

NOV
12.9.04
R6962
TES/ME

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

**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 apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por

JEAN ROBERT PEREIRA RODRIGUES

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

DIRBI/UFU



1000187221

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Claudionor Cruz – (UFU) – Orientador

Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco – (UFU) – Co-Orientador

Prof. Dr. Álisson Rocha Machado – (UFU)

Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz – (UNICAMP)

Uberlândia, 10 de setembro de 1999



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: JEAN ROBERT PEREIRA RODRIGUES

NÚMERO DE MATRÍCULA: 5972624-2

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação

PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO


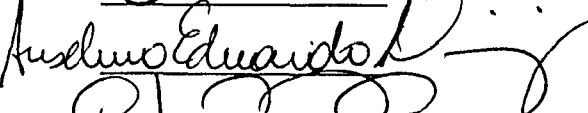
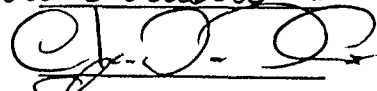
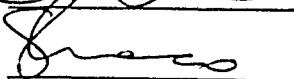
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

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.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Claudionor Cruz

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro do Bloco 1X do Campus Santa Mônica, em 10 de setembro de 1999, as 10 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

| NOME | | ASSINATURA |
|-------------------------------------|---------|---|
| Álison Rocha Machado, Prof. Dr. | UFU |  |
| Anselmo Eduardo Diniz, Prof. Dr. | UNICAMP |  |
| Claudionor Cruz, Prof. Dr. | UFU |  |
| Sinésio Domingues Franco, Prof. Dr. | UFU |  |

Uberlândia, 10 de setembro de 1999.

À minha mãe Deusa Maria Pereira, meu irmão José Roberto Pereira Rodrigues e a minha namorada Raquel de Souza.

AGRADECIMENTOS

- ⇒ A Deus, porque sem ele não somos nada;
- ⇒ Aos professores Claudionor Cruz e Sinésio D. Franco pelas orientações;
- ⇒ À Fapemig pela bolsa concedida durante o período de 2 anos de trabalho;
- ⇒ Aos professores Márcio Bacci da Silva e Arnaldo Alberto Raslan pelas dúvidas esclarecidas durante a fase de elaboração desta dissertação;
- ⇒ Ao Departamento de Engenharia Mecânica e à Coordenação do curso de pós-graduação em Eng. Mecânica pela oportunidade de realização deste trabalho;
- ⇒ Ao Laboratório de Usinagem Não Tradicional (UÑT) do Departamento de Engenharia Mecânica, e ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) do Departamento de Ciências Físicas, pelo apoio sem o qual teria sido impossível a realização desta dissertação;
- ⇒ Aos Técnicos Geraldino Martins (UÑT), Luís Eduardo Quirino (LEST), Ângela Maria da S. Andrade (LTM), Marta F. Queiroz e Janete A. de Fernandes (COPEM);
- ⇒ Aos colegas de Laboratório Luciano Antônio Fernandes, Evaldo Malaquias da Silva, João Cirilo da Silva Neto, Gualter Aurélio A. de Souza, Carlos Alberto D. Ramos e Rafael Luís Teixeira (IC) pela colaboração;
- ⇒ Aos professores do curso de pós-graduação pelos conhecimentos que adquiri durante a fase dos créditos;
- ⇒ À LIASA S/A, pela doação do Silício em pó;
- ⇒ A todos que de alguma maneira colaboraram para a realização desta dissertação.

**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**

SUMÁRIO

| | | |
|------------|--|----|
| Capítulo 1 | Introdução..... | 01 |
| Capítulo 2 | Textura e Integridade superficial de superfícies usinadas por descargas elétricas..... | 04 |
| | 2.1 – Textura superficial..... | 05 |
| | 2.2 – Integridade superficial..... | 07 |
| Capítulo 3 | O efeito da mistura de pós com fluido dielétrico nos parâmetros tecnológicos do processo de usinagem por descargas elétricas..... | 10 |
| | 3.1 - Fluido dielétrico..... | 10 |
| | 3.2 – Pós adicionados no fluido dielétrico..... | 10 |
| Capítulo 4 | Procedimento Experimental..... | 19 |
| | 4.1 – Máquina eletroerosiva empregada para a usinagem..... | 20 |
| | 4.2 – Equipamento de agitação da mistura..... | 21 |
| | 4.3 – Ferramental e materiais utilizados..... | 23 |
| | 4.4 – Variáveis de corte..... | 24 |
| | 4.5 – Avaliação da textura superficial..... | 26 |
| | 4.6 – Análise das microtrincas..... | 27 |
| Capítulo 5 | Resultados e Discussão..... | 28 |

| | |
|--|----|
| 5.1 – Acabamento Superficial..... | 28 |
| 5.2 – Microtrincas produzidas na região usinada..... | 35 |
| Capítulo 6 Conclusão..... | 42 |
| Capítulo 7 Referências Bibliográficas..... | 45 |

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

Resumo

Este trabalho investiga a topografia de superfície e a geração de microtrincas superficiais e subsuperficiais em peças de Aço Rápido ABNT M2, usinadas por descargas elétricas, com e sem adição de carboneto de silício em pó a três fluídos dielétricos comerciais A, B, C (identificados no trabalho), utilizando-se um eletrodo-ferramenta de cobre eletrolítico em regime de desbaste. A avaliação das microtrincas contou com a utilização dos microscópios eletrônico de varredura e óptico, e se deu através de dois parâmetros: a densidade de microtrincas e o valor médio de seus comprimentos. Para a avaliação da textura superficial, adotou-se o parâmetro Ra como parâmetro para análise do acabamento superficial, enquanto que a topografia de superfície foi avaliada através do microscópio eletrônico de varredura. De forma geral pode-se afirmar que as amostras usinadas com a adição de pós de SiC apresentaram significativas melhorias no acabamento superficial, quando comparadas com as usinadas com EDM convencional. Sob o ponto de vista das microtrincas, observou-se que a adição de pós não teve muita influência sobre o comprimento médio, no entanto, a ação destes foi mais positiva sobre a densidade. Tais resultados, confirmam que os pós penetram dentro do "gap" entre a ferramenta e a peça resultando em descargas elétricas mais uniformes e direcionadas.

Palavras-chave: Usinagem por Descargas Elétricas; Carboneto de Silício em Pó; Geração de Microtrincas; Topografia de Superfície; Aço Rápido ABNT M2.

RODRIGUES, J.R.P, 1999, *Effect of the Addition of Silicon Carbide powder on Microcrack Generation and on the Surface Topography in Electrical Discharge Machining of ABNT M2 High Speed Steel*, Msc dissertation, Federal University of Uberlândia, MG.

Abstract

This work investigates surface topography and microcrack generated by electrical discharge machining in workpieces of high speed steel (ABNT M2). Three different commercial dielectric fluids are used with and without addition of silicon carbide powder. Electrodes of electrolytic copper are used in roughing operations. The microcracks are evaluated using SEM analysis by two parameters: density and length. Surface finishing is measured by the average roughness parameter (Ra) and surface topography with studied within SEM. In general, the samples machined with the addition of powder of SiC presented significant improvements in the surface finishing, compared to samples machined by conventional EDM. It was observed that addition of SiC powder has no effect in the length of the microcracks. However, it affected microcrack density. The results suggest that the powder penetrates into the gap between the tool and the workpiece, resulting in more uniform and directed sparks.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 2.1: | Efeitos da tecnologia de superfície..... | 04 |
| Figura 2.2: | Grandezas de corte e parâmetros de desempenho do processo de usinagem por descargas elétricas..... | 06 |
| Figura 2.3: | Camadas superficiais e subsuperficiais de uma superfície usinada pelo processo de eletroerosão..... | 08 |
| Figura 3.1: | Mecanismo de propagação da descarga elétrica..... | 11 |
| Figura 3.2: | Relação entre a rugosidade superficial média (Ra) e a área usinada..... | 12 |
| Figura 3.3: | Relação entre a distância do gap e a dispersão das descargas..... | 13 |
| Figura 3.4: | Aspecto superficial e vistas tridimensionais das crateras geradas por uma descarga de um único pulso..... | 13 |
| Figura 3.5: | Aspecto superficial e secção transversal das crateras obtidas pelo processo EDM..... | 14 |
| Figura 3.6: | Diagrama esquemático do “gap”..... | 15 |
| Figura 3.7: | Efeito do tempo de acabamento na rugosidade superficial..... | 16 |
| Figura 4.1: | Fluxograma das etapas executadas para a realização do trabalho..... | 19 |
| Figura 4.2: | Máquina eletroerosiva (ENGEMAQ EDM 440 NC)..... | 20 |
| Figura 4.3: | Equipamento auxiliar para testes com adição de pó..... | 21 |
| Figura 4.4: | Posicionamento a cuba auxiliar dentro cuba da máquina de eletroerosão (Engemag)..... | 22 |
| Figura 4.5: | Vista do equipamento de agitação da mistura (fluido dielétrico + pó de SiC) com seus respectivos componentes..... | 22 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 4.6: | Representação esquemática do eletrodo-ferramenta de Cobre..... | 24 |
| Figura 4.7: | Configuração da geometria da peça usinada..... | 24 |
| Figura 4.8: | Esquema de medição do parâmetro Ra, para o acabamento superficial (a) Perspectiva -Sentido da medição. (b) Vista Superior - linha onde foram realizadas as medições..... | 26 |
| Figura 4.9: | Ilustração de como foi realizada a análise das microtrincas na região usinada pelo processo EDM..... | 27 |
| Figura 5.1: | Micrografia obtida por MEV da superfície usinada do aço rápido ABNT M2, com o fluido dielétrico A. Na foto (a), a usinagem foi feita sem adição de pó ao fluido dielétrico. Na foto (b) com adição de pó de SiC | 29 |
| Figura 5.2: | Micrografias obtidas por MEV da superfície usinada do aço rápido ABNT M2 com o fluido dielétrico B. (a) Superfície usinada sem pó adicionado no fluido dielétrico. (b) Com adição de pó de SiC..... | 29 |
| Figura 5.3: | Micrografia obtida por MEV da superfície usinada do aço rápido ABNT M2, com o fluido dielétrico C. Na foto (a) a usinagem foi feita sem adição de pó ao fluido dielétrico. Na foto (b), com adição de pó de SiC | 30 |
| Figura 5.4: | Vista superior das superfícies usinadas com o fluido dielétrico A, MEV. (a) Usinagem feita sem adição de pó. (b) com adição de pó de SiC | 30 |
| Figura 5.5: | Superfícies do aço rápido ABNT M2 usinadas com o fluido dielétrico B, MEV. (a) EDM sem pó. (b) Usinagem com pó de SiC adicionado ao fluido dielétrico | 31 |
| Figura 5.6: | Micrografias obtidas por MEV das amostras de aço rápido ABNT M2 usinadas com o fluido dielétrico C. (a) Sem adição de pó. (b) Usinagem com pó de SiC adicionado no dielétrico | 31 |
| Figura 5.7: | Vista superior das superfícies do aço rápido ABNT M2, usinado com adição de SiC ao fluido dielétrico B e obtidas por Microscopia Eletrônica, na qual se faz a análise pela diferença de número atômico. (elétrons retroespalhados)..... | 32 |

- Figura 5.8: Vista superior das superfícies usinadas do aço rápido ABNT M2 com fluido o dielétrico C sem adição de pó, obtidas por MEV..... 32
- Figura 5.9: Rugosidade superficial média (Ra) gerada na usinagem de peças de aço rápido ABNT M2 com fluidos dielétricos (óleos A, B e C) sem e com adição de pó de SiC no regime de desbaste..... 34
- Figura 5.10: Vista lateral obtida por MO da superfície usinada do aço rápido ABNT M2 com o fluido dielétrico A. Na foto superior tem-se a micrografia da superfície usinada sem pó e na inferior com adição de pó de SiC..... 35
- Figura 5.11: Secção transversal da superfície usinada do aço rápido ABNT M2 com o fluido dielétrico B, MO, atacadas através de *Nigreen*. Na foto superior, tem-se a micrografia da superfície usinada sem pó, e na inferior com adição de pó de SiC..... 36
- Figura 5.12 Secção transversal obtida por MO da superfície usinada do aço rápido ABNT M2 com o fluido dielétrico C, atacadas com o reativo *Nigreen*. Na foto superior a usinagem foi feita sem pó e na foto abaixo com adição de pó de SiC..... 37
- Figura 5.13: Vista lateral obtida por MO da superfície usinada do aço rápido ABNT M2 com o fluido dielétrico C, atacadas com *Nigreen*. Ambas as micrografias são de superfícies usinadas com adição de pó de SiC..... 38
- Figura 5.14: Comprimento médio das microtrincas ao longo da superfície usinada..... 40
- Figura 5.15: Quantidade de microtrincas por milímetro da superfície usinada..... 40

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabela 2.1: | Rugosidade superficial em função da variação da frequência e corrente..... | 05 |
| Tabela 2.2: | Variação da profundidade da microtrinca com a duração e energia do pulso..... | 08 |
| Tabela 4.1: | Propriedades químicas dos fluidos dielétricos identificados por seus respectivos fabricantes e usados nos ensaios definitivos para usinagem no regime de desbaste do aço rápido ABNT M2..... | 26 |
| Tabela 4.2: | Condições de corte adotadas para usinagem do aço rápido ABNT M2 com eletrodo-ferramenta de cobre eletrolítico no regime de desbaste..... | 26 |
| Tabela 5.1: | Espessura média das camadas superficiais e subsuperficiais e Zona Afetada pelo Calor (ZAC) sobre a superfície usinada do aço rápido ABNT M2, com e sem adição de SiC no fluido dielétrico no regime de desbaste..... | 41 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS:

| | |
|--------|---|
| Al | - Alumínio; |
| EDM | -Electrical Discharge Machining; |
| EF | - Eletrodo ferramenta; |
| FD | - Fluido dielétrico; |
| Gr | - Grafite; |
| JIS | - Japanese International Standard; |
| LTM | - Laboratório de Tribologia e Materiais; |
| MP | - Material da peça; |
| MF | - Máquina ferramenta; |
| MEV | - Microscopia Eletrônica de Varredura; |
| MO | - Microscopia Ótica; |
| Óleo A | - Valvoline DNC 03218; |
| Óleo B | - Querosene desodorizado; |
| Óleo C | -Tutela Agip-ut 396/EE; |
| PSWF | - Powder Suspended Working Fluid; |
| RS | - Rugosidade superficial; |
| RD | - Relação de desgaste; |
| Si | - Silício; |
| SiC | - Carboneto de Silício; |
| UÑT | -Laboratório de Usinagem Não Tradicional; |
| ZAC | -Zona Afetada pelo Calor. |

SIMBOLOS:

| | |
|----------------|--------------------------------------|
| F | - Frequência [KHz]; |
| I | - Corrente elétrica [A]; |
| R _a | - Rugosidade superficial média [µm]; |

| | |
|-----------|--|
| R_{max} | - Rugosidade máxima [μm]; |
| R_t | - Rugosidade total [μm]; |
| SL | - Sobrecorte lateral [μm]; |
| TRM | - Taxa de Remoção de Material [$\text{mm}^3 / \text{min.}$]; |
| T_{off} | - Tempo inativo de cada descarga [μs]; |
| T_{on} | - Tempo de duração de cada descarga [μs]; |
| V | - Tensão elétrica [V]. |

Capítulo 1

Introdução

A usinagem por descargas elétricas, ou electrical discharge machining (EDM), ou ainda Usinagem por Eletroerosão, é um processo excepcional para usinagem de formas complexas em materiais condutores elétricos, principalmente para aqueles de alta dureza, difíceis de serem usinados por processos tradicionais.

As maiores aplicações do processo estão na fabricação de matrizes para estampagem, forjamento, extrusão, fieiras para trefilação, moldes de plástico, enfim, para o setor de ferramentaria em geral (Cruz et al. 1999).

O aperfeiçoamento do processo EDM, através da melhoria de suas máquinas, acessórios e sistemas de controle, é uma realidade nas últimas décadas. A cada dia surgem novas idéias e projetos de otimização que asseguram a utilização em escala crescente do processo em todo mundo.

