fluido. Na própria cuba é feita uma filtragem magnética por meio de ímãs que retêm os resíduos metálicos provenientes do processo EDM, permitindo que somente o fluido retorne ao reservatório.

Este retorno é conseguido por ação de um efeito de arraste na junção das tubulações onde estão colocadas as válvulas (E e F), mostrado no detalhe da Figura 4.7. Este ejetor, propriamente dito, é capaz de contrabalançar a vazão de entrada com o auxílio da válvula (E), com que evita ser preciso colocar mais uma bomba no sistema.

Etapa 2 - Testes Preliminares

A etapa 2, denominada de testes preliminares, foi realizada com o propósito de estabelecer os parâmetros relacionados com o tipo e as características do pó a serem adotados nos testes definitivos. Foi prioridade definir qual dentre carboneto de silício (SiC) e o silício (Si) seria o pó a ser adicionado, a granulometria e a concentração ideais para a etapa seguinte, nos testes definitivos.

Portanto, foram realizados os testes que constam do anexo pelos quais foram selecionados os seguintes parâmetros constantes da Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Parâmetros definidos nos testes preliminares.

Adição	Granulometria	Concentração
SiC	600 mesh (15 μ m)	30 g/l

Os três parâmetros finais da Tabela 4.4 foram avaliados, nos testes preliminares, em termos da taxa de remoção de material e a rugosidade média, como um critério de avaliação.

4.3 Etapa 3 – Testes definitivos

Utilizando os parâmetros definidos nas etapas anteriores, inicia-se a etapa 3, referenciada como testes definitivos, os quais, conforme o diagrama da Figura 4.1, restam definir apenas os três tipos de fluido dielétrico que serão usados para a avaliação da TRM, da espessura da camada refundida e perfil de microdureza. As principais características dos três fluidos dielétricos, referenciados como óleos A, B e C, são resumidas na Tabela 4.5

Tabela 4.5: Propriedades químicas dos fluidos dielétricos identificados por seus respectivos fabricantes usados nos ensaios definitivos para usinagem no regime de desgaste do aço rápido ABNT M2.

Fluidos dielétricos	Viscosidade cSt a 40 ° C	Massa específica ρ/cm^3	Ponto de Fugor °C
Óleo A	4,1	0,873	150
Óleo B	1 - 2	0,76 - 0,82	150 - 300
Óleo C	3,7 - 4,7	0,836 - 0,933	min.104

Os parâmetros empregados nos testes definitivos acham-se resumidos na Tabela 4.6, a seguir.

Tabela 4.6 - Parâmetros empregados nos testes definitivos

PARÂMETROS	Regime de usinagem				Fluidos dielétricos			Adição			
	Tensão [V]	Corrente [A]	T_{on} [μs]	T_{off} [μs]	Óleo A	Óleo B	Óleo C	Tipo	Granulometria		Concentração [g/l]
					Valvoine	Petrobrás	Tutela AGIP		[μm]	mesh	
	60	25	200	10	DNC 03218	Querosene desodorizado	UT - 396/EE	SIC	15	600	30

O total de peças usinadas neste trabalho pode ser estimado pela expressão 4.1:

(4.1)

$$NTE = F \times (NR \times NFD \times NR)$$

Onde:

NTE - Número total de ensaios;

F - Fator (condição com e sem adição), $\therefore F=2$;

NR - Número de regime de usinagem (desbaste), $\therefore NR=1$;

NFD - Número de fluidos dielétricos (Óleos A, B e C), $\therefore NFD=3$;

NR - Número de repetições, NR=6.

O número de repetições igual a seis gera um campo maior de análise que permite maior confiabilidade nos resultados. Portanto, através da equação 4.1, foram realizado um total de trinta e seis usinagens ou entalhes semi-circulares.

4.4 Etapa 4 – Avaliação dos resultados.

Conforme está no esquema da Figura 4.1, os resultados a serem avaliados são: TRM, RD, espessura da camada refundida e perfil de microdureza. Cada um desses resultados foi medido conforme é explicado a seguir:

Taxa de remoção de material - TRM

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

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

Onde:

V_p = Volume de material removido da peça - [mm^3]

Δt = Tempo de usinagem - [min].

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

$$V_p = \frac{\Delta m_p}{\gamma_p} \quad (4.3)$$

Onde:

Δm_p = Diferença entre a massa inicial e final do material da peça - [g];

γ_p = Peso específico do aço rápido ABNT M2 - 0,00768 [g/mm^3];

A diferença entre a massa inicial e final do material da peça foi quantificada através de uma balança analítica, marca Bosch S 2000, com resolução de 10^{-4} g. Entretanto, antes que as amostras fossem pesadas, foi necessário uma limpeza em banho de acetona 95% submetida a um aparelho ultra-sônico, para remover qualquer película de fluido dielétrico ou mesmo de partículas de SiC aderidas à superfície usinada, para que não viesse aumentar a massa da peça. O tempo de operação de uma usinagem é fornecido pela própria máquina EDM, através do cronômetro interno no painel de controle.

Relação de desgaste - RD.

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

(4.4)

$$RD = \frac{V_p}{V_f}$$

Onde:

V_p = volume de material removido da peça - [mm^3];

V_f = volume de material gasto da ferramenta - [mm^3];

De forma análoga, fez necessário medir o volume de material removido da peça e o volume de material gasto da ferramenta. O volume de material removido da peça é obtido segundo a expressão 4.3, apresentada anteriormente, e o volume de material gasto da ferramenta é obtido através da expressão 4.5:

(4.5)

$$V_f = \frac{\Delta m_f}{\gamma_f}$$

Onde:

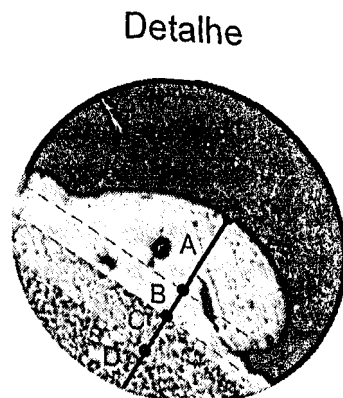
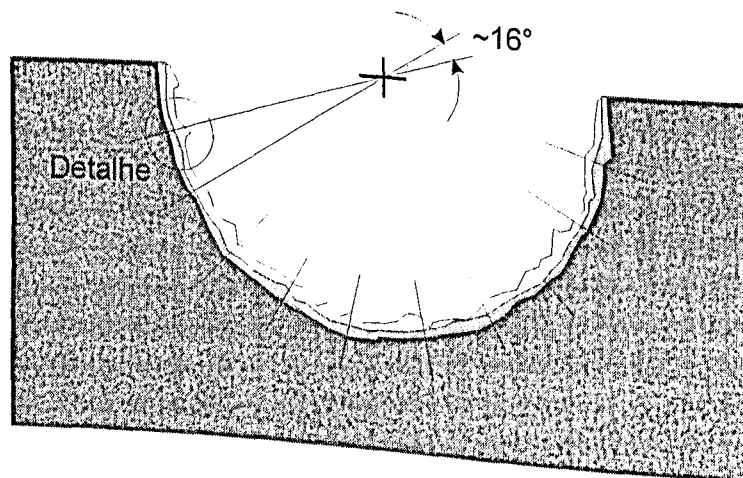
Δm_f = diferença entre a massa inicial e final da ferramenta [g];

γ_f = massa específica do material da ferramenta - $0,0089$ [g/mm^3];

As mesmas preocupações com relação à limpeza da peça são tomadas também com a ferramenta antes do momento da pesagem. Ainda vale lembrar que, cada valor de pesagem é o resultado da média de três pesagens. E que os valores obtidos de TRM e RD para cada condição é a média de seis resultados ou repetições.

Espessura da camada refundida.

As medições da espessura da camada refundida foram feitas por meio de microscopia ótica ao longo do perfil do entalhe circular gerado pela usinagem, conforme é mostrado na Figura 4.8. Para isso, usou-se um microscópio ótico Carl Zeiss Jena modelo NEOPHOT 21, com sistema de medição interno à objetiva. A espessura da camada refundida, para cada situação específica, foi considerada a média aritmética de sessenta medidas, sendo dez medidas proporcionalmente espalhadas em intervalos angulares em torno de 16° , em cada perfil de análise produzido por técnica metalográfica.



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

Figura 4.8 - Detalhes de como foram executadas as medições da espessura da camada refundida.