Nos últimos anos, inúmeros pesquisadores buscaram descobrir novas técnicas de se usinar materiais, uma vez que cada dia mais materiais têm sido submetidos a aplicações e trabalhos mais severos, exigindo uma maior sofisticação na produção e desenvolvimento dos mesmos. Com esta sofisticação aplicada aos materiais, surge a necessidade do desenvolvimento de processos refinados de usinagem por eletroerosão para fabricação de peças e componentes das mais variadas formas e dimensões com elevada precisão.

Novas tecnologias vem sendo empregadas em diversos campos da fabricação. Uma dessas, afeta diretamente o desempenho do processo EDM, e que sem dúvida tem ganhado grande impulso nos anos noventa, diz respeito a adição de pós metálicos ao fluido dielétrico.

Várias são as vantagens desta nova tecnologia, como: alta Taxa de Remoção de Materiais (TRM), bom acabamento superficial, alta relação de área usinada versus acabamento superficial, alta estabilidade do processo na geração dos pulsos de descargas, superfícies resistentes a corrosão e mesmo ao desgaste.

Entretanto, há um questionamento com relação ao processo EDM, no que diz respeito a *textura e integridade superficial* das peças usinadas. Recomenda-se posteriores processos de usinagem, para eliminação de camadas superficiais pobres em propriedades mecânicas, como

por exemplo usinagem eletroquímica (ECM) ou mesmo por processos tradicionais de usinagem, como o polimento.

Investigações feitas por Kobayashi (1995), confirmam que não só a adição de pó de silício no processo EDM, mas também de tungstênio e outros no fluido dielétrico, aumenta o desempenho na usinagem, reduzindo a camada superficial afetada pelo calor. Adicionalmente, a superfície usinada experimenta uma melhoria da resistência a corrosão, podendo ainda ter um enriquecimento de carbono. Com a adição de pós como por exemplo o silício, observa-se uma queda na rugosidade superficial, que era conseguida somente com inversão de polaridade e com a elevação da frequência de descargas elétricas.

Kobayashi et al. (1989) afirma que o uso de apropriado PSWF (Powder Suspended Working Fluid) gera uma superfície com $R_{\text{máx}} = 0.8\mu\text{m}$ em uma área de 25 cm^2 , reduzindo ainda extremamente o tempo de operação de acabamento. Verificou-se nos experimentos que o PSWF tornou o processo EDM mais estável, por causa da maior distância entre o eletrodo-ferramenta e a peça, e da boa dispersão de corrente de descarga, conforme será detalhado no capítulo 3 deste trabalho. Este comprovou que a dispersão de corrente de descargas é maior através de toda área do eletrodo na qual possa estar o PSWF.

Baseado nas investigações acima, acredita-se que a adição de carboneto de silício no fluido dielétrico torne também o campo elétrico mais uniforme, permitindo assim que as descargas elétricas sejam melhor distribuídas ao longo da região a ser usinada. Esse fato poderá assegurar uma remoção uniforme de material ao longo da superfície a ser usinada, gerando ainda uma menor quantidade de microtrincas e, portanto, uma superfície com poucas imperfeições.

Como atualmente muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas visando estudar o efeito da adição de pós no processo EDM, houve a idéia de pesquisar tal assunto, já que os trabalhos divulgados pelos autores citados anteriormente, apresentam resultados bastante satisfatórios na busca de melhorar desempenho do processo EDM. Os materiais usinados com tal mistura apresentaram excelentes características metalúrgicas tornando-os mais confiáveis em suas aplicações, quando comparado com similares obtidos por EDM convencional. O objetivo principal desta pesquisa é estudar o efeito da adição de pó de carboneto de silício (SiC) em vários fluidos dielétricos, sobre a topografia de superfície e microtrincas produzidas na camada superficial durante a usinagem por EDM do aço-rápido ABNT M2. A escolha desse aço se deve ao fato de ser bastante utilizado em ferramentas de corte, e sua aplicação só não é maior por causa de sua baixa usinabilidade por processos tradicionais de usinagem. Apesar de ser um aço facilmente usinado por EDM, a integridade da superfície usinada no entanto, fica comprometida, com formação de indesejáveis camadas refundidas e microtrincas superficiais. Surgiu assim a idéia da realização de testes no regime de desbaste, na máquina ENGEMAQ

440 NC, disponível no LTM (Laboratório de Tribologia e Materias) do DECIF da Universidade Federal de Uberlândia.

Segue abaixo um breve resumo a despeito dos assuntos que serão abordados em cada capítulo deste trabalho. No capítulo 2, faz-se um rápido estudo sobre algumas considerações gerais, sobre a textura e integridade superficial, apenas para uma recapitulação genérica para o leitor. Foi incluído no capítulo 3, uma abordagem sobre o efeito da mistura (pós de elementos de liga com fluido dielétrico) nos parâmetros tecnológicos do processo de usinagem por descargas elétricas, pois o assunto trata de uma nova técnica que está sendo desenvolvida para usinagem de metais e que está revolucionando o processo EDM. O capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada nos experimentos, bem como a indicação dos materiais, equipamentos, dispositivo etc, utilizados tanto na fase de pré-testes, testes como nas análises da textura superficial e densidade de microtrincas. Os resultados experimentais apresentados no capítulo 5, são acompanhados de uma aprofundada análise. No capítulo 6 são apresentadas conclusões do trabalho, acompanhadas de algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Textura e integridade de superfícies usinadas por EDM

Segundo Field e Kahles (1982), ao se usinar qualquer componente deve-se ter em mente que existem dois importantes aspectos que devem ser definidos e controlados. O primeiro está relacionado com as irregularidades geométricas da superfície e é denominado textura superficial, e o segundo, com as alterações metalúrgicas da superfície e camada subsuperficial, denominado Integridade superficial. No processamento de alguns produtos esses dois aspectos, textura superficial e integridade superficial, devem ser definidos, medidos e mantidos dentro dos limites especificados. A figura 2.1 mostra esses dois aspectos.

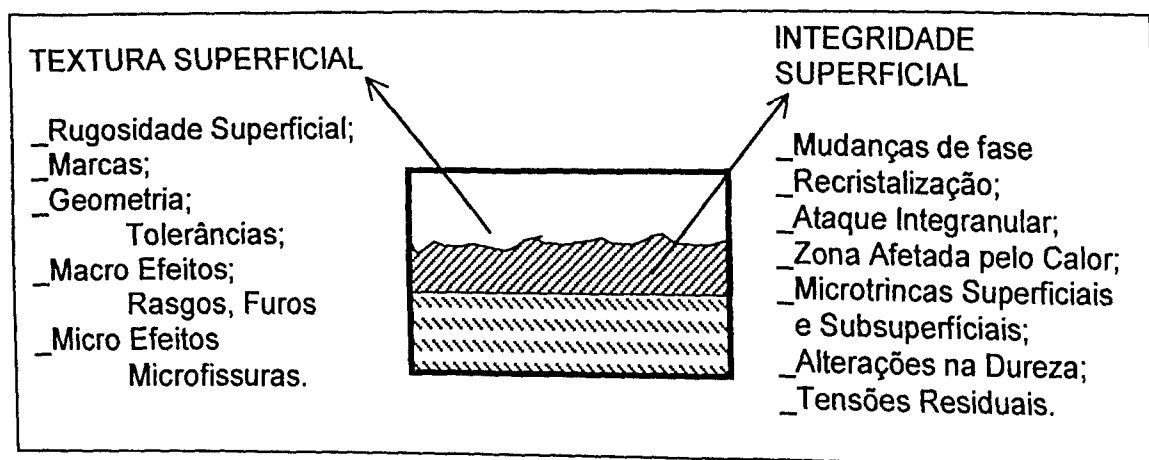


Figura 2.1: Efeitos do processo EDM na superfície usinada (Field e Kahles 1982).

Field e Kahles (1982) citam que as principais causas de alterações superficiais produzidas pelo processo de usinagem por eletroerosão são: altas temperaturas geradas no processo; reações químicas; excessiva corrente elétrica e densidade de energia durante a usinagem.

2.1 – Textura superficial

Segundo Kremer et al. (1997), durante cada descarga elétrica, altas temperaturas são geradas, causando fusão local ou mesmo evaporação do material a usinar. Em cada descarga, uma cratera é formada no material e uma pequena cratera é formada no eletrodo. De todo material fundido produzido em cada descarga, só 15%, ou menos, é removido através do líquido dielétrico. O restante do material fundido solidifica-se formando uma superfície rugosa. As características da superfície obtida, sobreposição de crateras, glóbulos de impurezas, "chaminés", bolhas (formadas quando os gases presos são liberados através do material resolidificado), são reveladas através de uma análise por microscopia eletrônica de varredura.

Segundo McGeough (1988), a rugosidade superficial da peça usinada pelo processo EDM, tende a diminuir com o aumento da frequência e com a redução da corrente. O referido autor relata que a usinagem por descargas elétricas tende a produzir uma superfície caracterizada por ser totalmente preenchida por pequenas crateras cuja profundidade e diâmetro variam de 2 a 13 μm e 12 a 60 μm respectivamente, quando se usina em regimes de baixa e alta energia.

Conforme Fuller (1989), o parâmetro rugosidade média R_a obtido em uma superfície usinada pelo processo EDM, atinge valores na faixa de 0.2 a 12.5 μm , tendo em vista que o tamanho da cratera varia diretamente com a energia da descarga e com regime de usinagem empregado. A formação dessas crateras também sofre influência do fluido dielétrico e do material do eletrodo empregado.

A forma e o volume de uma cratera gerada em uma superfície usinada por descargas elétricas, está diretamente relacionada com a taxa de remoção de material que determina por sua vez a rugosidade final da superfície (Mamalis et al. 1987).

Kahles (1985), mostra através da Tabela 2.1, como varia a rugosidade superficial, quando usina-se aço para matriz de alto teor de carbono e cromo, e com dureza de 62 a 64 Rockwell C.

Tabela 2.1: Rugosidade superficial em função da variação da frequência e corrente (Kahles 1985).

| Frequência (kHz) | Corrente [A] | Rugosidade Superficial - R_a [μm] |
|------------------|--------------|--|
| 5 | 1,0 - 20,0 | 5,00 - 12,5 |
| 10 | 5,0 - 17,0 | 3,75 - 5,00 |
| 20 | 4,0 - 12,0 | 2,5 - 3,75 |
| 450 | 3,0 - 9,0 | 1,25 - 1,80 |
| 1000 | 0,50 - 3,00 | 0,60 - 1,25 |

De acordo com Field e Kahles (1982), outra característica importante de uma superfície usinada pelo processo de usinagem por eletroerosão, é que a mesma não apresenta marcas que denotam a direção de avanço da ferramenta, como se pode notar nas superfícies originadas por processos de usinagem convencional.

A rugosidade superficial média (R_a) é um parâmetro de desempenho do processo que determina o acabamento final da peça. Esse parâmetro é função das variáveis de corte. Segundo Cruz (1989), as grandezas gerais do processo de usinagem por descargas elétricas, bem como suas interdependências, podem ser vistas na Figura 2.2.

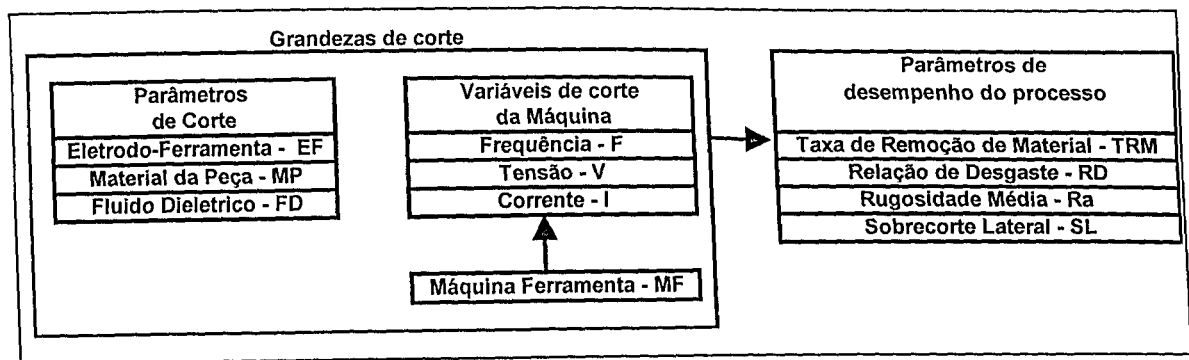


Figura 2.2: Grandezas de corte e parâmetros de desempenho no processo de usinagem por descargas elétricas (Cruz 1989).

Lee et al. (1987), sugerem que a corrente de um pulso possui um efeito dominante na rugosidade superficial quando comparado com a duração do pulso.

De acordo com Lim et al. (1991), a abundância de glóbulos na superfície se deve ao fato de gotículas de material fundido, serem expelidas das mais variadas formas durante as descargas e logo após se resolidificam na superfície da peça. Estas afetam fortemente a rugosidade superficial de peças usinadas por EDM.

Estes autores, fizeram várias tentativas para caracterizar os glóbulos produzidos em superfícies usinadas por EDM. Em amostras de aço AISI D6, observou-se que a densidade de glóbulos produzidos sob condição de desbaste podem ser relativamente alta: aproximadamente $50/\text{mm}^2$. De todos os glóbulos produzidos, mais de 75% apresentam diâmetros variando em torno de $20\mu\text{m}$.

Estes autores ainda afirmaram que os glóbulos produzidos por EDM podem ser geralmente divididos em 2 (dois) grupos. O primeiro compreende aqueles que são fragilmente aglutinados na camada de material refundido. Estes são principalmente pequenos, em forma de esferas aderidas ao substrato tanto em um como em dois pontos de contatos. Estes glóbulos podem ser facilmente desalojados por ataque químico. Exame cauteloso tem revelado

que em algumas instâncias muitos destes glóbulos neste grupo, podem ser unidos ao substrato pela pirólise do dielétrico (craqueamento do dielétrico). Estes são avaliados em 20 – 30% de todos os glóbulos produzidos na superfície da amostra por EDM. O segundo grupo, ou os glóbulos remanescentes, são firmemente fixado sobre a camada refundida. Estes variam em tamanho, apresentam-se por terem uma larga área de contato com o substrato, são resistentes ao ataque de reagentes e difíceis de serem removidos quimicamente. Os resultados do ataque, mostram que os glóbulos permanecem sobre a camada, e que a superfície muitas vezes torna-se severamente corroída pelos reagentes.

De acordo com Lee et al. (1987), a rugosidade média da superfície é também depende do tipo de material da peça utilizado. Para uma dada condição de descarga, este parâmetro é determinado pelas propriedades térmicas de rápido resfriamento do metal, pela ação do dielétrico e pelas condições de lavagem usadas.

2.2 – Integridade superficial

O processo físico envolvido na usinagem por descargas elétricas é um processo térmico, com um complexo mecanismo de remoção de material, em que há formação de um canal de plasma entre os eletrodos, com fusão e evaporação de material. Como resultado tem-se alterações nas características das camadas do material da superfície. Estas alterações superficiais determinam o comportamento em serviço das peças usinadas, e são incluídas no termo integridade superficial (Kremer et al. 1997). Como efeito metalúrgico e químico desse fenômeno térmico, tem-se uma zona afetada pelo calor que se divide em duas camadas, cujas espessuras são função da energia de descarga empregada em cada regime de usinagem, e são determinadas por diferentes critérios, tais como: alteração da dureza, tensões residuais e evidências metalográficas (Fuller, 1989).

De acordo com Field e Kahles (1982), em uma operação de acabamento o valor da espessura da zona afetada pelo calor é da ordem de 0.01mm, enquanto para o desbaste, esse valor é em torno de 0.13mm. A ação refrigerante do fluido dielétrico tende a diminuir esses valores. A Figura 2.3 mostra as camadas superficiais e subsuperficiais de uma amostra de aço logo após a usinagem por descargas elétricas.

Field e Kahles (1982), afirmam que a camada de material fundida espalhada sobre a superfície é normalmente trincada e, em alguns casos, porosa. Esta camada em alguns casos, chega a ser pequena e até inexistente na superfície de uma peça usinada em regimes que empregue baixa energia. Imediatamente abaixo desta superfície está a Zona Afetada pelo Calor que é dividida em duas outras. A primeira delas, situada logo abaixo da camada de material fundido é a camada de martensita não revenida, também conhecida como camada

branca. A segunda, imediatamente abaixo da primeira, é a camada de martensita revenida em altas temperaturas, conhecida como camada escura. A camada de martensita não revenida, é caracterizada por uma estrutura temperada e com elevada dureza. A camada de martensita revenida em altas temperaturas caracteriza-se por ser uma camada de material recozido cuja dureza é baixa. Fuller (1989) afirma que os efeitos da energia do processo sobre essas camadas são altamente dependentes do material usinado. Como exemplo, ele cita que, para aços-ferramenta, a primeira camada da zona afetada pelo calor de uma superfície usinada pelo processo de eletroerosão apresenta maior dureza na maioria dos materiais por causa da formação da martensita, enquanto que, a segunda camada dessa zona apresenta baixa dureza em decorrência da martensita revenida em altas temperaturas.

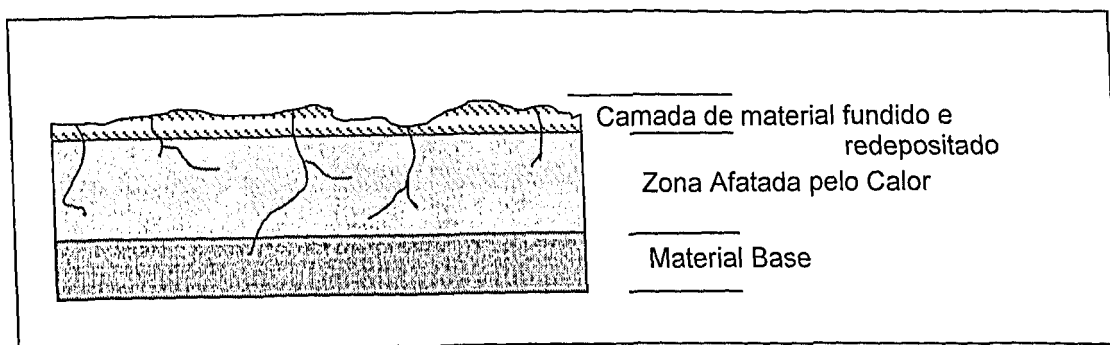


Figura 2.3: Camadas superficiais e subsuperficiais de uma amostra de aço usinada pelo processo de eletroerosão (Field e Kahles 1982).

Conforme Pandey e Shan (1985), a presença de microtrincas nas camadas superficiais e subsuperficiais é bastante comum, principalmente quando se usina materiais de dureza elevada contendo por exemplo, carbonetos de tungstênio sendo o comprimento dessas microtrincas dependente do tipo de material usinado bem como dos parâmetros elétricos, tais como: a energia e a duração dos pulsos. A Tabela 2.2 fornece o tamanho das microtrincas observadas na usinagem de cermets. Através da Tabela abaixo, observa-se que a profundidade das microtrincas aumentam com a energia e duração dos pulsos.

Tabela 2.2: Variação da profundidade da microtrinca com a duração e energia do pulso (Pandey e Shan 1985).

| <i>Duração do pulso (μs)</i> | <i>Energia do pulso (J)</i> | <i>Profundidade da microtrinca (μm)</i> |
|---|-----------------------------|--|
| 90 | 0.5 | 21 - 63 |
| 1000 | 0.5 | 84 - 252 |
| 90 | 1.0 | 53 - 126 |
| 330 | 4.5 | 85 - 235 |

De acordo com Fuller (1989), na usinagem de uma peça pelo processo de usinagem por descargas elétricas, uma pequena quantidade de material do eletrodo-ferramenta bem como carbono do fluido dielétrico, pode ser depositado na superfície dessa peça, e em se tratando de aço, carbono extra na camada superficial pode resultar no surgimento de mais martensita e consequentemente, em um aumento da suscetibilidade à formação de microtrincas.

A abundância de microtrincas está diretamente relacionada com a elevada energia da descarga. Estas microtrincas são resultados de excessivas tensões térmicas, devido ao resfriamento da superfície logo após a descarga elétrica. Em uma dada energia da descarga, a densidade de microtrincas é inversamente proporcional à espessura da camada refundida (Lee et al. 1987).

Uma característica importante das superfícies usinadas por EDM, é a abundância dessas microtrincas superficiais. A formação de microtrincas está associada com o desenvolvimento de altas tensões térmicas que excedem a tensão máxima de resistência do material. As dimensões das crateras assim como a sua densidade, aumentam com a energia da descarga. Além disso, a profundidade das microtrincas variam com a energia de descarga (Kremer et al. 1997).

Segundo Thomson (1989), o aumento na temperatura da superfície, o efeito do resfriamento brusco e a grande tensão residual, promove um aumento no número de microtrincas. Segundo este autor, o uso de pulsos de curta duração ($< 10\mu\text{s}$) reduz a espessura da camada de material refundida e, consequentemente o tamanho e o número de microtrincas.

Para um estudo mais aprofundado da Textura e Integridade Superficial no processo de usinagem por descargas elétricas, podem ser consultados os seguintes trabalhos: Thomson P.F. (1989), McGeough (1988, páginas 129 – 130), Benedict (1987, páginas 207 – 210), Kremer et al. (1997), Engemaq, (1996, página 16 - 17).

Capítulo 3

O efeito da mistura de pó metálicos com fluido dielétrico nos parâmetros tecnológicos do processo EDM.

Apresentam-se neste capítulo as características e funções do fluido dielétrico no item 3.1, e o efeito da adição de pós no processo EDM no item 3.2.

3.1 - Fluido dielétrico

De acordo com Fuller (1989), o fluido dielétrico realiza algumas funções no "gap", que são fundamentais para o processo EDM:

- ⇒ Conduzir as descargas elétricas;
- ⇒ Remover materiais estranhos ou produtos sólidos da usinagem (lavagem);
- ⇒ Refrigerar.

Das três funções, a primordial para eficiência do processo é a lavagem dos produtos gerados durante a usinagem. A explicação está no fato da lavagem evitar os curtos circuitos e a estagnação do fluido dielétrico causando uma TRM baixa (Benedict 1987).

O fluido dielétrico deve apresentar algumas características básicas, tais como: ser do tipo sintético, apresentar alto ponto de fulgor, ter alta rigidez dielétrica, possuir uma alta capacidade de refrigeração, ser quimicamente neutro, ter baixa viscosidade. Também deve ser inofensivo do ponto de vista de toxicidade e corrosão ENGEMAQ (1996).

3.2 – Pós adicionados no fluido dielétrico

Os primeiros passos para a utilização desta tecnologia foram dados por Kurafuji e Suda (1965), que, ao analisar a influência dos vários fluidos dielétricos, perceberam que o tempo de uso dos mesmos aumenta a Taxa de Remoção de Material (TRM). Esse comportamento foi atribuído ao fato dos resíduos serem formados em uma concentração específica. Além disso,

afirmaram que a maior estabilidade no processo foi devido a resistência no "gap" ser consideravelmente menor e de haver um aumento no decorrer do processo. Estas afirmações são justificáveis através da Figura 3.1, que mostra o efeito de propagação da descarga na presença dos resíduos (fragmentos de usinagem).

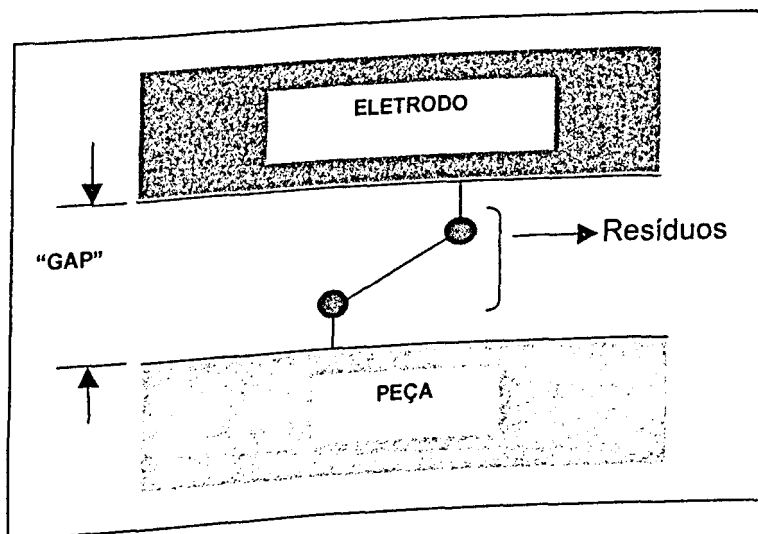


Figura 3.1: Mecanismo de propagação da descarga elétrica (Kurafuji e Suda 1965)

Kobayashi (1995) descobriu que pode-se gerar áreas especulares relativamente grandes (acima de 10cm^2) na operação de acabamento, ao se utilizar um eletrodo de silício no processo de usinagem por descargas elétricas. O mesmo autor apresentou resultados, mostrando que a adição de pó de silício no fluido dielétrico promove uma superfície especular com uma área acima de 500cm^2 . A Figura 3.2, mostra a relação da rugosidade superficial média (R_a) e a área usinada. Observa-se que a rugosidade superficial (R_a) gerada por processo de usinagem por descargas elétricas, com fluido misturado com pó de silício, quase não aumenta mesmo com o aumento, da área usinada.

Segundo esse autor, a tendência acima baseia-se na larga dispersão das descargas sobre a peça. Esta dispersão é muito relacionada com o "gap" (distância entre o eletrodo-ferramenta e a peça), que torna-se grande pela mistura do pó de silício no fluido dielétrico. O "gap" relativamente grande, garante descargas elétricas estáveis e consequentemente dispersas sobre uma extensa área da peça. A Figura 3.3, mostra a relação entre a distância do "gap" e a dispersão das descargas. O processo de usinagem por descargas elétricas com fluido misturado com pó de silício permite uma maior dispersão das descargas, além de reduzir a capacitância no "gap" pelo aumento do seu comprimento em

aproximadamente 5 vezes em relação a EDM convencional, tomando a superfície mais polida. O próprio Kobayashi et al. (1989), menciona em artigos anteriores, que no caso de operações de acabamento com o fluido convencional, a distância entre eletrodo e peça é tão pequena, que descargas anormais ocorrem várias vezes.

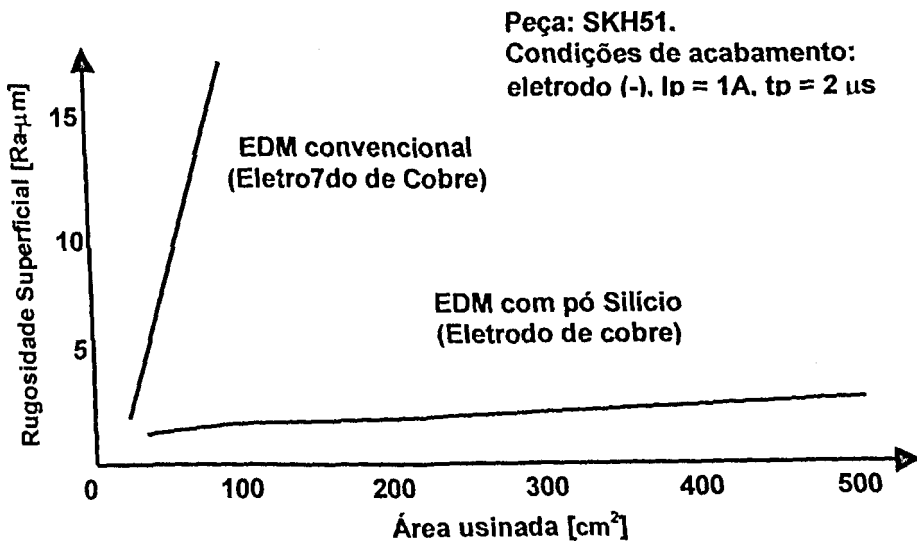


Figura 3.2: Relação entre a rugosidade superficial média (R_a) e a área usinada (Kobayashi 1995).

Okada e Uno (1997), investigaram experimentalmente o efeito da mistura de pó de silício no mecanismo de geração de superfície. Estes analisaram a forma da cratera gerada por uma descarga de um único pulso, o impacto da força agindo na peça e a rugosidade. Para isso foi utilizado um eletrodo de cobre de diâmetro de 15mm, querosene como fluido dielétrico, pó de silício com granulometria de $15\mu m$ com uma concentração de 23.28 g/l, além de ferramentas de aço-carbono SK3, aço-liga SKD11 e SKD61 em especificações da JIS. As condições de usinagem foram as seguintes: tensão de 90 V, corrente de 3 A, duração do pulso em torno de $3\mu s$ e eletrodo com polaridade negativa.

Os resultados obtidos por Okada e Uno (1997), quando estes investigavam as formas das crateras, podem ser visualizados na Figura 3.4. Ao utilizar querosene sem adição de pó, observou-se uma cratera bastante irregular. Por outro lado, com fluido misturado com pó de Si, observou-se uma cratera circular bem definida e com diâmetro menor apresentando-se como extensão de ondas circulares. Nesse caso, a superfície apresentou-se levemente ondulada.

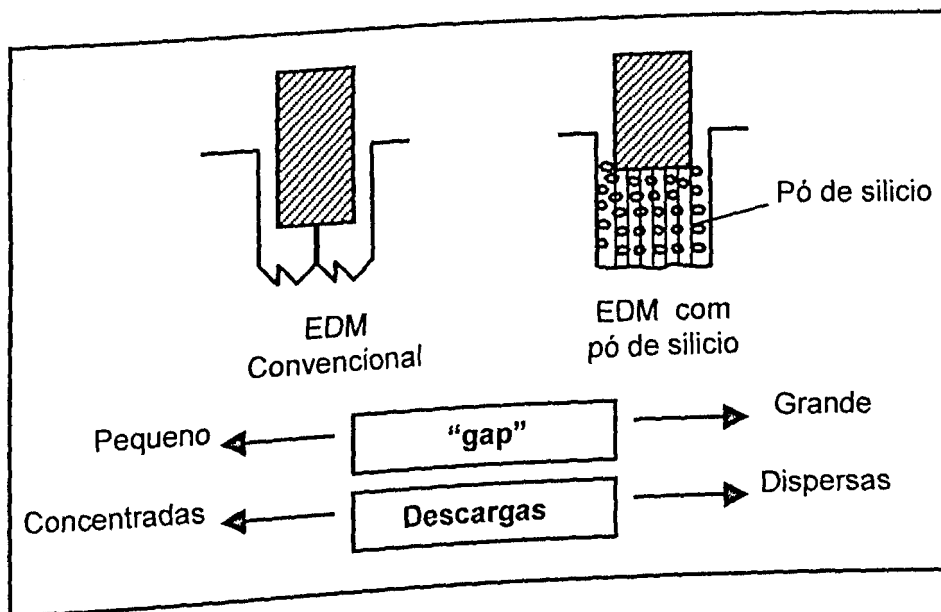


Figura 3.3: Relação entre o "gap" e a dispersão das descargas (Kobayashi 1995).