Assim, foi necessário que as amostras usinadas fossem primeiramente seccionadas e embutidas em resina - baquelite. A seguir, as amostras foram lixadas em uma única direção, de forma a estabelecer uma superfície plana, primeiramente com lixa de granulometria 220 mesh. Este mesmo procedimento é realizado também com lixas de granulometria 400, 600 e 1000 mesh, porém alternando-se a direção de lixamento de 90°. Isto é necessário para se eliminar por completo os sulcos deixados pelas lixas anteriores com grãos abrasivos maiores, constatado por microscopia ótica. Em seguida, um polimento é feito utilizando pasta de diamante de 3 e 0,25 μm . Finalmente, as amostras foram atacadas com uma solução contendo 50% de Nital a 2% e 50% de vilela, denominada *nigreen*. O tempo de ataque para cada um dos seis perfis variou entre 30 e 45 segundos. Este tempo é suficiente para revelar contrastes entre a camada refundida da zona afetada pelo calor (ZAC) e desta para o material de base.

Perfil de microdureza.

Levantou-se o perfil de microdureza por camada. Este perfil é traçado por três pontos, cada ponto sendo a média aritmética de dez resultados, abrangendo a camada refundida uniforme, ZAC e material de base, conforme Figura 4.8. Empregou-se um microdurômetro WOLPERT, e carga de 50 g. Sendo seis as condições dos ensaios, tem-se seis perfis de microdureza. Exclui-se a camada refundida discreta, por ser frágil devido a abundância de bolhas e trincas.

Este procedimento difere da maioria dos trabalhos, que apresentam o perfil de microdureza como sendo obtido por uma maior quantidade de pontos ao longo de uma linha que cruza todas as camadas.

Contudo o método adotado tem uma série de vantagens. Primeiro é o de empregar cargas maiores. Maiores impressões implica em menores erros de leitura das mesmas, portanto maior precisão, que implica também em maior confiabilidade nos resultados. A carga empregada (50 g) foi a máxima carga empregada, dentre outras testadas, que melhor enquadrava na espessura das camadas analisadas. Em segundo é o de ter um resultado representativo de toda a superfície. Em contrapartida deve ser ressaltado que o método mais usado exige maiores cuidados quanto a referenciamento e processamento dos dados extraídos, para que estes possam ser representativos.

Capítulo 5

Análise e discussão dos resultados

5.1 – Taxa de Remoção de Material (TRM)

Conforme McGeough & Rasmussen (1997), a TRM não tem uma expressão definida em função das variáveis do processo EDM. Diretamente porém, a TRM pode ser avaliada em termos do volume de material removido da peça pelo tempo de operação realizada, expressa em mm^3/min e calculada empregando-se a equação 5.1:

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

onde:

Δmp = Diferença entre a massa inicial e final do material usinado – [g];

γp = Peso específico do aço rápido ABNT M2 – [g/mm^3];

Δt = Tempo de usinagem – [min].

A Figura 5.1 apresenta os resultados médios de TRM que compara o desempenho entre as situações com e sem adição de SiC para três tipos de fluidos dielétricos comerciais pesquisados.

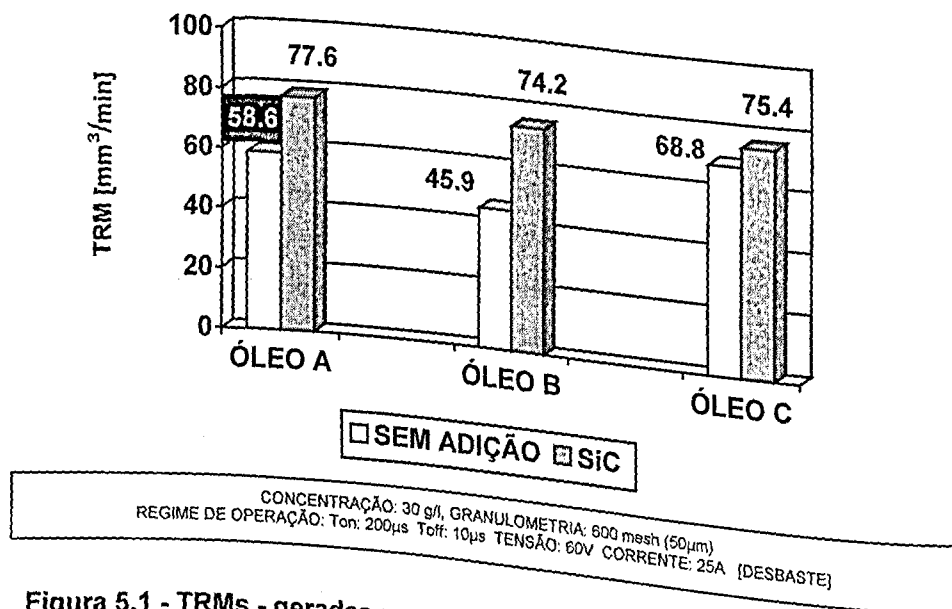


Figura 5.1 - TRMs - geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B e C com e sem adição de SiC.

A Figura 5.1 mostra que a adição de SiC nos três fluidos dielétricos comerciais promoveu aumento na TRM. O aumento percentual foi de 32%, 62% e 10% respectivamente para os fluidos dielétricos A, B e C. Uma das principais vantagens do processo EDM com adição de pós ao fluido dielétrico, como mencionado por Narumiya et al. (1989), é a redução considerável no tempo de usinagem, de forma que isto propicia a obtenção de maiores TRMs. Basicamente, este efeito provém do efeito de dispersão das descargas e do aumento da interface ferramenta-peça. O primeiro diz respeito a formação de menores partículas erodidas geradas no processo e a segunda com a facilidade de saída destas da interface ferramenta-peça. Ainda conforme Jeswani (1981), a adição de pós ao fluido dielétrico reduz a queda de voltagem, constatada no processo convencional. Este aspecto se traduz em maior eficiência dos ciclos ativos de descarga do processo EDM.

Porém, o fluido B é beneficiado de forma mais pronunciada. Analisando a Tabela 4.5 (Cápitulo 4 - Procedimentos Experimentais, pg. 46), que apresenta algumas propriedades dos fluidos dielétricos empregados, percebe-se que o fluido B apresenta a menor viscosidade em relação aos fluidos A e C. Segundo o manual Engemaq (1996), quanto menor a viscosidade tem-se descargas menos concentradas, que retiram menor quantidade de material da peça. Embora a adição de pós ao fluido dielétrico não tenha objetivo de concentrar as descargas, mas de promover a dispersão das mesmas, isto faz com que a quantidade de material removido seja maior justamente pela multiplicação das descargas por toda a superfície da peça. E o efeito torna-se mais pronunciado pela baixa viscosidade do fluido dielétrico B, pois quanto maior a viscosidade maiores são as dificuldades na expulsão dos produtos da erosão, pela própria movimentação das mesmas na interface ferramenta-peça (McGeough, 1987).

Além disso, nos fluidos A e C, que apresentam maior viscosidade, há uma maior sustentação das partículas do que no caso do fluido dielétrico B, que tem maior tendência à precipitação. Sabe-se que o SiC é um material semi-condutor, que o processo EDM consegue usiná-lo com relativo sucesso (König et al, 1988) e que as descargas preferem a menor distância para se propagar (Benedict, 1987). Assim, as partículas de SiC são usinadas antes da peça propriamente dita. Isso, faz com que a eficiência da adição, nestes casos, não seja tão pronunciada, uma vez que uma parcela deste efeito é gasto para se usinar as próprias partículas adicionadas.

Mas o aspecto de maior destaque quanto a adição de SiC é o de nivelar as propriedades físicas e químicas dos fluidos dielétricos. É notória a diferença destas propriedades pelos resultados de TRM apresentados sem a adição de SiC, onde a única variável foi o próprio fluido dielétrico.

A condutividade do SiC pode ser um indicativo deste resultado pela alteração da rigidez dielétrica do fluido dielétrico, ou seja, a resistência à passagem da descarga.