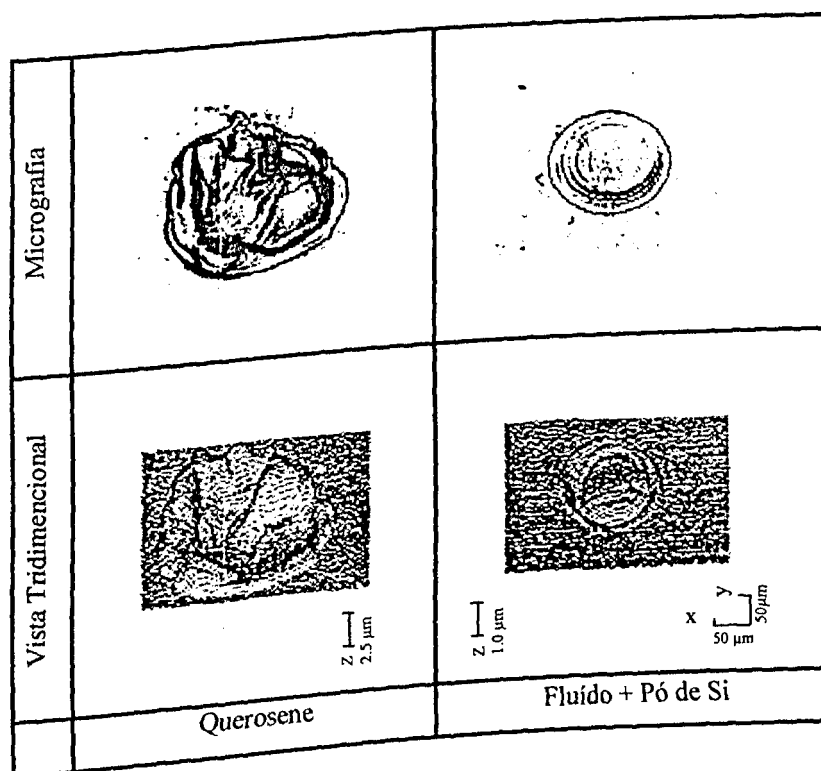


Figura 3.4: Aspecto superficial e vistas tridimensionais das crateras geradas por uma descarga de um único pulso (Okada e Uno 1997).

A Figura 3.5 mostra o aspecto superficial e a secção de crateras geradas no aço SK3 obtida por Okada e Uno (1997). A parte branca mostrada na superfície da amostra, é usualmente denominada de camada branca, sendo gerada pela resolidificação do material da

peça. A dureza da camada branca é geralmente mais elevada do que a do metal base (aço), por causa da carbonetação provocada pelo aquecimento do carbono proveniente do fluido dielétrico, seguido de um rápido resfriamento do metal fundido ocasionado pelo fluido dielétrico. A microestrutura final, consiste de martensita, austenita retida e carbonetos não dissolvidos. A mesma figura mostra, que utilizando-se somente querosene, o metal fundido que encontra-se dentro de uma cratera, é impulsionado para os lados devido ao impacto da força da descarga elétrica. No caso da mistura (fluido + pó de silício), esse efeito não foi observado. Consequentemente a maior parte do metal fundido remanescente é expelida para fora radialmente. Resultados similares foram obtidos em amostras de aço SKD11 e SKD61. Okada e Uno (1997) concluem, que a forma das crateras geradas é fortemente determinada pelo impacto da força das descargas sobre a peça.

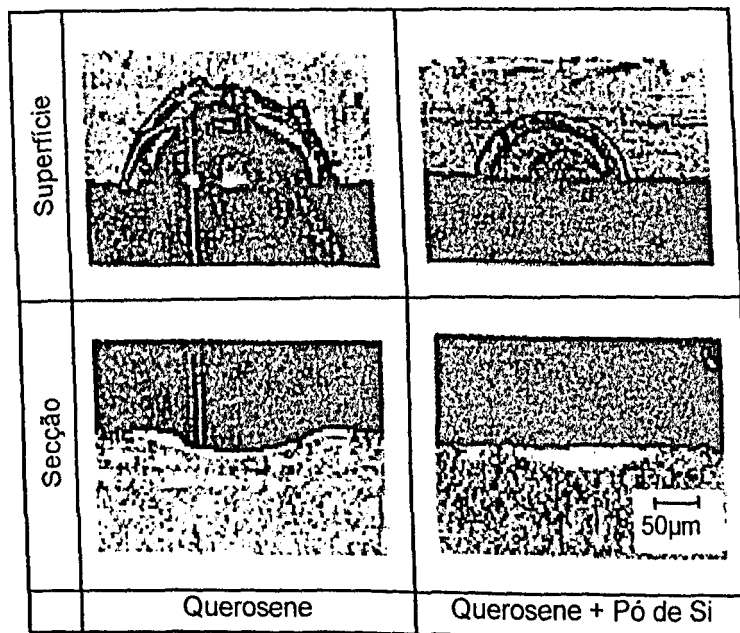


Figura 3.5: Aspecto superficial e secção transversal das crateras obtidas pelo processo EDM (Okada e Uno 1997).

Na figura 3.6 apresenta-se o diagrama esquemático da distância entre o eletrodo e a peça quando ocorre a descarga de único pulso sugerido por estes autores. É mostrado na figura, que o "gap" teve um comprimento de $92\mu\text{m}$ ao se utilizar do fluido misturado com pó de silício, enquanto para querosene a distância foi $17\mu\text{m}$ sob as mesmas condições (voltagem de 90V, corrente da descarga de 3A, pulso de $2\mu\text{s}$). Isto é devido à diferença de resistividade dos fluidos dielétricos e também à influência de detritos em movimento no "gap". Portanto o impacto da força ocorre devido às diferenças de descargas elétricas, que diferem entre os dois casos, por causa da diferença no "gap".

Estudos realizadas por Okada e Uno (1997), mostram que a diferença da propagação de calor entre o metal de base e o carboneto, causado pela rápida elevação da temperatura devido às descargas elétricas, induz o crescimento da trinca.

Após o ataque químico da superfície de alguns aços, Okada e Uno (1997), observaram que suas estruturas, apresentavam em alguns casos carbonetos finamente dispersos, enquanto que para outros isso não acontecia. Baseado neste fato, os mesmos autores julgaram que a rugosidade superficial após a EDM com fluido misturado com pó de silício, depende de como os carbonetos precipitados estão distribuídos no material da peça, visto que os carbonetos desaparecem devido ao impacto térmico durante a EDM, provocando assim o surgimento de pequenas depressões na superfície. Portanto estes concluíram, que é necessário encontrar condições de usinagem aceitáveis sem que carbonetos saiam da superfície, ou até mesmo, o desenvolvimento de um novo material no qual os carbonetos estejam finamente dispersos, para melhorar a rugosidade superficial logo após o processo EDM.

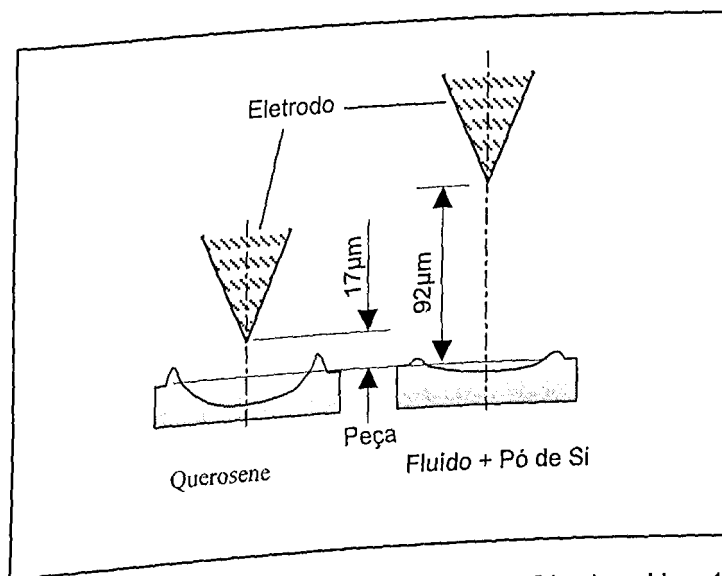


Figura 3.6: Diagrama esquemático do "gap" (Okada e Uno 1997).

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

consideração o fato de haver uma grande quantidade de pó de silício fora do eletrodo na região do "gap". Este afeta o acabamento, mesmo com o uso de eletrodo de cobre.

Constatou-se pelos resultados dos experimentos realizados por Kobayashi et al (1989), que a utilização de diversos tipos de pós, tais como silício (Si), alumínio (Al) e grafite (Gr), adicionados em um óleo hidrocarbonos é bastante efetiva no sentido de se conseguir um fino acabamento em curto tempo de usinagem. Pós de Al, Gr produzem uma superfície mais uniforme do que uma por Si (Silício) sobre as mesmas condições de usinagem. Comprovou-se que a dispersão de corrente de descargas é maior através de toda área do eletrodo na qual possa estar o fluido misturado com pós. Isso torna o processo EDM com pós adicionados no fluido altamente atrativo na indústria, uma vez que superfícies com melhores características técnicas podem ser obtidas.

Conforme o autor acima, o processo por EDM sem adição de pós no fluido dielétrico, pode levar ao surgimento de um elevado número de microtrincas sob a superfície acabada. Os pós misturados no fluido dielétrico melhoram o acabamento superficial e reduzem a quantidade de microtrincas sob a superfície usinada. Este aspecto é melhor explicado pelo impacto da força, conforme foi colocado por Okada e Uno (1997) e já citado anteriormente.

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

Kobayashi et al. (1989) evidenciam através da Figura 3.7, que a adição de pó de alumínio no fluido dielétrico é muito mais eficiente e capaz de melhorar o tempo de usinagem alcançando assim um alto nível de acabamento para um mesmo tempo de operação, quando comparado com o EDM convencional.

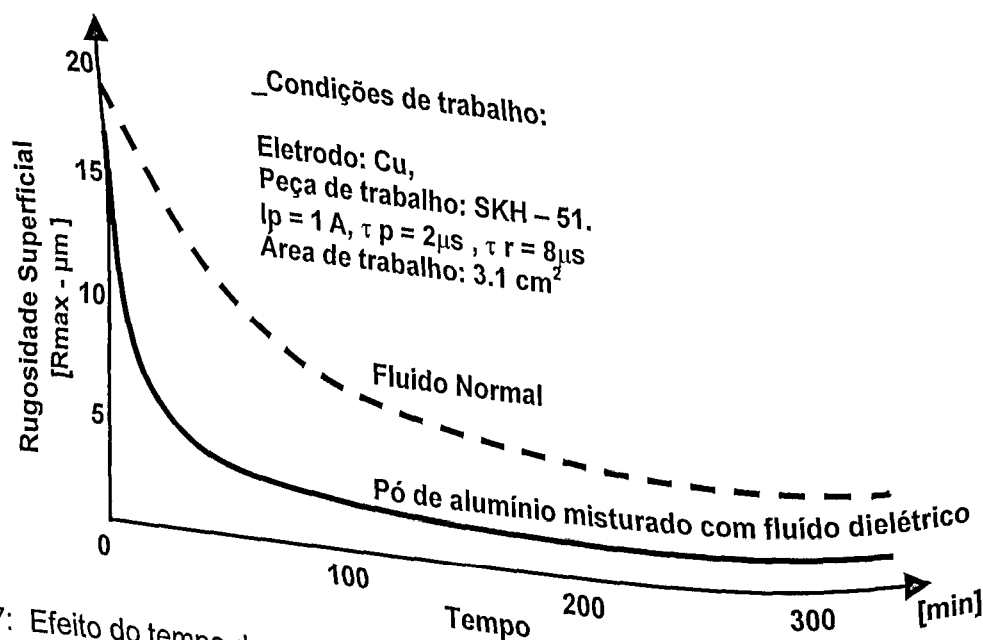


Figura 3.7: Efeito do tempo de acabamento na rugosidade superficial (Kobayashi et al. 1989)

Conforme Kobayashi et al. (1989), algumas vantagens são obtidas devido a uma maior distância do "gap" durante a produção de uma superfície finamente acabada: facilidade de remoção dos produtos de erosão pela ação lavagem do dielétrico e estabilização da movimentação do eletrodo. Além das vantagens acima, os mesmos autores abordam outras obtidas durante a dispersão descarga que podem ser: a) Produção de uma superfície uniforme; b) Prevenção quanto a ocorrência de descargas de arcos concentrados; c) Redução do tempo de usinagem em regime de acabamento.

De acordo com Ming e He (1995), a resistência à fadiga de uma superfície usinada por EDM é sempre menor que aquela usinada por processos convencionais. Esta condição pode ser melhorada pela adição de pós de partículas condutoras no fluido dielétrico. Os pós adicionados no fluido dielétrico podem reduzir a queda de voltagem do fluido dielétrico, aumentar a distância do "gap" e permitir descargas uniformes. Portanto, as tensões térmicas e a formação de microtrincas podem ser reduzidas consideravelmente.

Investigações realizadas por Ming e He (1995), destacam que durante o processo EDM, 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 perda de elementos de liga, porém a quantidade de carbono continua a crescer. Na mesma investigação, os referidos autores obtiveram os outros resultados:

a) *A relação entre os pós e a fase do material da superfície usinada*

Através de difração de raios-X, constatou-se que ao se usinar com pós, pode-se aumentar a quantidade de martensita e reduzir a quantidade de austenita retida e cementita remanescentes na superfície usinada.

b) *Relação entre a adição de pós e a redução das camadas geradas na superfície usinada.*

Pode ocorrer a redução das duas camadas na superfície usinada: a primeira é a camada fundida e redepositada e a segunda é a zona afetada pelo calor. Na camada de material fundido há um enriquecimento de carbonos pela decomposição do dielétrico (hidrocarbonetos existente) ou do eletrodo (no caso de grafite) tal como é abordado por Kremer et al. (1997). Depois de aquecida e de ser rapidamente resfriada, há uma tendência para as microtrincas ocorrerem facilmente. Quando adiciona-se pós no fluido dielétrico, as descargas atuam em maiores quantidades e a superfície da amostra será aquecida mais uniformemente, com isso tem-se uma camada refundida e resolidificada mais fina e melhor distribuída sobre a região usinada, e as trincas serão pequenas e em pouca quantidade.

c) **Relação entre a adição de pós e a microdureza**

Quando usinada com querosene, a microdureza da camada superficial é menor do material base. Porém ao se adicionar pós no fluido, acontece uma situação inversa, o que ocorre devido à existência de mais martensita na camada, propiciando o aumento da microdureza.

Jeswani (1980), ao analisar a influência de pós de grafite no fluido dielétrico, observou que havia uma mudança nas características de ionização e desionização do líquido, permitindo uma grande quantidade de descargas elétricas por unidades de tempo. Este observou também que o aumento na frequência da descarga está diretamente relacionado com a queda da tensão de voltagem quando ocorre a descarga elétrica.

Experimentos realizados adicionando-se pó de níquel no fluido dielétrico durante a usinagem de moldes de ligas metálicas de alumínio e bronze, mostram que a espessura da camada de material refundida e resolidificada, além de apresentar-se rica em níquel, tornou-se fina e uniformemente distribuída com o aumento da concentração de pó no fluido dielétrico. Também observaram que a superfície usinada adquire uma dureza maior e mais resistente ao desgaste abrasivo, além de ter uma melhora significativa no acabamento superficial. A taxa de remoção de material teve aproximadamente os mesmos resultados quando comparado com aqueles obtidos na usinagem do aço, além de verificar que o desgaste do eletrodo foi relativamente mais baixo (Uno et al 1997).

Capítulo 4

Procedimento Experimental

Apresenta-se na Figura 4.1 a metodologia geral adotada nos experimentos. Como se nota no referido fluxograma, os experimentos compõem-se de duas etapas: a usinagem de alguns corpos de prova por EDM, e avaliação da textura e microtrincas produzidas pela referida usinagem. Os detalhes com os quais foram executados os trabalhos nessas duas fases, estão expostos nos subitens que seguem este capítulo. Assim, no item 4.1 descreve-se sucintamente a máquina EDM empregada. Em 4.2, apresenta-se o sistema de mistura e agitação do fluido dielétrico com pós adicionados, especialmente desenvolvidos para este trabalho. No subitem 4.3 trata do ferramental utilizado, bem como dos materiais empregados nos ensaios. No item 4.4 apresenta-se as variáveis de corte empregadas no trabalho, selecionadas após a realização de alguns ensaios preliminares. Os itens 4.5 e 4.6, resumem as informações importantes de como foram feitos, respectivamente a avaliação de textura superficial e das microtrincas produzidas.