5.2 – Relação de desgaste (RD)

A relação de desgaste é definida como sendo o volume de material removido da peça pelo volume de material gasto da ferramenta, de acordo com a expressão 5.2.

$$RD = \frac{\Delta m_p \times \gamma_f}{\Delta m_f \times \gamma_p} \left[\frac{mm^3}{mm^3} \right] \quad (5.2)$$

onde:

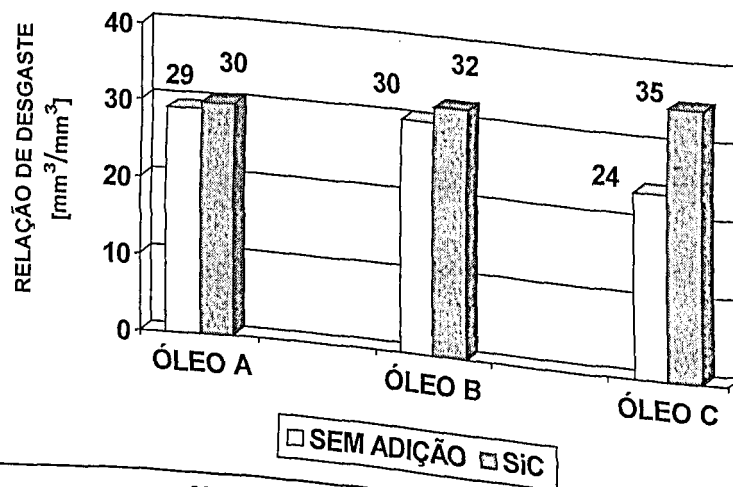
Δm_p = massa de material removido da peça - [g];

Δm_f = massa de material gasto da ferramenta - [g];

γ_p = peso específico do aço-rápido ABNT M2 (peça) - [g/mm³];

γ_f = peso específico do cobre-eletrolítico (ferramenta) - [g/mm³].

A Figura 5.2 apresenta os resultados médios da relação de desgaste utilizados na comparação entre as situações com e sem adição de SiC, para três tipos de fluidos dielétricos comerciais pesquisados.



CONCENTRAÇÃO: 30 g/l, GRANULOMETRIA: 600 mesh (50µm)
 REGIME DE OPERAÇÃO: Ton: 200µs Toff: 10µs TENSÃO: 60V CORRENTE: 25A [DESBASTE]

Figura 5.2 - RDs - geradas no processo EDM com fluidos dielétricos A, B e C com e sem adição de SiC.

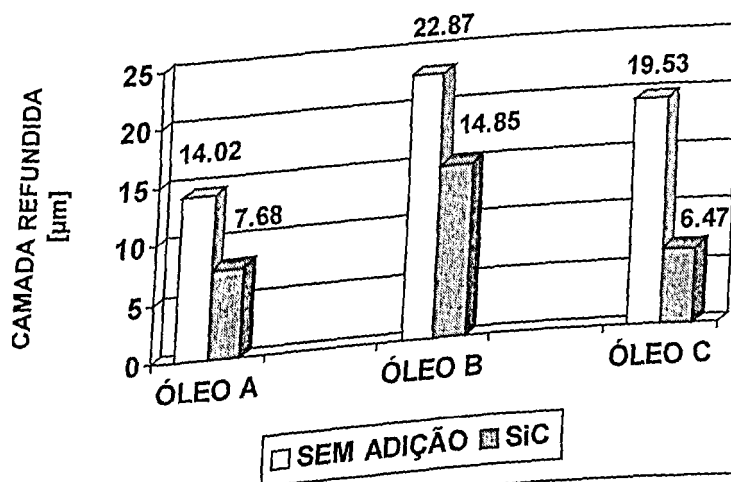
Pelos resultados de relação de desgaste apresentados na Figura 5.2, nota-se que a adição de SiC trouxe benefício real somente para o fluido dielétrico C, com aumento na RD em mais de 45%. Nos outros casos os aumentos na RD foram mínimos.

Normalmente, no processo EDM convencional, o aumento da TRM se relaciona com a redução da RD. Entretanto, isto não ocorreu em nenhum caso com a adição de SiC, e que por sinal, apresentou aumentos consideráveis na TRM. Este é um indicativo de que consegue-se realizar tarefas com maior rapidez e com pouco desgaste da ferramenta.

Estes resultados somente dão mostra do potencial que a adição de SiC tem mesmo em regime de desbaste.

5.3 – Espessura da camada refundida

Outro aspecto que afeta o desempenho do processo EDM é a espessura da camada refundida. Esta camada comporta uma estrutura com transformações de fase, tensões residuais, alterações na composição química e microtrincas. Todos estes fatores influem na vida útil de qualquer mecanismo. A camada refundida está intimamente associada à TRM. Conforme Lim et al. (1991), grande parte de todas as partículas erodidas ao fim de um ciclo de descarga é redepositada sobre a superfície do material usinado. Apenas de 10 a 15% é realmente removido da interface ferramenta-peça. Nota-se através da Figura 5.3 que adição de SiC em qualquer dos três fluidos dielétricos reduz consideravelmente a espessura da camada refundida. Principalmente para o fluido dielétrico "C" a redução é da ordem de 3 vezes.



CONCENTRAÇÃO: 30 g/l GRANULOMETRIA: 600 mesh (50µm)
REGIME DE OPERAÇÃO: Ton: 200µs Toff: 10µs TENSÃO: 60V CORRENTE: 25A [DESBASTE]

Figura 5.3 - Comparação entre as espessuras da camada refundida formadas pelo processo EDM, sem e com a adição de SiC, utilizando três fluidos dielétricos comerciais.

A redução na espessura da camada refundida está relacionada, em primeiro lugar, com a formação de menores partículas erodidas. Em segundo lugar, com a facilidade de escape destas partículas com a maior distância ferramenta-peça. Questiona-se ainda o efeito abrasivo que teriam as partículas de SiC quando aceleradas contra a peça pelas descargas nela inicializadas. Este efeito abrasivo pode ser um fator preponderante, uma vez que a camada refundida observada em microscopia eletrônica de varredura e ótica apresenta-se respectivamente porosa e não totalmente aderida ao material base, independente do fluido dielétrico empregado. As micrografias da Figura 5.4 apresentam, especificamente, estas características para o aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM com fluido dielétrico B com a adição de SiC. As micrografias foram obtidas por MEV (microscopia eletrônica de varredura) da superfície e MO (microscopia ótica) da seção transversal do perfil semi-circular executado.

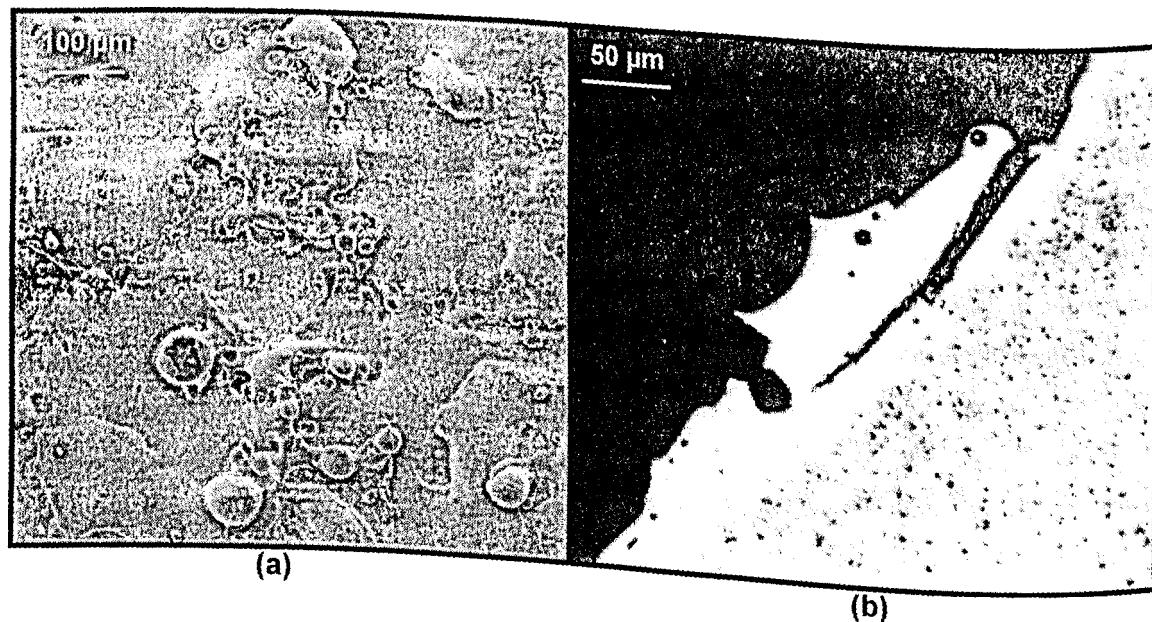


Figura 5.4 - Micrografias (a) e (b) obtidas respectivamente por MEV e MO de amostras de aço-rápido ABNT M2 usinadas por EDM com fluido dielétrico B com adição de SiC.

5.4 - Perfil de microdureza

Conforme Field et al. (1989), alterações na dureza, a partir da superfície, de peças usinadas por EDM são o resultado das altas temperaturas geradas no processo. Segundo Miller & Guha (1999), os efeitos metalúrgicos no aço ferramenta deixam claro que, à medida em que a temperatura se eleva e ocorre a ação erosiva, a superfície sofre fusão e transformação de fase. Em consequência desses fenômenos, pode-se observar o surgimento de três camadas distintas, que de forma prática são avaliadas pelo perfil de microdureza.

Os resultados de microdureza são apresentados através das Figuras 5.5 a 5.10, respectivamente para os fluidos A, B e C, com e sem adição de SiC.

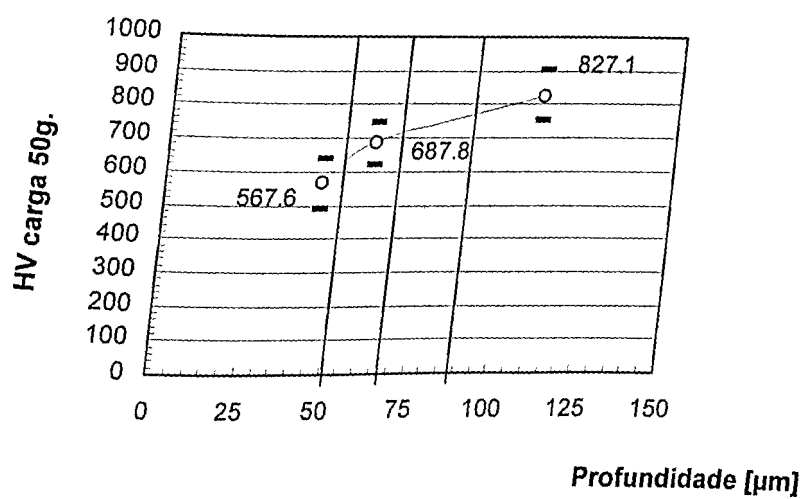


Figura 5.5 - Perfil de microdureza do aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM com fluido dielétrico A sem adição de SiC.

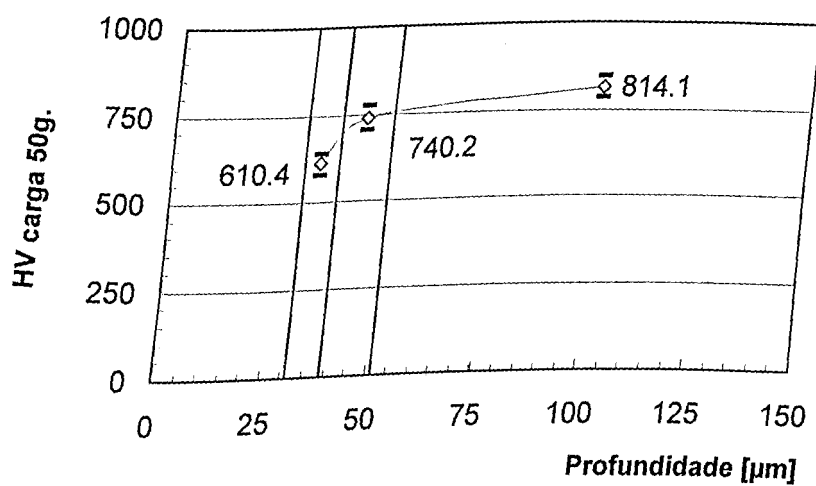


Figura 5.6 - Perfil de microdureza do aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM com fluido dielétrico A com adição de SiC.

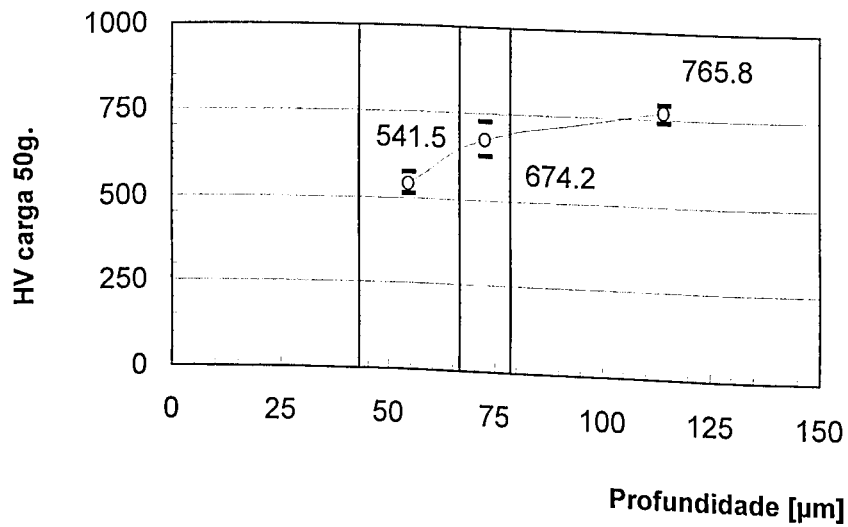


Figura 5.7 - Perfil de microdureza do aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM com fluido dielétrico B sem adição de SiC.

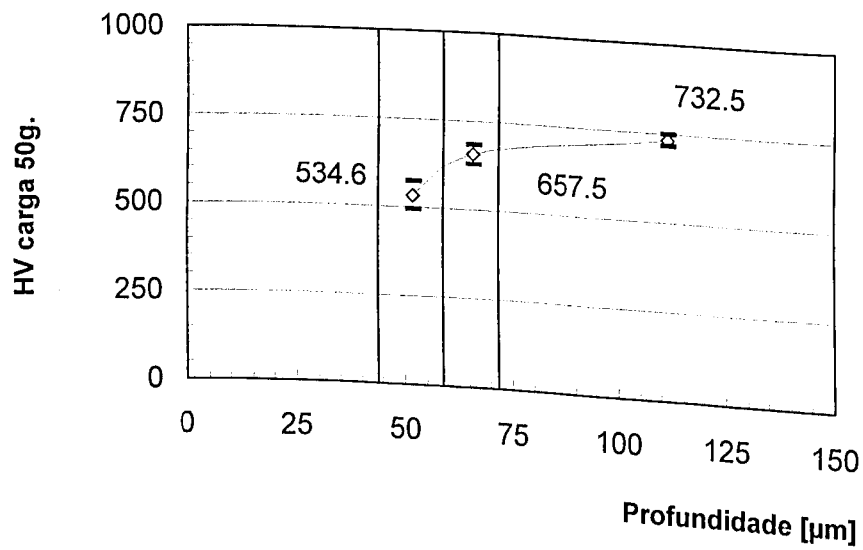


Figura 5.8 - Perfil de microdureza do aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM com fluido dielétrico B com adição de SiC.

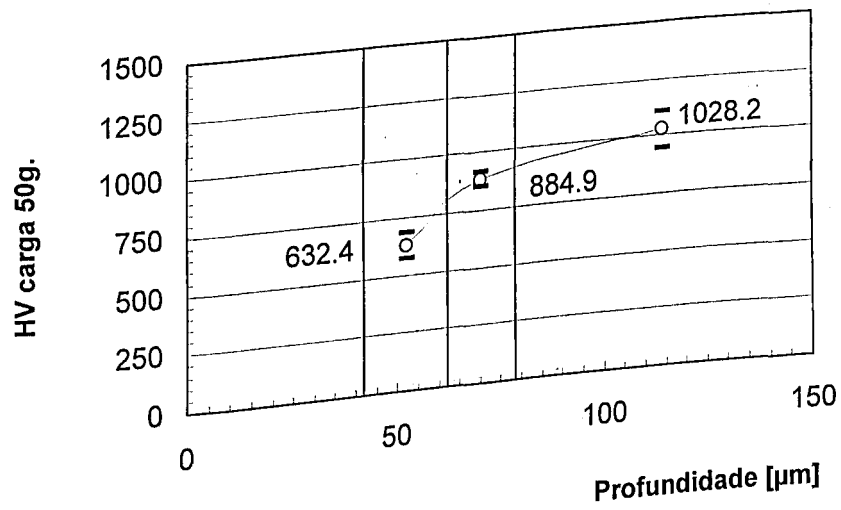


Figura 5.9 - Perfil de microdureza do aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM com fluido dielétrico C sem adição de SiC.