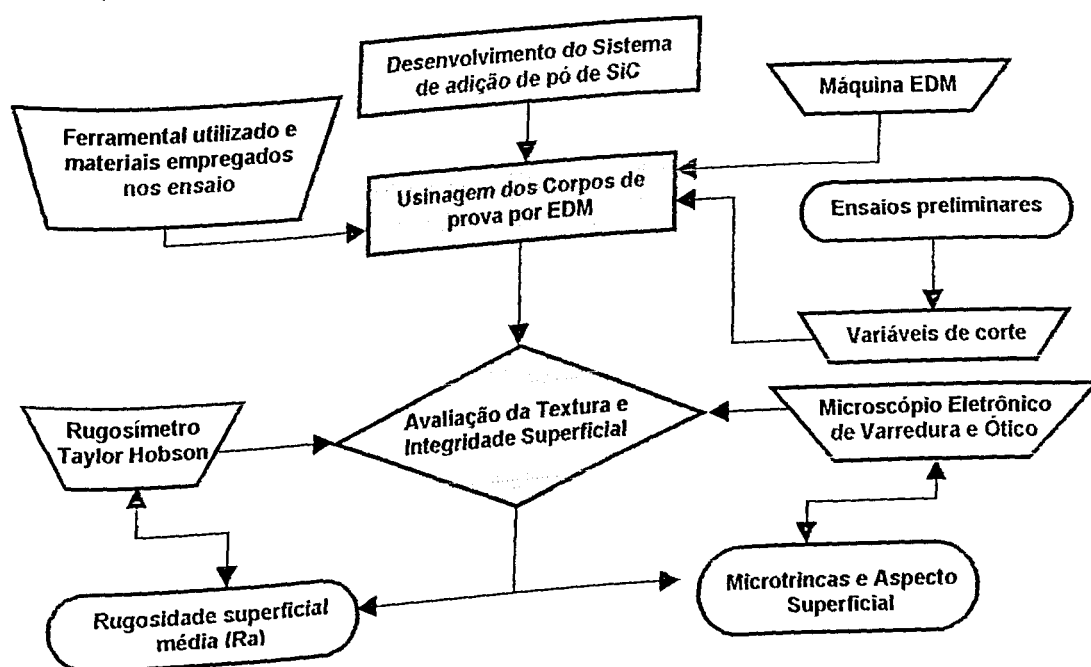


Figura 4.1: Fluxograma das etapas executadas para a realização do trabalho.

4.1 – Máquina eletroerosiva empregada para a usinagem

A fase experimental deste trabalho, foi realizada em uma máquina eletroerosiva Engemaq instalada no Laboratório de Tribologia e Materiais da UFU, cujo aspecto é o que se apresenta na Figura 4.2. Os detalhes do equipamento poderão ver vistos no manual de operação da máquina Engemaq. Trata-se de um equipamento desta década, sem CNC, operando automaticamente após seleção dos níveis de operações possíveis, mediante prévia seleção das teclas disponíveis no painel gerador. Consta basicamente de um compartimento para circulação do fluido dielétrico, um compartimento hidráulico para acionamento do cabeçote, a unidade mecânica propriamente dita, onde se situa o servomecanismo para a manutenção do gap constante e a fonte de corrente retificada que proporciona se obter vários níveis de regime, desde o desbaste mais grosseiro ao microacabamento, além de se permitir variar Ton e Toff e outros parâmetros elétricos, tais como corrente (I) e tensão (V). Tal fonte tem potência total de 6.0 kVA e proporciona uma corrente máxima de 60 A e tensão máxima de 100V.

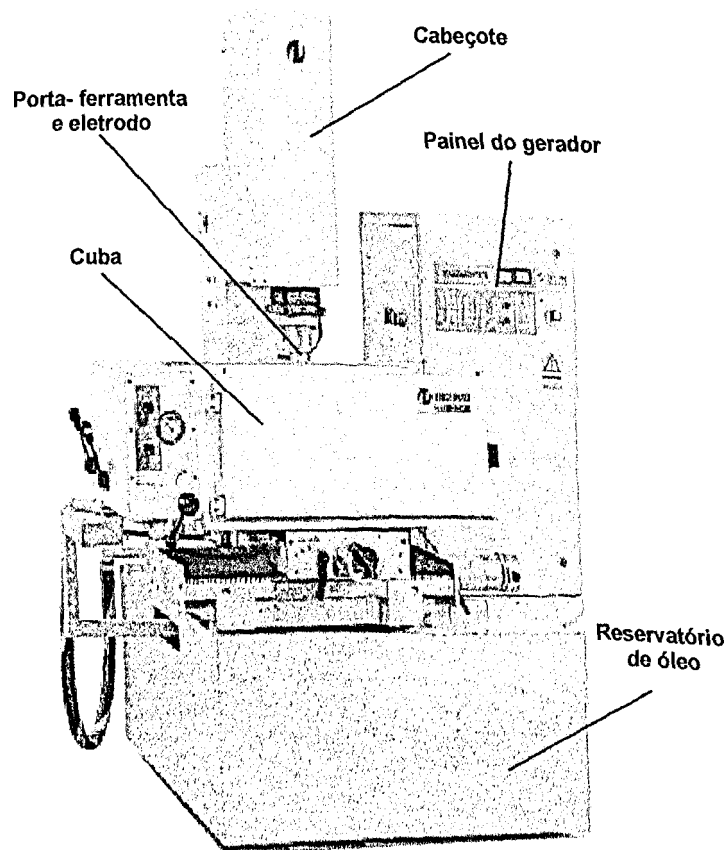


Figura 4.2: Máquina eletroerosiva (ENGEMAQ EDM 440 NC).

4.2 – Equipamento de Agitação da mistura (dielétrico + pó)

O objetivo principal após o desenvolvimento do agitador, era fornecer a mistura dielétrica mais pó na vazão pré-escolhida de forma homogênea, além de uma concentração adequada, bem como o modo de adição do pó de SiC, permitindo que os pós em suspensão atuassem ao redor das descargas elétricas, direcionando-as na região do "gap" durante a usinagem, permitindo assim que o arco elétrico se comportasse o mais uniforme possível em todos os testes. As Figuras 4.3 e 4.4 mostram respectivamente um esquema do sistema de agitação com seus componentes e o posicionamento da cuba auxiliar dentro da cuba da máquina de eletroerosão (Engemaq).

Outros objetivos para construção do misturador foram: Não utilizar o circuito dielétrico da máquina de modo a não danificá-lo com a contaminação dos pós adicionados aos dielétricos e utilizar apenas uma pequena quantidade de fluido, já que o reservatório da máquina comporta cerca de 420 l. O equipamento consiste de um mini-reservatório (B) de fluido dielétrico com capacidade para 36 l; Uma bomba (C) de 3480 rpm e potência de 1/3 CV / 242.64W, para circulação do dielétrico; tubulações rígidas e flexíveis de PVC Ø 20mm; porta eletrodo, para circulação do dielétrico; Agitador (A) de 3000rpm e potência eletrodo; eletrodo-ferramenta de cobre eletrolítico (G e H); Válvulas esfera (D, E e F), do motor de 0.42 CV / 308.82W; uma cuba (I) (250mm x 250mm x 250mm); Válvulas esfera (D, E e F). A Figura 4.5 mostra o equipamento responsável pela mistura do fluido dielétrico com o pó de SiC.

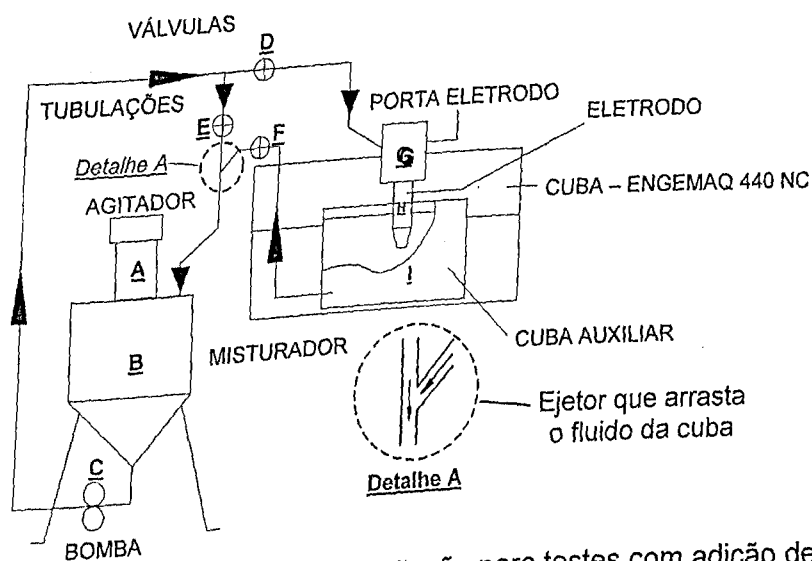


Figura 4.3: Equipamento auxiliar de Agitação para testes com adição de pó.

Com base na Figura 4.3, o princípio de funcionamento do sistema pode ser explicado da seguinte maneira: A mistura foi preparada em uma concentração de 30 g/l, adicionada no reservatório (B), onde foi misturada por ação de um agitador (A) e enviada para as tubulações do reservatório (B), onde foi misturada por ação de um agitador (A) e enviada para as tubulações

por meio de uma bomba (C) até atingir a válvula (D), Esta por sua vez dosou a vazão da mistura na medida certa para atingir o porta-ferramenta (G). Toda a mistura em excesso retorna até o reservatório (B) por meio da válvula (E). Após passar pela região do "gap" no interior da cuba (I), a mistura sofre a ação de um campo magnético, onde os resíduos metálicos proveniente da peça (aço rápido ABNT M2) eram retidos, permitindo assim que uma boa parte da mistura, retornasse ao reservatório pela ação de um venturi (Detalhe A mostrado na Figura 4.3).

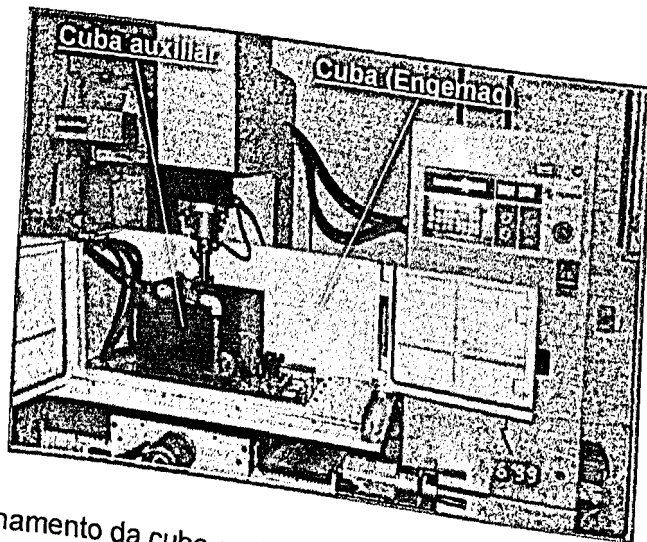


Figura 4.4: Posicionamento da cuba auxiliar dentro cuba da máquina EDM (Engemaq)

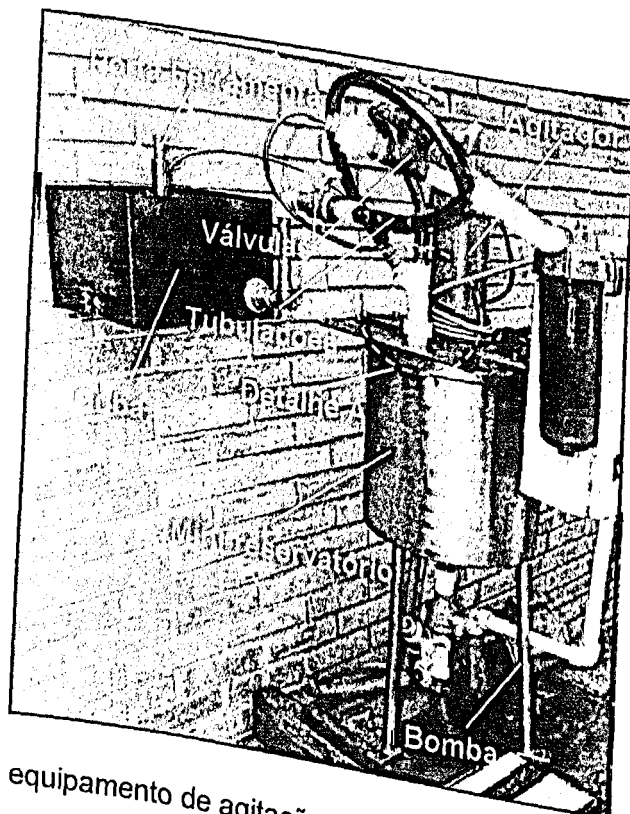


Figura 4.5: Vista do equipamento de agitação da mistura (fluido dielétrico + pó de SiC) com seus respectivos componentes.

4.3 – Ferramental e Materiais Utilizados

Como se sabe, o ferramental no processo EDM consiste do projeto da peça a ser usinada (operação de usinagem), do projeto do dispositivo de fixação da peça e da ferramenta e do sistema de lavagem. (Cruz et al. 1999).

Em virtude deste trabalho ser desenvolvido aplicando-se eletrodo de cobre durante o processo de usinagem por descargas elétricas, menciona-se aqui algumas características específicas, que serão de fundamental importância para compreensão deste trabalho. O corte lateral da ferramenta e vista lateral da peça de aço rápido ABNT M2 são mostradas na Figura 4.7.

- _Ponto de fusão: 1083 ° C;
- _Ponto de ebulição: 2580 ° C;
- _Resistividade elétrica: 0.017 $\mu\Omega\text{m}$;
- _Modulo de Elasticidade: $124 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$;
- _Larga utilização;
- _Baixo custo;
- _Quando retificado produz acabamento superficial preciso.

Foram utilizados também peça de aço rápido ABNT M2 da marca tool master (chamadas de "Bits") com a seguinte composição química: 0,85% de Carbono; 4,30% de Cromo; 1,90% de Vanádio; 6,40% de Tungstênio e 5,00% de Molibdênio e, segundo o fabricante, sua dureza varia de 64 a 66RC. Entretanto, testes realizados em 27 amostras, em um total de 25 medições, apresentam uma dureza média de 60 HRc com desvio padrão de 4.0 pontos. A escolha deste material se deve ao fato de ser o mesmo largamente utilizado na fabricação de ferramentas, e principalmente por ser considerado um material de difícil usinagem por processos convencionais de usinagem.

O material utilizado foi adquirido na forma de barras de seção quadrada de 9.525 mm de lado, e comprimento de 127 mm. Quanto à procedência, o material utilizado foi fabricado pelo fornecedor Avibas e beneficiado por Tool Master Ind. Metalúrgica Ltda.

O motivo para a fabricação da geometria do eletrodo-ferramenta mostrada na Figura 4.6, está diretamente relacionada com a lavagem, isto é, a circulação da mistura entre o eletrodo e a peça. A injeção do dielétrico por dentro do eletrodo associadas com o mecanismo de avanço e retrocesso ultra-rápido da máquina, permite a obtenção de condições de limpeza adequadas, que são essenciais para a se obter melhores rendimentos durante a usinagem dos "bits". Outra colocação importante, é que a conicidade existente na extremidade do eletrodo,

permite que os resíduos proveniente da usinagem passem lateralmente pela zona de trabalho entre o eletrodo e a peça.

De acordo com Lima (1997), a geometria apresentada na Figura 4.7 favorece vários fatores dentre os quais citamos: maior facilidade nos exames com microscópio ótico e eletrônico; facilidade na obtenção da rugosidade superficial e por possibilitar o ensaio dinâmico de flexão como método indireto de avaliação da integridade da superfície usinada com a mínima introdução de tensão residual.

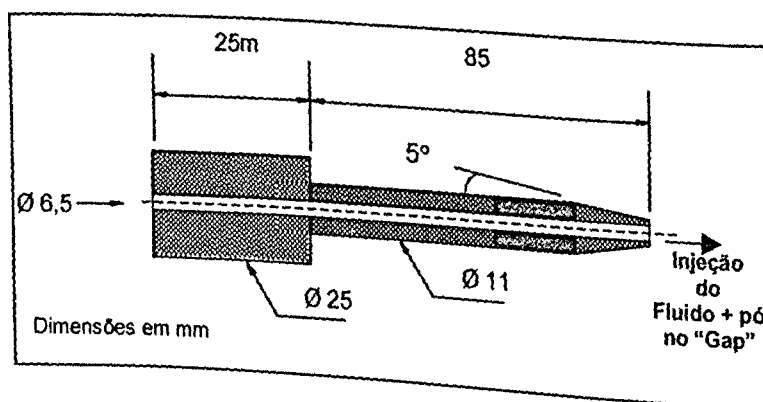


Figura 4.6: Representação esquemática do eletrodo-ferramenta de cobre e Bits (aço rápido ABNT M2).