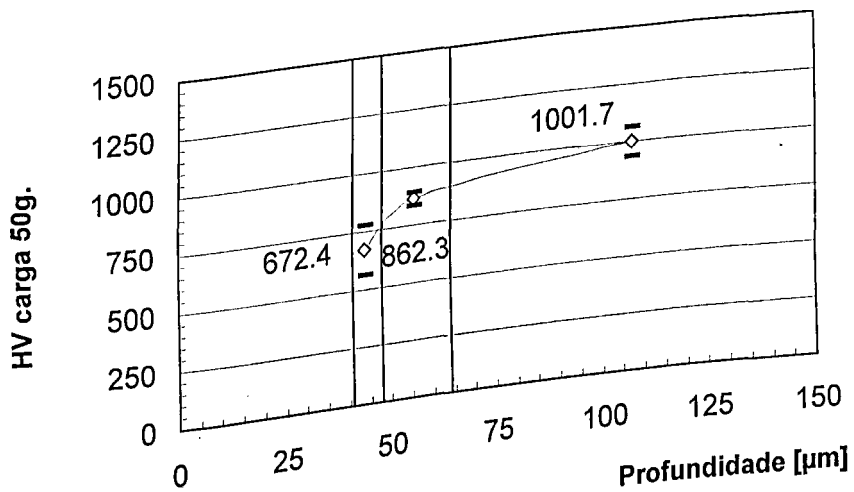


Figura 5.10 - Perfil de microdureza do aço-rápido ABNT M2 usinado por EDM com fluido dielétrico C com adição de SiC.

No levantamento do perfil de microdureza, nota-se, por meio das Figuras 5.5 a 5.10, quatro faixas distintas. Estas são respectivamente, da esquerda para a direita, regiões conhecidas como, glóbulos, camada refundida, zona afetada pelo calor e material de base.

A primeira região apresenta-se como uma camada não uniforme e dispersa por toda a extensão da seção usinada (perfil semi-circular). Além disso, apresenta-se com poros e trincas, como mostra as micrografias da Figura 5.11. Por isso, nesta região não foram executadas as medições de microdureza.

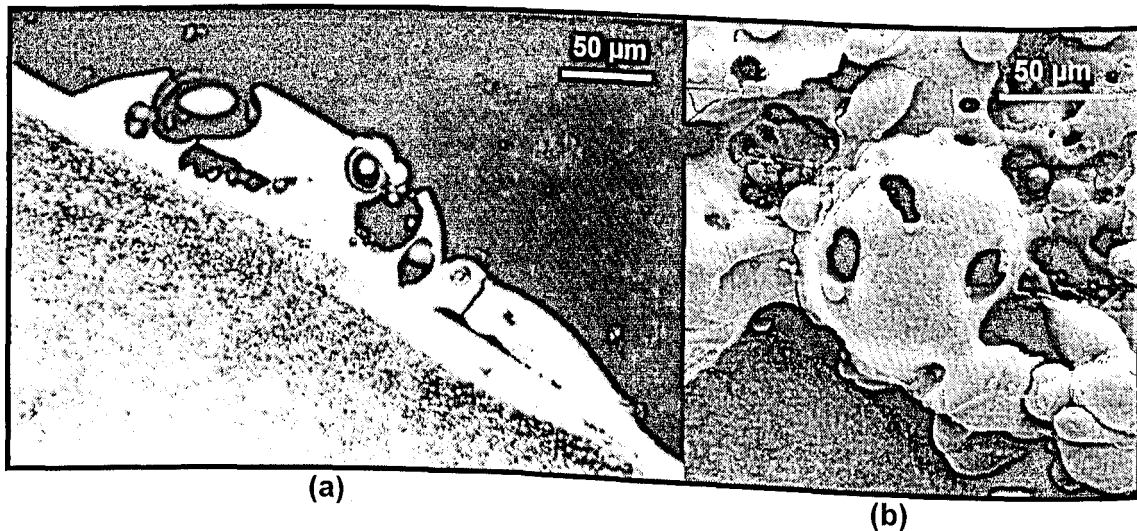


Figura 5.11 - Micrografias (a) e (b) obtidas respectivamente por MO e MEV de amostras de aço rápido ABNT M2 usinadas por EDM com fluido dielétrico C com adição de SiC.

As demais regiões apresentaram-se com camadas definidas das quais foram tomadas os resultados de microdureza por região e não através de uma seção transversal, como é muito comum na maioria dos artigos que tratam do assunto, no levantamento do perfil de microdureza. A Figura 5.12 apresenta algumas impressões de microdureza Vickers obtidas após usinagem EDM utilizando fluido dielétrico B sem adição de SiC.

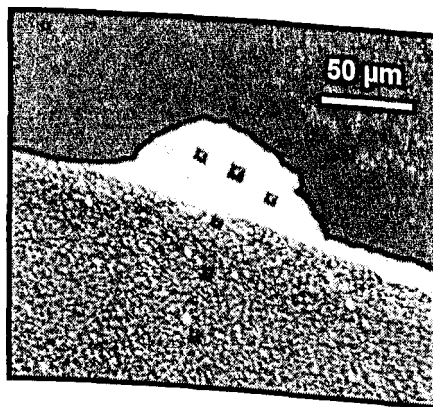


Figura 5.12 - Impressões de microdureza Vickers, com carga de 50g, em aço-rápido ABNT M2, observada em MO (fluido dielétrico B, sem adição de SiC).

Uma explicação de se obter o perfil de microdureza por meio da média dos resultados de microdureza por camadas discretas é o de as impressões de microdureza serem de dimensões consideráveis quando comparada com as espessuras de cada região, devido a carga empregada ser de 50g, conforme a Figura 5.12. Além do que, torna mais precisas as leituras das impressões e com isso maior é a confiabilidade que se tem nos resultados.

Os resultados mostram que ocorreu um crescimento nos valores de microdureza a partir da camada refundida até o material de base, tanto para o processo EDM convencional como para o processo EDM com adição de SiC. Conforme Miller & Guha (1999), a dureza da camada refundida é uma variante do tipo de material processado. Na camada refundida pode ter ocorrido uma descarbonetação por processo de difusão, devido às altas temperaturas.

Quando à camada correspondente a ZAC, acredita-se que os baixos valores de dureza, quando comparados com o material de base, sejam consequência de uma baixa taxa de resfriamento, devido em grande parte à espessura da camada refundida. Os resultados de microdureza apoiam o exposto. Quando se leva em consideração a variação ou os desvios dos resultados de microdureza para o caso do processo EDM convencional, exceto para o fluido dielétrico C, depreende-se que há um aumento da microdureza em todos os casos em que houve a adição de SiC em relação à estes.

Muito embora a carga aplicada de 50 g conduza a resultados confiáveis, pela facilidade de leitura das dimensões da impressão deixada, exige-se um lote de amostragem considerável para que os eventos discretos se tornem representativos. Em vista disto, acredita-se na viabilidade de traçar o perfil contínuo de microdureza através de uma técnica alternativa chamada esclerometria retilínea. A Figura 5.13 mostra um riscamento feito com carga de 50 g, por meio desta técnica.

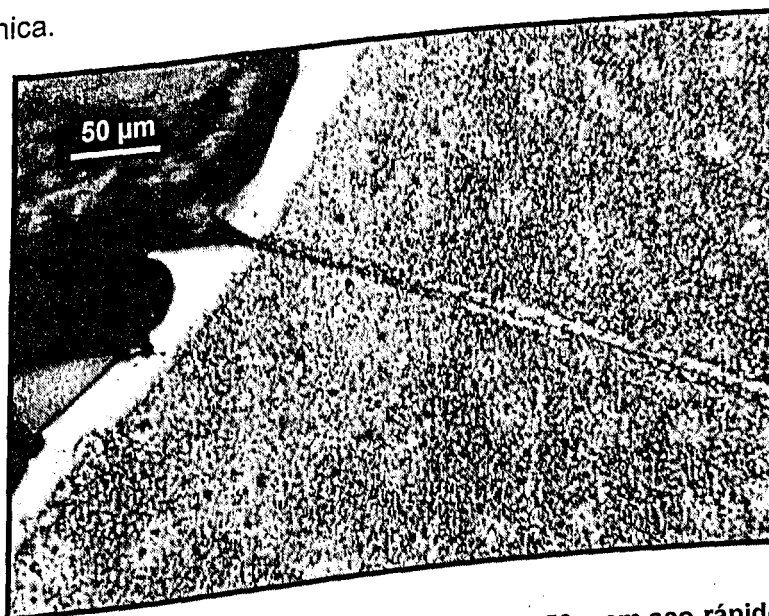


Figura 5.13 - Ensaio esclerométrico retilíneo, com carga de 50g, em aço-rápido ABNT M2, observado em MO (com fluido dielétrico B, sem adição de SiC).