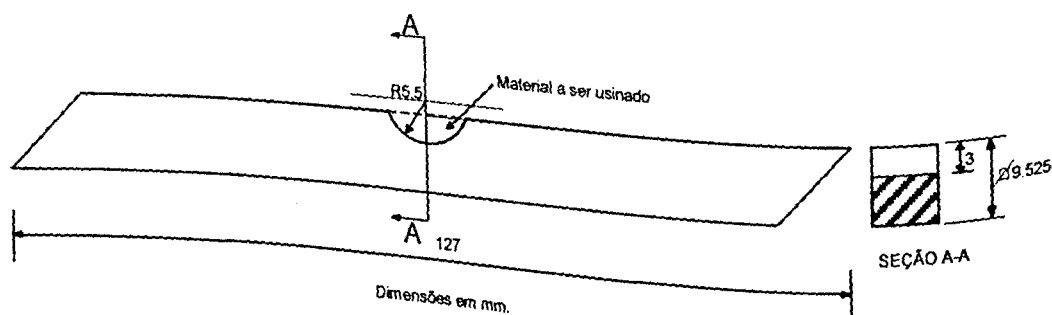


Figura 4.7: Configuração da geometria da peça usinada.

Foram utilizados ainda pós de silício e carboneto de silício com granulometrias de: 220, 400, 600, 1000 e 2000 mesh.

4.4 – Variáveis de Corte

A ferramenta e a forma do agitador foram projetados com intuito de se estabelecer uma uniformidade na mistura (pó SiC + dielétrico), uma concentração adequada, bem como o modo de adição do pó no "gap" durante a usinagem dos "bits". Foram realizados ensaios preliminares

com a finalidade de aprimorar metodologias, conhecer melhor o comportamento do sistema, bem como otimizar sua operação e adquirir parâmetros confiáveis que seriam aplicados nos testes definitivos.

Nos ensaios preliminares foram realizadas determinações da eficiência global do equipamento de agitação da mistura, através da adição de pós de silício, medição da vazão, controle da concentração da mistura, homogeneidade de mistura, forma de adição, volume, massa de SiC. Além das variáveis acima, foram estudadas os parâmetros que seriam aplicados na máquina tais como: corrente, tensão, frequência, tempo de duração da descarga (Ton), e tempo inativo da descarga (Toff).

O equipamento de agitação da mistura, eletrodo e porta-eletrodo, foram projetados com objetivo de se permitir uma uniformidade na mistura (pós + dielétrico), uma concentração apropriada, e também o modo de adição do pó no "gap" durante a usinagem dos "bits". Nesta fase preliminar, denominada de pré-testes, utilizou-se querosene, SiC em pó com granulometrias de 200, 400, 600, 1000 e 2000 mesh e Si com granulometria 200 mesh (massa de 1080 variando de acordo com a concentração), volume de dielétrico de 36 l, concentrações de 15 g/l, 30 g/l e 60 g/l. Ao final desta fase adotou-se os parâmetros rugosidade média (Ra), de relação de desgaste e TRM, verificou-se as características da superfície usinadas com pós de silício e Carboneto de silício. Para isso foram levantados gráficos e tabelas, que depois de analisados permitiu-se adotar os parâmetros que foram de fundamental importância para serem aplicados nos testes definitivos. Os resultados dos testes preliminares são mostrados com maior detalhe na dissertação de Fernandes (1999).

Os parâmetros finais que permitiram obter bons resultados nos testes preliminares, foram aplicados nos testes definitivos onde pode-se citar: concentração = 30g/l, granulometria = 600 mesh (15 μ m), vazão = 76.92 ml/s, volume de dielétrico = 36 l e massa = 1080g de SiC, além de serem utilizados 3 (três) óleos hidrocarbonos de procedência industrial citados em todo texto como óleos A, B e C, identificados na lista de símbolos e abordados suas características na Tabela 4.1. Para as condições acima conseguiu-se chegar a um ponto ideal de usinagem onde foi fixada a condição de corte: tensão de 60 V, corrente de 25 A, Ton de 200 μ s e Toff = 10 μ s.

A "variável" SiC foi convertida em um "parâmetro", visando estudar o efeito microestrutural e mecânico, sofrido pelo aço ABNT M2, quando usinado por descargas elétricas. Portanto, granulometria, concentração, homogeneidade de mistura, forma de adição, vazão, volume, massa de SiC foram fixados durante os testes.

As condições de corte adotadas para o regime de desbaste, na usinagem das peças de aço rápido ABNT M2 com eletrodo-ferramenta de cobre eletrolítico, podem ser vistas na Tabela 4.2.

Tabela 4.1: Propriedades químicas dos fluidos dielétricos identificados por seus respectivos fabricantes e usados nos ensaios definitivos para usinagem no regime de desbaste 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 |

Tabela 4.2: Condições de corte adotadas para usinagem do aço rápido ABNT M2 com eletrodo-ferramenta de cobre eletrolítico no regime de desbaste.

| Regime | Tensão (V) | Corrente (A) | Ton (μs) | Toff (μs) |
|----------|------------|--------------|-----------------------|------------------------|
| Desbaste | 60 | 25 | 200 | 10 |

4.5 – Avaliação da Textura Superficial

Para o estudo do acabamento superficial, utilizou-se um rugosímetro SURTRONIC 3+ da Rank Taylor Hobson onde foi levantado o parâmetro Ra (rugosidade média).

Para adquirir uma maior confiabilidade nos resultados, foi analisada a região usinada com um comprimento de 8mm. O comprimento de amostragem (*cut-off*) adotado foi 2.5 mm de acordo com a NBR 6405 1988. Para cada amostra, foram feitas 12 leituras no sentido do eixo central da mesma, de acordo com a ilustração da Figura 4.8.

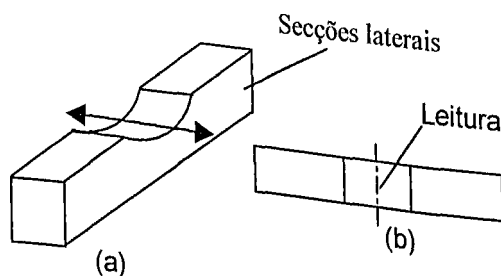


Figura 4.8: Esquema de medição do parâmetro Ra, para o acabamento superficial
(a) Perspectiva-Sentido da medição. (b) Vista Superior- linha onde foram realizadas as medições.

Para a análise do aspecto superficial, utilizou-se micrografias extraídas do MEV com o objetivo de se verificar o comportamento do material refundido e resolidificado sobre a superfície usinada além de microtrincas superficiais (maiores detalhes sobre a análises das microtrincas no item 4.6).

4.6 – Análise das Microtrincas

Para a realização desta análise as 5 (cinco) amostras usinadas (barras de aço rápido ABNT M2) foram embutidas em baquelite para serem lixadas e logo em seguida polidas. No lixamento foram utilizadas lixas com granulometrias de 220 à 1000 mesh. Para o polimento foi utilizada pasta de diamante de 3 e 0,25 μm . Em seguida, as amostras foram atacadas com uma solução contendo 50% de Nital a 2% e 50% de Vilela. Essa solução é comumente denominada de *Nigreen* (serve para evidenciar a presença das camadas na região usinada).

As 2 (duas) seções laterais de cada amostra, não sofreram ataque químico, justamente para facilitar a medição do comprimento e da densidade de microtrincas nas regiões usinadas, para isso foi utilizado o Microscópio Ótico da marca CARL ZEISS JENA e modelo Neophot 21 com um escala a qual permitia medir o comprimento das referidas microtrincas e ao mesmo tempo quantificá-las. A Figura 4.9 ilustra como foram quantificadas as microtrincas e os respectivos comprimentos ao longo da região usinada de cada seção das amostras. Depois de coletados valores, estes foram calculados obedecendo a expressão da densidade de microtrincas exposta na Figura 4.9.

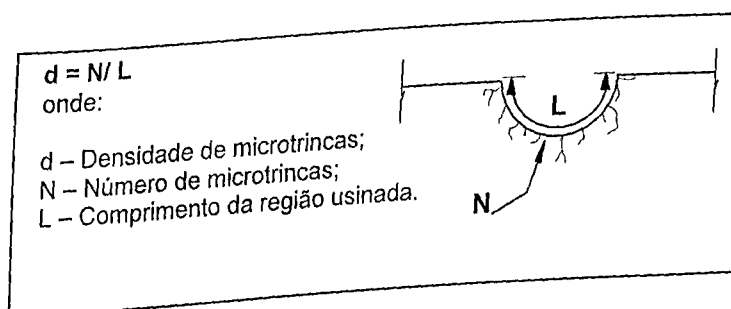


Figura 4.9: Ilustração de como foi realizada a análise das microtrincas na região usinada pelo processo EDM.

Após a preparação metalográfica, as 10 seções laterais foram observadas no Microscópio Ótico Carl Zeiss JENA e modelo Neophot 21, com objetivo de se identificar o posicionamento das microtrincas em relação as camadas geradas pelo processo EDM. O aspecto morfológico dessas superfícies, foi observado em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Carl Zeiss modelo DSN 940.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados, obtidos no desenvolvimento deste trabalho. O item 5.1 aborda aspectos relacionados à textura superficial, incluindo sua topografia global e rugosidade. No item 5.2 é abordado a extensão e a densidade das microtrincas produzidas na região usinada.

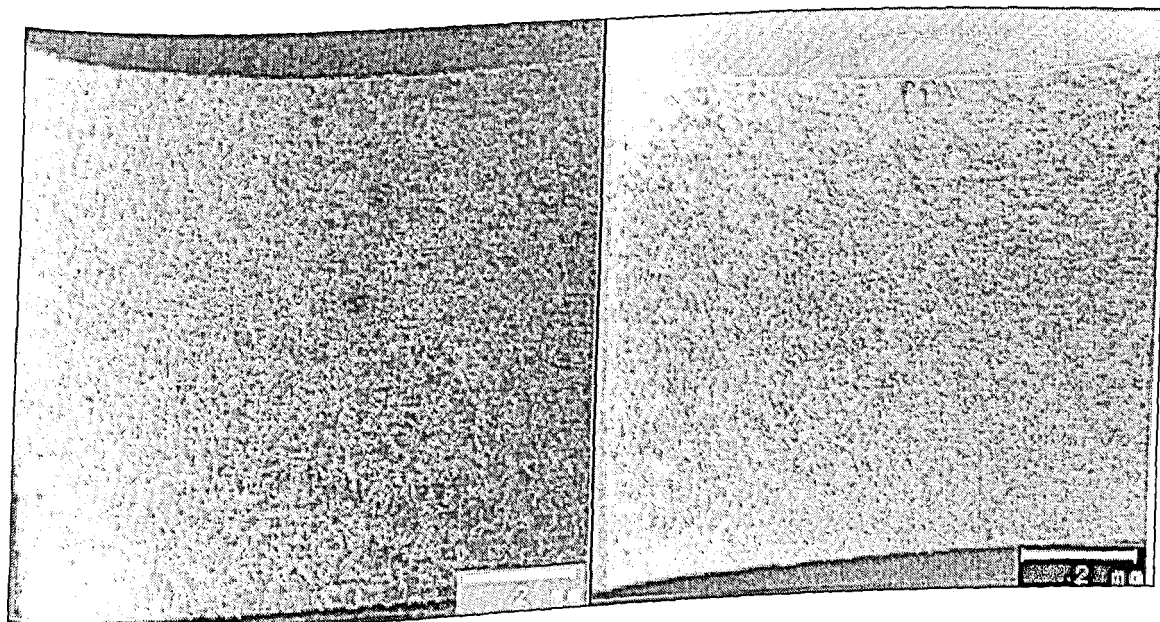
5.1 – Textura superficial

Para se ter uma visão geral de como as superfícies ficaram após a usinagem, são mostradas nas Figuras de 5.1 a 5.3, as micrografias das amostras usinadas com e sem adição de pó de carboneto de silício. Na Figura 5.1 tem-se as regiões usinadas com fluido dielétrico A com e sem adição de pó de SiC. O mesmo acontece na Figura 5.2 com o uso do fluido dielétrico B com e sem SiC. E por fim na Figura 5.3 tem-se superfícies obtidas com o uso do fluido C com e sem adição de pó de SiC.

Por meio das referidas Figuras, é possível constatar que as superfícies usinadas com e sem adição de pó de carboneto de silício no fluido dielétrico, não apresentam marcas que denotam a direção de avanço da ferramenta, como se observa normalmente nas superfícies usinadas pelos processos tradicionais de usinagem (Lima 1997).

Percebe-se ainda das Figuras de 5.1 a 5.3, que as superfícies geradas nos dois processos (com e sem adição de pó de SiC), são relativamente homogêneas em toda a região avanço da ferramenta, esteja relacionada com uma boa capacidade da máquina EDM utilizada, em manter os parâmetros de usinagem constantes (ton, toff, tensão e corrente).

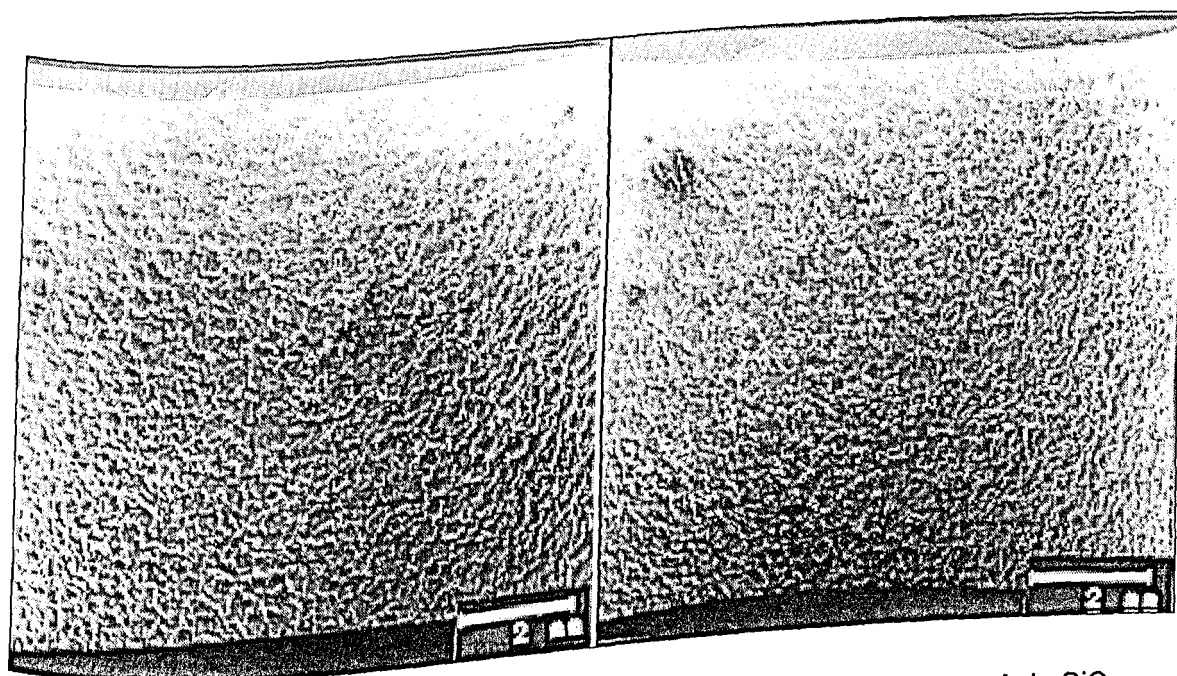
Analisando-se mais detalhadamente as Figuras 5.1(a), 5.2(a) e 5.3(a), obtidas por EDM convencional, observa-se que estas apresentam um aspecto diferenciado entre si. Tal fato não é observado todavia quando se compara as três fotos 5.1(b), 5.2(b) e 5.3(b), correspondentes às superfícies geradas com pó de SiC.



(a) Sem adição de pó

(b) Com adição de pó de SiC

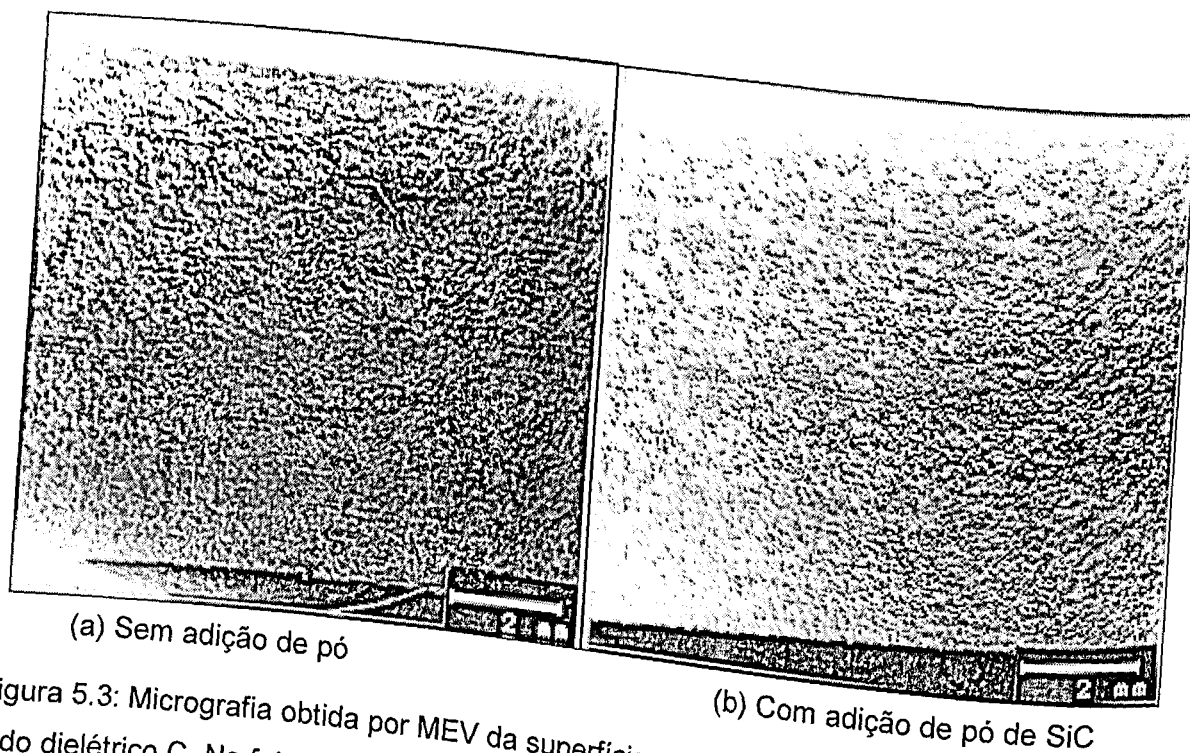
Figura 5.1: Micrografia obtida por MEV da superfície usinada do aço rápido ABNT M2, com o fluido dielétrico A. Na foto (a) a usinagem foi feita sem adição de pó ao fluido dielétrico. Na foto (b), com adição de pó de SiC.



(a) Sem adição de pó

(b) Com adição de pó de SiC

Figura 5.2: Micrografias obtidas por MEV da superfície usinada do aço rápido ABNT M2 com o fluido dielétrico B. (a) Superfície usinada sem pó adicionado no fluido dielétrico. (b) Com adição de pó de SiC.

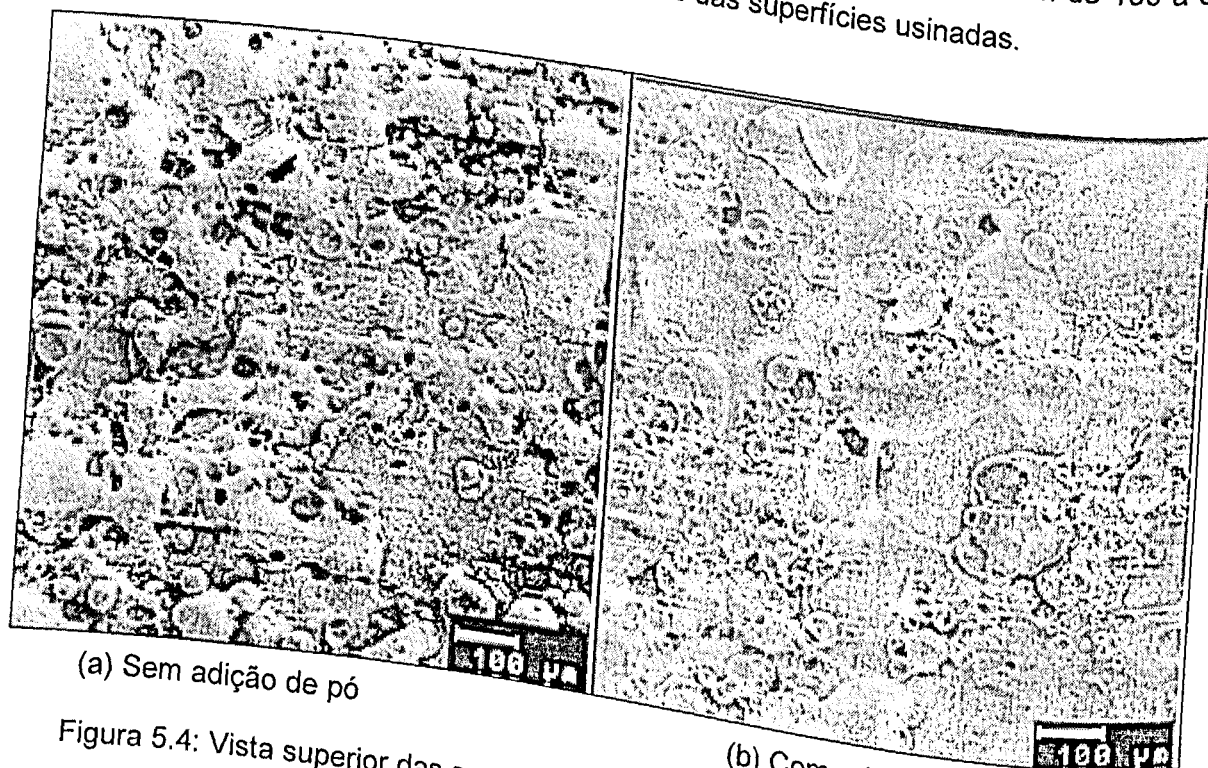


(a) Sem adição de pó

(b) Com adição de pó de SiC

Figura 5.3: Micrografia obtida por MEV da superfície usinada do aço rápido ABNT M2, com o fluido dielétrico C. Na foto (a) a usinagem foi feita sem adição de pó ao fluido dielétrico. Na foto (b), com adição de pó de SiC.

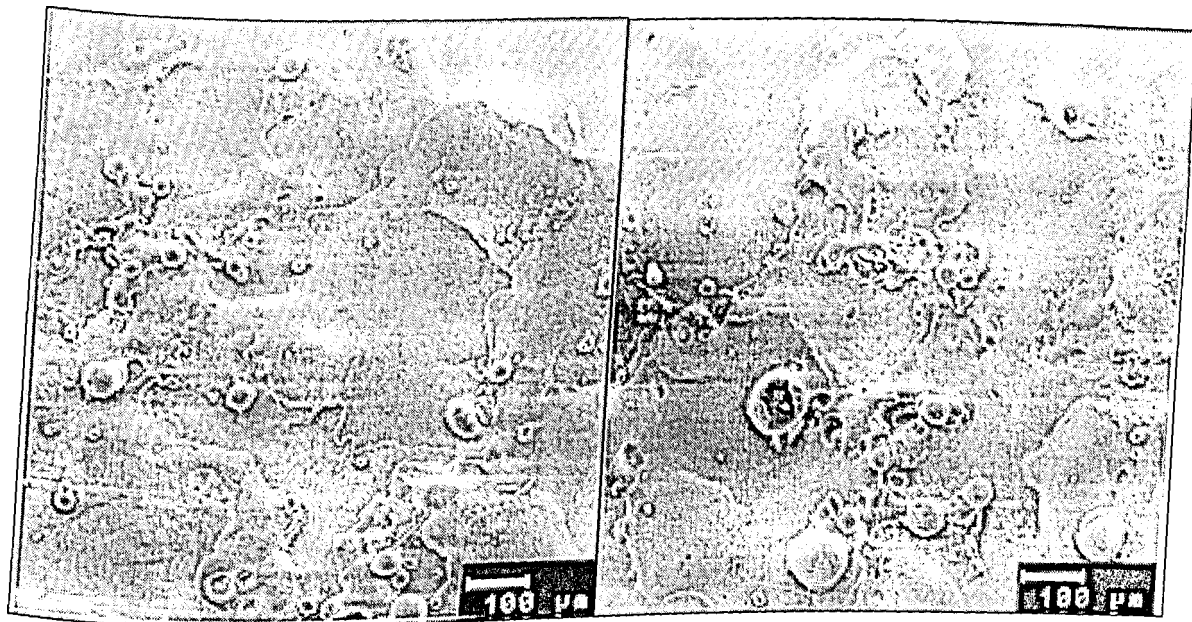
Uma análise mais detalhada da topografia das superfícies apresentadas nas Figuras de 5.1 a 5.3 pode ser feita através das Figuras de 5.4 a 5.8. Os aumentos variam de 100 a 300x, onde são mostrados com maior clareza os detalhes das superfícies usinadas.



(a) Sem adição de pó

(b) Com adição de pó de SiC

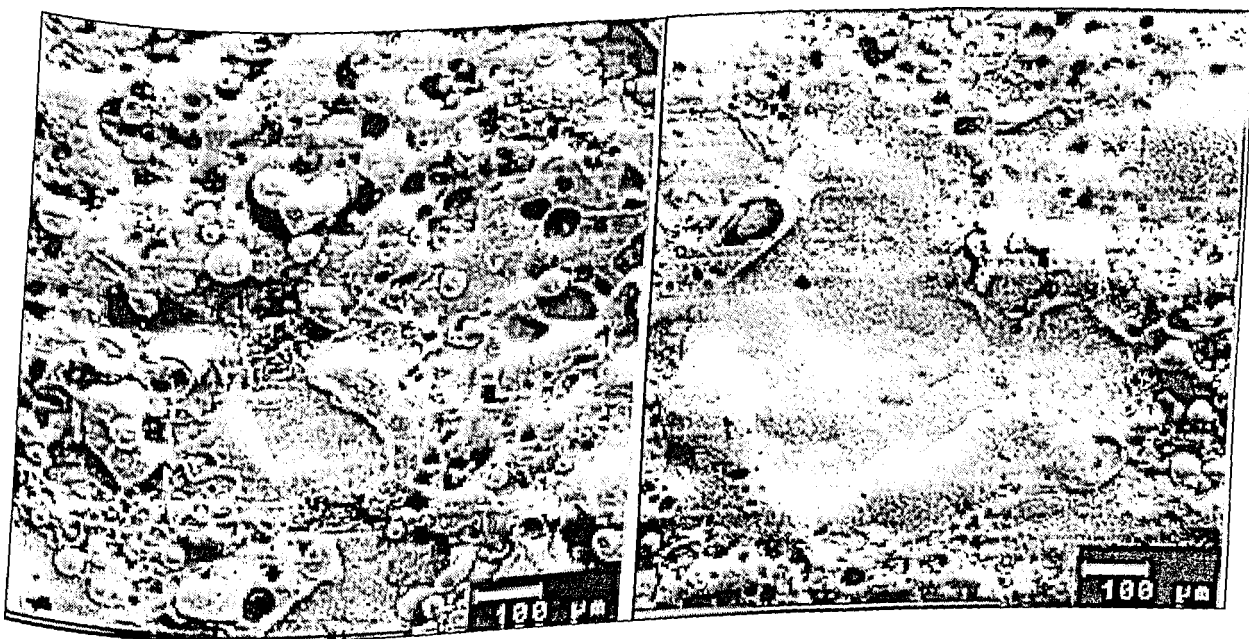
Figura 5.4: Vista superior das superfícies usinadas com o fluido dielétrico A, MEV.
(a) Usinagem feita sem adição de pó. (b) com adição de pó de SiC.



(a) Sem adição de pó

(b) Com adição de pó de SiC

Figura 5.5: Superfícies do aço ABNT M2 usinadas com o fluido dielétrico B, MEV. (a) EDM sem pó. (b) Usinagem com pó de SiC adicionado ao fluido dielétrico.



(a) Sem adição de pó

(b) Com adição de pó de SiC

Figura 5.6: Micrografias obtidas por MEV das amostras de aço rápido ABNT M2 usinadas por com o fluido dielétrico C. (a) Sem adição de pó. (b) Usinagem com pó de SiC adicionado no dielétrico.

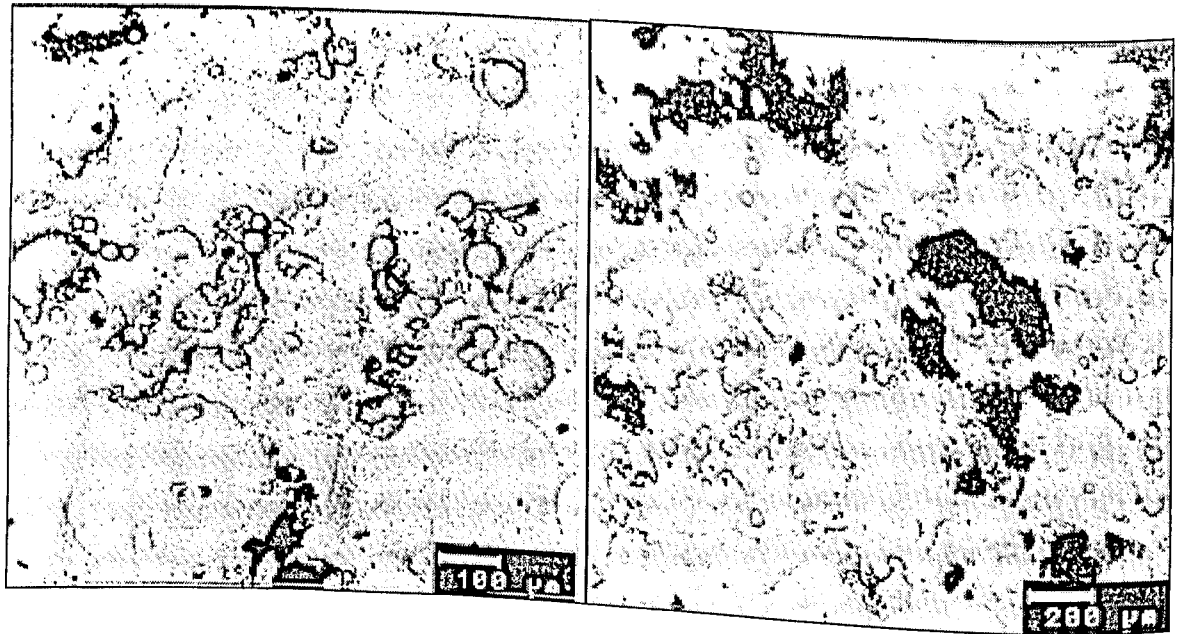


Figura 5.7: Vista superior das superfícies do aço rápido ABNT M2, usinado com adição de SiC ao fluido dielétrico B e obtidas por Microscopia Eletrônica, na qual se faz a análise pela diferença de número atômico (eletrons retroespalhados).