Com a variação da largura do sulco, pode-se determinar as variações de dureza nas diferentes camadas, produzidas pelo processo EDM. A Figura 5.13 é uma micrografia que mostra qualitativamente o mesmo comportamento discretizado pelos resultados de microidentação vickers.

Capítulo 6

X

Conclusões

Os testes preliminares feitos com adição de pó de SiC nas granulometrias de 220, 600, 1000 e 2000 mesh e nas concentrações de 15, 30 e 60g/l e Si na granulometria de 220 mesh na concentração de 30g/l sobre o querosene desodorizado puro, no regime de desbaste, usando o aço-rápido ABNT M2 pelo processo EDM, permitiram que fossem obtidas as seguintes conclusões:

- ☛ A adição de SiC mostrou ser mais eficiente do que a de Si, pelo que mostraram os resultados da TRM e da rugosidade Ra.
- ☛ A TRM apresentada pela adição de 30g/l de SiC foi de aproximadamente 121% superior ao querosene puro enquanto que nas mesmas condições a adição de pó de Si foi apenas cerca de 75% melhor do que o querosene puro.
- ☛ Em relação ao acabamento, a adição de pó de Si piorou a rugosidade média em relação ao querosene puro (10,0 μ m contra 7,0 μ m), enquanto que a adição de SiC praticamente manteve a mesma rugosidade (7,7 μ m contra 7,0 μ m).
- ☛ Adições de SiC com a granulometria de 2000 mesh, apresentaram baixa TRM e alto valor de rugosidade Ra em comparação com as demais granulometrias investigadas (220, 600 e 1000 mesh). Estas granulometrias apresentaram resultados comparáveis entre si, com um desvio máximo de 13% em relação à TRM e de 12% em relação à rugosidade Ra.

☞ A concentração de 30g/l, além de proporcionar um valor de TRM comparável às demais (15 e 60g/l), foi aquela que proporcionou o melhor acabamento superficial (cerca de 15% abaixo das demais).

Os testes definitivos feitos com adição de pó de SiC na granulometria de 600 mesh e nas concentração de 30g/l em três diferentes fluidos dielétricos comerciais designados por A, B e C, no regime de desgaste, usinando o aço-rápido ABNT M2 pelo processo EDM, permitiram que fossem obtidas as seguintes conclusões:

☞ Foram observados aumentos consideráveis na TRM, de cerca de 32%, 62% e 10% respectivamente para os fluidos dielétricos comerciais A, B e C, com o emprego da adição de SiC.

☞ Os fluidos dielétricos originais apresentaram resultados da TRM bastante diferentes entre si, óleo A = 58,6[mm³/min], óleo B = 45,9[mm³/min], óleo C = 68,8[mm³/min].

☞ A adição de SiC teve um efeito de nivelar o desempenho dos fluidos dielétricos testados, tendo em vista que apresentaram resultados da TRM com um desvio máximo entre si de 2,5%.

☞ Pelos resultados de relação de desgaste apresentados, nota-se que a adição de SiC trouxe benefício real somente para o fluido dielétrico C, com aumento na RD em mais de 45,0%. Nos outros casos, os aumentos na RD foram pequenos em cerca de 3,4% e 6,7% respectivamente para os fluidos dielétricos A e B.

☞ Nota-se que adição de SiC aos três fluidos dielétricos testados reduziu consideravelmente a espessura da camada refundida. Para os fluidos dielétricos A e B esta redução foi em torno de 50%, mas principalmente para o fluido dielétrico C a redução foi da ordem de 66%.

☞ Examinando o perfil da região usinada ao microscópio ótico, foram observadas nitidamente, as quatro camadas de que trata a maior parte da literatura, conhecidas como: glóbulos redepositados, camada refundida, zona afetada pelo calor e material de base, reveladas com apropriada técnica metalográfica e tempo de ataque com reagente Nigreen, em torno de 30s.

☞ Os resultados mostram que ocorreu um crescimento nos valores de microdureza a partir da camada refundida até o material de base, tanto para o processo EDM convencional como para o processo EDM com adição de SiC.

☞ O processo EDM com adição de SiC eleva a microdureza da camada correspondente à ZAC, em consequência de uma alta taxa de resfriamento imposta, principalmente, pela redução da espessura da camada refundida.

Listam-se abaixo algumas sugestões de trabalhos futuros na linha de pesquisa envolvendo a adição de pós em fluidos dielétricos:

☞ Estudar e investigar a influência de outros pós tais como o Alumínio, Níquel e Cromo sobre o desempenho do processo EDM, nas mesmas condições estudadas.

☞ Estudar o efeito da granulometria para uma faixa mais discretizada para vários tipos de pós sobre o desempenho do processo EDM.

☞ Investigar o efeito abrasivo que as partículas adicionadas ao fluido dielétrico possam ter no arranque de material no processo EDM.

☞ Estudar a dinâmica da interface ferramenta-peça com adição de pós, através de filmagens de alta velocidade e dos parâmetros elétricos envolvidos.

☞ Comprovar para vários materiais, a possibilidade de empregar a esclerometria retilínea no levantamento do perfil de microdureza.

☞ Pesquisar sobre a possibilidade de se fazer revestimento de alta qualidade pelo processo EDM com adição de pós.

Capítulo 7

Referências Bibliográficas

- Akamatsu, K. & Taneda, A. 1997, *The latest Technologies for Die-Sinking EDMs*, Technical Reports, pp. 5-7.
- Benedict, G. F., 1987, *Nontraditional Manufacturing Process*, New York, Marcel Dekker, pp. 207-246.
- Bhattacharyya, A., 1973, *New Technology*, The institution of Engineers of the India, Hooghly Printing Company, Calcutá, pp.143-184.
- Brink, R. D., 1999, *Cover Story: Continual Improvement*, Cutting Tool Engineering, Abril, Vol.51, N°3, pp.22-28.
- Cruz, C., Malaquias, E.S., Fernandes, L.A., 1999, *Introdução à Usinagem Não Tradicional*, DEEME, UFU, Uberlândia-MG, pp. 7-19.
- Engemaq, 1996, *Manual de Instalação, Operação e Programação*, Engemaq Eletroerosão, Key West Co, Julho.
- Field, M., Kahles, J.F., Koster, W.P., 1989, *Surface Finish and Surface Integrity*, Metcut Research Associates Inc., Metals Handbook – 9° Ed., Machining, Vol. 16, pp. 19-36.
- Fuller, J.E., 1989, *Electrical Discharge Machining*, Metals Handbook, 9° Ed. Vol.16, Machining, pp. 557-564.
- Gilmore, R., 1991, *Ultrasonic Polishing - New Tecnology for Manufacturing in a New Era*, EDM Today.
- Jeswani. M.L., 1981, *Effect of the Addition of Graphite Powder to Kerosene used as the Dielectric Fluid in Electrical Discharge Machining*, Wear, Vol. 70, pp. 133-139.

- Kobayashi, K., 1995, *The Present and Future Developments of EDM and ECM*, International Symposium for Electromachining - ISEM XI, Lausanne, pp. 29-47.
- König, W. & Siebers F. J., 1998, *Estudo de um Sistema por Penetração em Meio Aquoso*, São Paulo, Revista Máquinas & Metais, Aranda Editora - Ano XXXIV, Dezembro, n° 395, pp. 20-27.
- König, W. & Dauw, D.F., 1988, *EDM-Future Steps Towards the Machining of Ceramics*, Annals of the CIRP, Vol. 37, n° 2, pp. 1-9.
- Kurafuji, H. & Suda, K., 1965, *Study on Electrical Discharge Machining*, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo (B), Vol XXVIII, No.1, pg. 1-18.
- Lee L.C., Lim, L.C., Narayanan, V., Venkatesh, V.C., 1988, *Quantification of Surface Damage of Tool Steels After EDM*, International Journal Machining Tools Manufacture, Vol. 28, n° 4, pp. 359-372.
- Lim, L.C., Lee, L.C., Wong, Y.S., Lu, H.H., 1991, *Solidification Microstructure of Electrodischarge Machined Surface of Tool Steels*, Materials Science and Technology, March, vol. 7, pg. 239-248.
- Lima, E. F., 1997, *Rugosidade e Integridade Superficial do Aço Rápido ABNT M2 Após Usinagem por Descargas Elétricas*, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 97pgs.
- Lima, E.F. & Cruz, C., 1998, *Microtrincas em Superfícies Usinadas por Eletroerosão*, Anais do V Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste (V CEM – NNE), Fortaleza, Vol. IV, pp. 458-465.
- Luo, Y.F., 1998, *An Evaluation of Spark Mobility in Electrical Discharge Machining*, Transactions on Plasma Science, Vol. 26, N° 3, June, pp. 1010-1016.
- Mamalis, A. G., Vosniakos, G.C., Vaxevanidis, N.M., Prohászka, J., 1987, *Macroscopic and Microscopic Phenomena of Electro-Discharge Machined Steel Surfaces: An Experimental Investigation*, Journal of Mechanical Working Technology, n° 15, pg. 335-356.
- McGeough, J. A., 1988, *Advanced Methods of Machining*, Chapman and Hall, 1° Edition, London, Chapter 6 – Electrodischarge Machining, pp. 128-152.

- McGeough, J.A., Rasmussen, H., 1997, *A Theoretical Model of Electrodischarge Texturing*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 68, Elsevier Science S.A., pp.172-178.
- Miller, P. & Guha, A., 1999, *Efeitos da Usinagem por Eletroerosão na Superfície dos Materiais para Moldes, Máquinas e Metais*, Aranda Editora – Ano XXXV, nº401, Junho, pp. 40-42, 44, 46-48, 50-51.
- Ming, Q. Y. & He L. Y., 1995, *Powder-suspension dielectric fluid for EDM*, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier Science S.A., Vol. 52, pg. 44-54.
- Mohri, N., Saito, N., Tsunekawa, 1993, *Metal Surface Modification by Electrical Discharge Machining with Composite Electrode*, Toyota Technological Institute, Annals of the CIRP, Vol. 42, nº 1, pp. 219-222.
- Mohri, N., Saito, N., Higashi, M., 1991, *A New Process of Finish Machining on Free Surface by EDM Methods*, Toyota Technological Institute, Annals of the CIRP, Vol. 40, Nº 1, pp. 207-210.
- Narumiya, H., Mohri, N., Saito, N., Ootake, H., Tsunekawa, Y., Takawashi, T., Kobayashi, K., 1989, *EDM by Powder Suspended Working Fluid*, Proceedings of International Symposium for Electro-machining – ISEM IX, Toyota Technological Institute and Mitsubishi Electrical Corporation, Nagoya/Japan, pp. 5-8.
- Pandey, P.C. & Shan, H.S., 1985, *Modern Machining Process*, 3º Ed., Tata McGraw-Hill, Publishing Company Limited, New Delhi, pp. 84-114.
- Rebelo, J.C., Dias, A.M., Kremer, D., Lebrun, J.L., 1997, *Maquinagem por Electro-erosão - Quantificação da Integridade das Superfícies*, III Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica – CIDIM-97, La Habana , September.
- Rhoades, L., 1990, *Post Processing of EDM Surfaces*, EDM Digest, Vol. XII-Nr.1.
- Risko, D., 1990, *Electrochemical Machining - Innovative Solutions for Higher Productivity*, SME Technical Paper.

Rodrigues, J.R.P., 1999, *Efeito da Adição de Carboneto de Silício em Pó na Geração de Microtrincas e na Topografia da Superfície Usinada por Descargas Elétricas do Aço Rápido ABNT M2*, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 47 pgs.

Sakay, M., 1987, *ECM Mirror Finish Method of EDMed Surface*, Proceedings of the Autumn Conference by the Japan Society for Precision Engineering, Tokio, Japan.

Sodick, 1999, *Catálogo Promocional*, Reportagem técnica, pp.1-6.

Thomson P.F., 1989, *Surface Damage in Elettrodischarge Machining*, Materials Science and Technology, November, vol. 5, pg. 1153 – 1157.

Uno, Y. & Okada, A., 1997, *Surface Generation Mechanism in Electrical Discharge Machining with Silicon Powder Mixed Fluid*, International Journal of Electrical Machining – IJEM, N° 2, January, pp. 13-18.

Weller.E.J., 1984, *Nontraditional Machining Processes*, Society Manufacturing Engineer – SME, Dearborn, Michigan, second edition, pp.162-200.

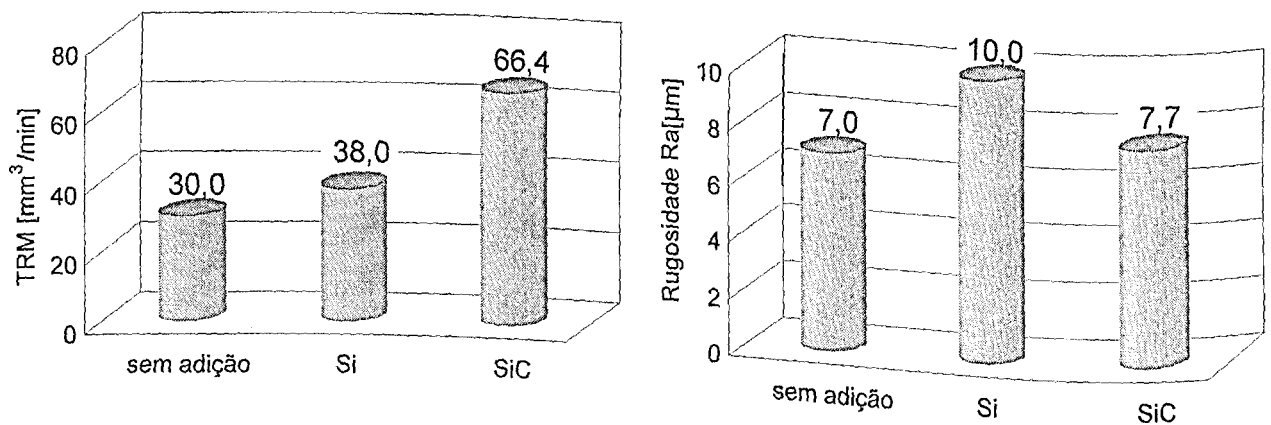
Wong, Y.S., Lim, L.C., Rahuman, I., Tee, W.M., 1998, *Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric*, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier Science S.A., vol. 79, pp. 30-40.

Anexo

Resultados Preliminares

Os testes preliminares fizeram-se necessários ao direcionamento de todo desenvolvimento dos testes definitivos, estando estes diretamente relacionados com o pó a ser adicionado, bem como suas características, a saber, granulometria e concentração. Os testes preliminares foram avaliados apenas em termos dos parâmetros: TRM, Ra, tendo o querosene como dielétrico básico. Esses testes acham-se resumidos nas Figuras 8.1, 8.2 e 8.3, no regime de desbaste.

A Figura 8.1 apresenta os resultados do primeiro teste preliminar, no qual os parâmetros de TRM e Ra são avaliados em três condições, sendo a primeira sem adição e as demais com adição Si e SiC.



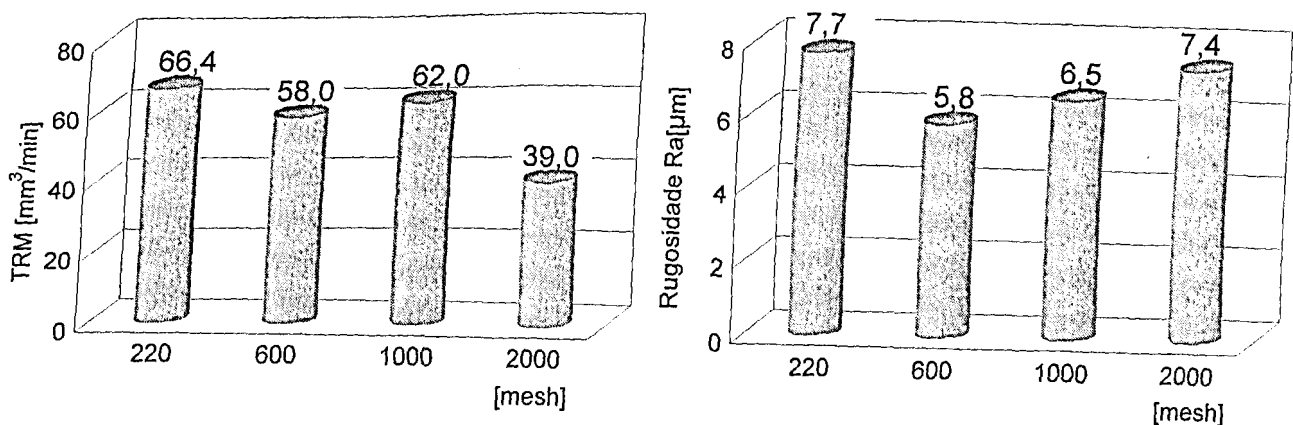
Tensão 60V; Corrente 25A; $T_{on} = 200\mu s$; $T_{off} = 10\mu s$
Fluido dielétrico: Querosene / concentração: 30g/l / Granulometria: 50µm

Figura 8.1 – Teste preliminar para avaliação da adição de pó de Si e SiC comparados ao fluido dielétrico sem adição, em termos de TRM e Ra.

A concentração de 30 g/l foi adotada segundo sugestões feitas por Narumiya et al., (1995) e a granulação de 50 μm (220 mesh) foi escolhida em função da disponibilidade nos laboratórios. O silício foi cedido pela empresa LIASA nessa granulometria que também era uma das disponíveis para o carboneto de silício do laboratório LTM.

Da Figura 8.1 conclui-se que a adição de carboneto de silício (SiC) mostrou ser mais eficiente que o silício (Si) tanto em relação à TRM quanto à rugosidade. Em relação à TRM, o SiC promoveu o arranque de 66 mm^3/min , ao passo que o Si promoveu o arranque de 38 mm^3/min , enquanto que o fluido dielétrico sem adição (querosene) ficou na faixa de 30 mm^3/min . Em termos relativos, o fluido (querosene + SiC) foi 121% superior ao querosene puro enquanto que o fluido (querosene + Si) foi apenas cerca de 75% melhor que o querosene puro. Em relação ao acabamento, a adição de Si piorou a rugosidade Ra em relação ao querosene puro (10,0 μm contra 7,0 μm) enquanto que a adição de SiC praticamente manteve a mesma rugosidade Ra (7,7 μm contra 7,0 μm).

Segundo cita no trabalho de Uno & Okada (1997), as partículas do pó adicionado eram em torno de 15 μm , aproximadamente 600 mesh. Por outro lado, o trabalho de Ming e He (1995) apresenta o tamanho dos grãos abrangendo uma faixa de 10^{-2} a 10 μm . Por isso também foram feitos a seguir ensaios com o SiC nas granulometrias de 220, 600, 1000 e 2000 mesh, utilizando o querosene como fluido dielétrico básico e a concentração de 30 g/l. Os resultados desses ensaios acham-se agrupados na Figura 8.2.



Tensão 60V; Corrente 25 A; $T_{\text{on}} = 200\mu\text{s}$; $T_{\text{off}} = 10\mu\text{s}$
 Fluido dielétrico: SiC + Querosene / Concentração: 30 g/l

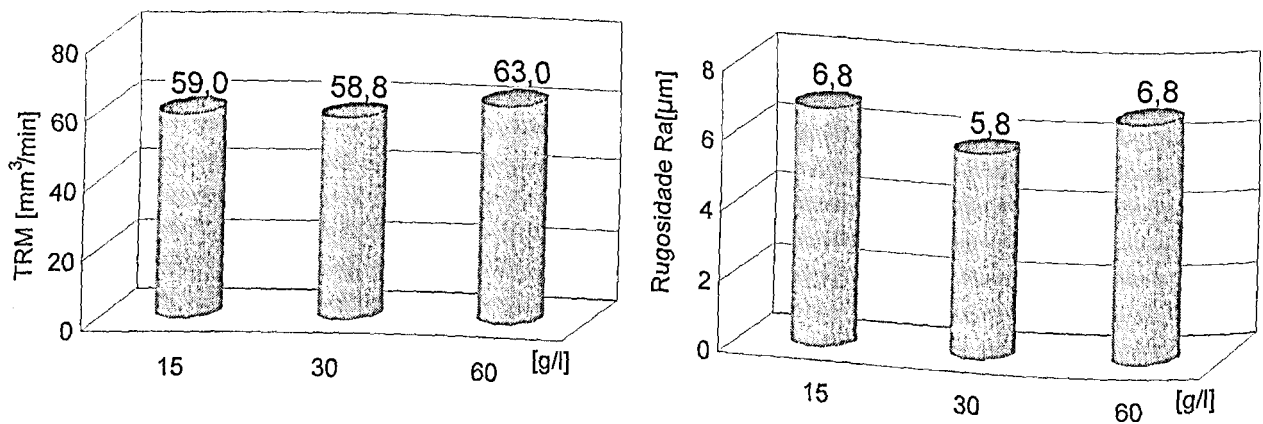
Figura 8.2 – Teste preliminar para avaliação do efeito das granulometrias de SiC, adicionadas no fluido dielétrico (querosene) na concentração de 30 g/l, em termos da TRM e Ra.

De imediato, pode-se descartar a granulometria de 2000 mesh por apresentar baixa TRM e alto valor de rugosidade. As outras três granulometrias, no entanto, são comparáveis com um desvio máximo de 13% em relação à TRM e 12% em relação à rugosidade (Ra).

Optou-se por prosseguir com a granulometria intermediária de 600 mesh não só estar de acordo com Uno & Okada (1997), mas também porque foi a granulometria que apresenta o melhor acabamento das três.

O terceiro teste executado serviu para uma constatação a respeito da concentração. Tal como no segundo, foi realizado somente para carboneto de silício (escolhido do primeiro teste) e para a granulometria 600 mesh $\sim 15\mu\text{m}$ (definida do segundo teste), em querosene como fluido dielétrico básico, nas concentrações 15, 30, 60 g/l. Os resultados apresentados na Figura 8.3 mostram que a concentração de 30 g/l é a melhor concentração que pode ser adotada nos testes definitivos, isto também confirma o que foi sugerido por Narumya et al. (1997).

A concentração de 30 g/l, além de proporcionar um valor de TRM comparável às demais, é aquela que proporciona o melhor acabamento (cerca de 15% abaixo das demais).



Tensão 60V; Corrente 25 A; $T_{on} = 200\mu\text{s}$; $T_{off} = 10\mu\text{s}$
 Fluido dielétrico: Querosene + SiC / Granulometria $15\mu\text{m}$

Figura 8.3 – Teste preliminar para avaliação do efeito das concentrações, do fluido dielétrico (querosene com adição de SiC) em granulometria de 600 mesh, em termos da TRM e Ra.

Critério de avaliação em termos da TRM e da rugosidade média (R_a)

TRM

Vide procedimentos experimentais capítulo - 4, pg. 47-48.

Rugosidade média aritmética (R_a)

Em testes preliminares, foram levantados diversos parâmetros de rugosidade, tais como: rugosidade média aritmética R_a , rugosidade média geométrica R_q , rugosidade máxima R_y , rugosidade total R_t . Para tanto utilizou-se um rugosímetro SURTRONIC 3+ da Rank Taylor Hobson com interface computacional de aquisição de dados. Porém, as análises restringem-se à rugosidade média, por apresentar os menores desvios. O comprimento de amostragem (*cut-off*) adotado foi 2.5 mm, conforme a norma ISO 4287/1.

Para cada amostra, foram feitas três leituras no sentido perpendicular ao eixo central da amostra, de acordo com o esquema da Figura 8.4.

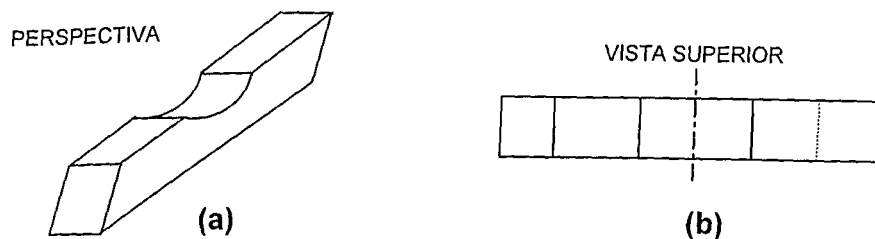


Figura 8.4: Esquema de medição do parâmetro R_a : (a) Perspectiva do bit usinado (b) Vista superior, na qual a linha de centro define o local onde foram realizadas as medições.