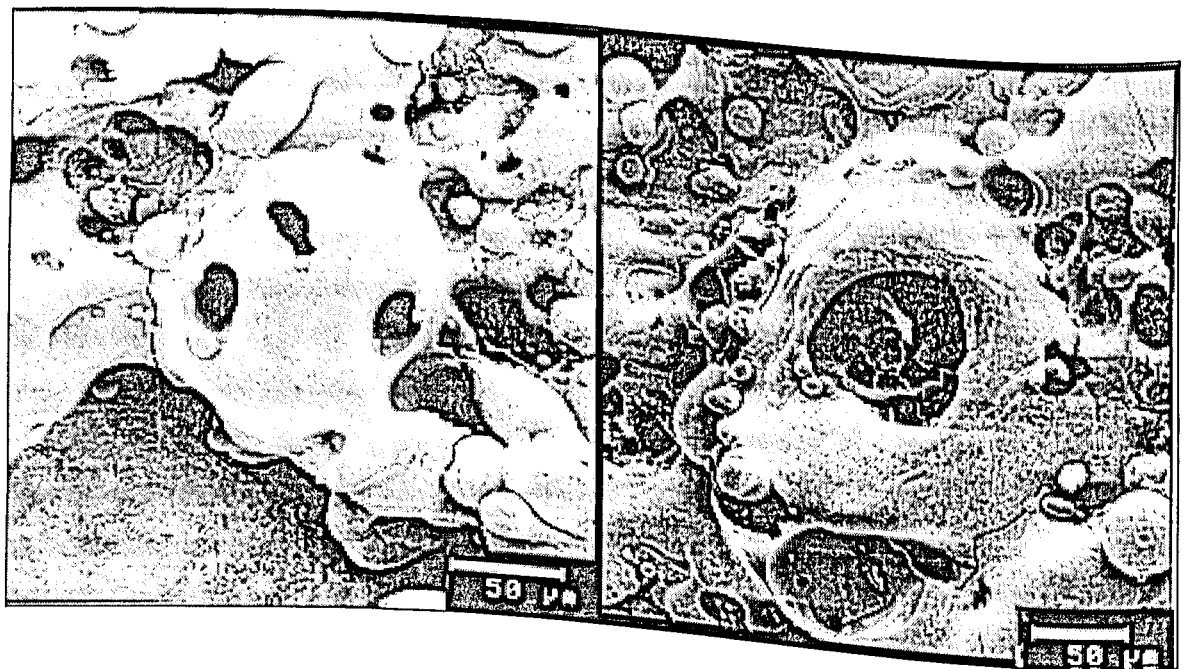


Figura 5.8: Vista superior das superfícies usinadas do aço rápido ABNT M2 com o fluido dielétrico C sem adição de pó, obtidas por MEV.

Através das Figuras 5.4, 5.5, 5.6 e 5.8, observa-se que as superfícies usinadas, apresentam crateras sobrepostas, cavidades, bolhas, "chaminés". Além disso são observados partículas esféricas fixas na superfície, proveniente do líquido fundido ejetado da região onde ocorreu a descarga. Tudo isso é confirmado por Lim et al. (1991), quando concluiu em seus trabalhos, afirmando que as imperfeições originadas na superfície, se devem ao fato das gotículas de material fundido, serem expelidas das mais variadas formas durante as descargas, e logo após se resolidificam afetando a rugosidade superficial.

Observando a Figura 5.7, percebe-se a presença de uma região de coloração escura, sobre a superfície usinada. Pela análise de elétrons retroespalhados (diferença de número atômico), constata-se que essas partículas não são do mesmo material da amostra, levando a crer, que se trata de partículas de Carboneto de Silício ou resíduos provenientes da degradação do dielétrico.

Observa-se nas Figuras 5.4(a), 5.5(a) e 5.6(a), que as superfícies obtidas sob as condições de usinagem utilizando EDM convencional ou seja sem adição de pó, apresentam um aspecto superficial diferenciado, além de possuírem imperfeições de material resolidificado danosas ao acabamento superficial. Tal fato, ocorre com menor intensidade quando a mesma análise é feita nas amostras usinadas com adição de pó de SiC.

Percebe-se na micrografia da Figura 5.4(a), sobreposição de crateras, além de vales, bolhas, etc. No segundo caso da Figura 5.4(b), tem-se a existência de crateras espaçadas, bem como placas de material refundido que se redepositaram de forma parcial sobre a superfície, dando um aspecto superficial menos rugoso.

Fazendo-se uma comparação entre as micrografias da Figura 5.5, percebe-se que não há diferença entre as superfícies que foram usinadas. Por outro lado, ao analisar as Figuras 5.4(a) 5.4(b) a ação do SiC é mais evidente, pois observa-se que houve uma melhora significativa no aspecto superficial desta com relação a primeira.

Com base nos valores apresentados no gráfico da Figura 5.9, verifica-se que a rugosidade superficial média das amostras usinadas sem pó de SiC apresentaram as seguintes relações: $Ra_{(\text{óleo A})} > Ra_{(\text{óleo C})} > Ra_{(\text{óleo B})}$. Estes resultados condizem com o aspecto superficial apresentado nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6. Já no caso das amostras usinadas com SiC, o resultado do acabamento superficial apresentou-se da seguinte maneira: $Ra_{(\text{óleo A} + \text{SiC})} \cong Ra_{(\text{óleo B} + \text{SiC})} \cong Ra_{(\text{óleo C} + \text{SiC})}$. Tudo isso confirma também o que foi divulgado ao se analisar as Figuras 5.4, 5.5 e 5.6.

Com base nos valores apresentados no gráfico da Figura 5.9, verifica-se que a superfície usinada com adição de pó de SiC aos fluídos dielétricos A, B e C, levaram a uma melhor textura superficial, quando comparado com os resultados obtidos na EDM convencional. Por outro lado, as rugosidades obtidas com o fluído dielétrico B, apresentam valores de Ra muito próximos.

Observa-se claramente na análise do gráfico da Figura 5.9, que os valores obtidos para a rugosidade média R_a , das amostras usinadas com fluido dielétrico com adição de pós, além de possuírem valores baixos e próximos entre si quando comparado com similares obtidos por EDM convencional, mostram-se condizentes com aqueles apresentados pela literaturas (Kobayashi et al. - 1989, Kobayashi et al. - 1995, OKADA e UNO - 1997).

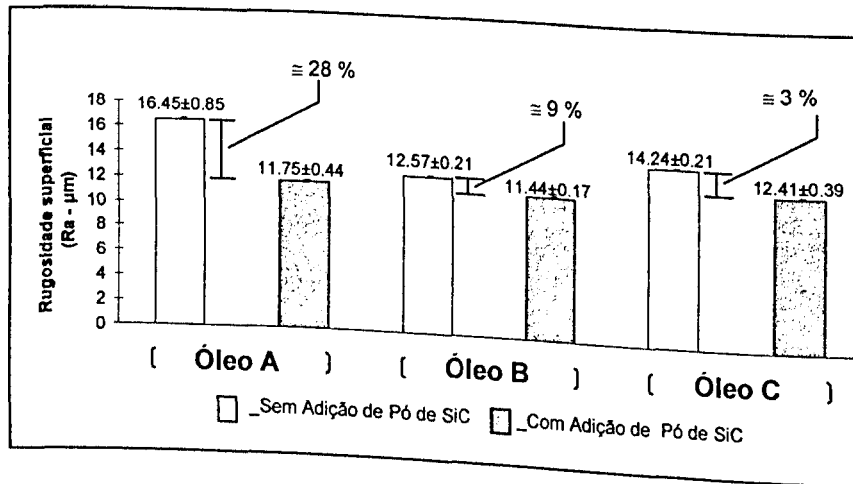
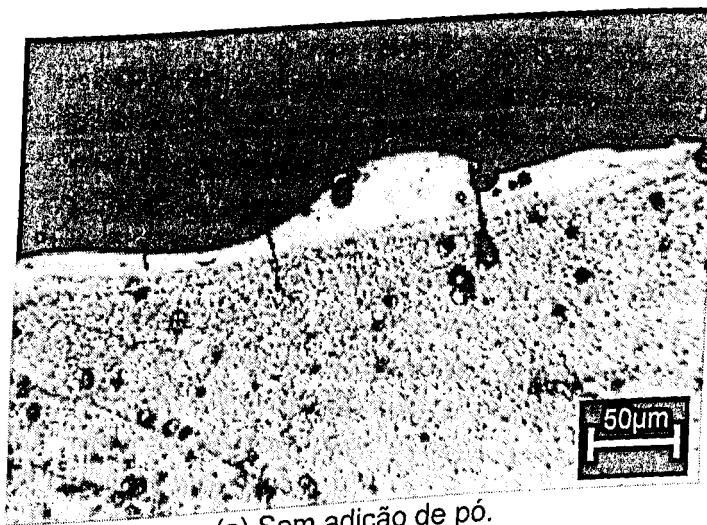


Figura 5.9: Rugosidade superficial média (R_a) gerada na usinagem de peças de aço rápido ABNT M2 com fluidos dielétricos (óleos A, B e C) sem e com adição de pó de SiC no regime de desbaste.

Associando-se os resultados das figuras 5.4, 5.5 e 5.6 com a figura 5.9, observa-se uma estreita correlação entre elas, pois o fluido dielétrico B com adição de SiC, obteve os menores valores no parâmetro R_a , apresentando um aspecto superficial semelhante com aqueles obtidos com EDM convencional. Porém as amostras usinadas com fluido dielétrico A com adição de SiC, apresentaram um aspecto superficial bem definido, além de valores de R_a próximos daqueles obtidos com fluido dielétrico B o que toma-o indicado na usinagem do aço rápido ABNT M2.

5.2 – Microtrincas Produzidas na Região Usinada

As Figuras de 5.10 a 5.13 mostram como as microtrincas se propagam na superfície. É possível observar que as microtrincas não se limitam apenas à camada de material refundido, estendendo-se até à zona afetada pelo calor e em alguns casos atingindo o material base. Além de trincas verticais, nota-se a presença de trincas subsuperficiais, localizadas tanto dentro da camada refundida, quanto dentro do material base [ex: Figuras 5.10(a) e 5.11(a)]. As microtrincas subsuperficiais apresentam-se normalmente associadas às trincas de tração (verticais). Outro aspecto a ser notado, é o fato de que as trincas verticais muitas das vezes estarem associadas a defeitos tais como bolhas ou vazios (ex: Figuras 5.10(a), 5.11 (a) e 5.12(b))

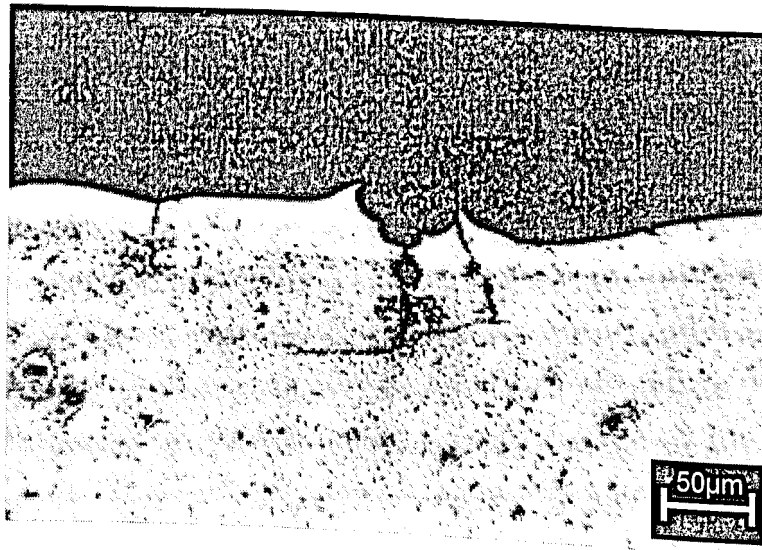


(a) Sem adição de pó.

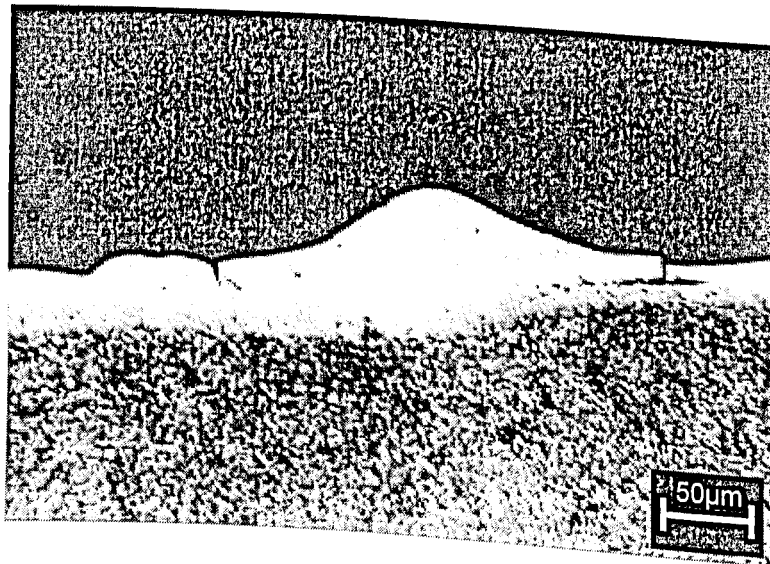


(b) Com adição de pó de SiC

Figura 5.10: Vista lateral obtida por MO da superfície usinada do aço rápido ABNT M2 com o fluido dielétrico A. Na foto superior tem-se a micrografia da superfície usinada sem pó e na inferior com adição de pó de SiC.

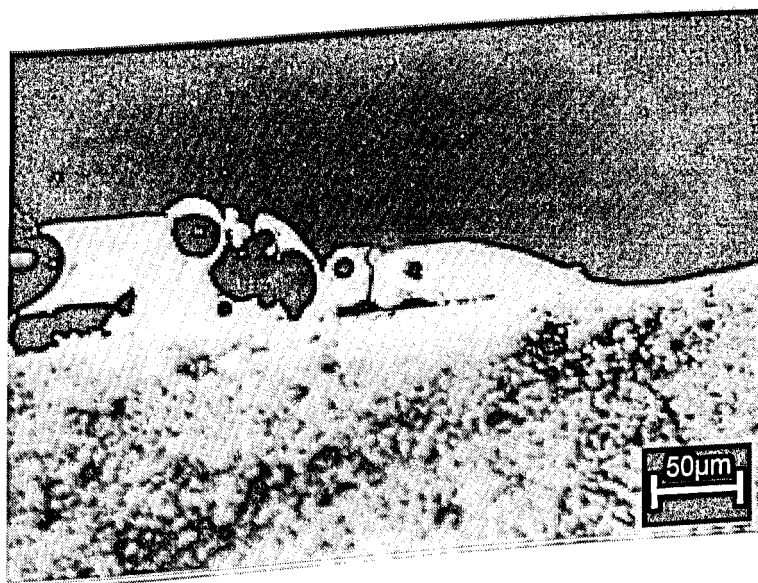


(a) Sem adição de pó.

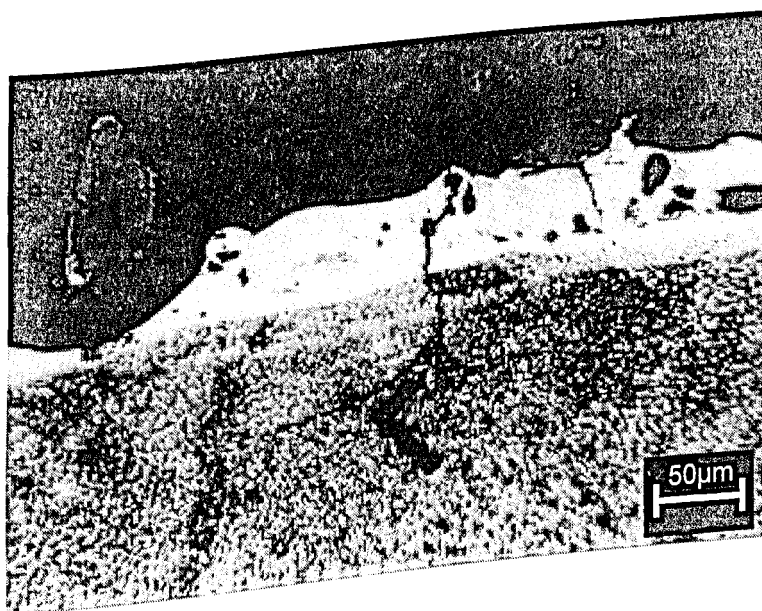


(b) Com adição de pó.

Figura 5.11: Seção transversal obtida por MO da superfície usinada do aço rápido ABNT M2 com o fluido dielétrico B, atacadas com o reativo *Nigreen*. Na foto superior tem-se a micrografia da superfície usinada sem pó, e na inferior com adição de pó de SiC.

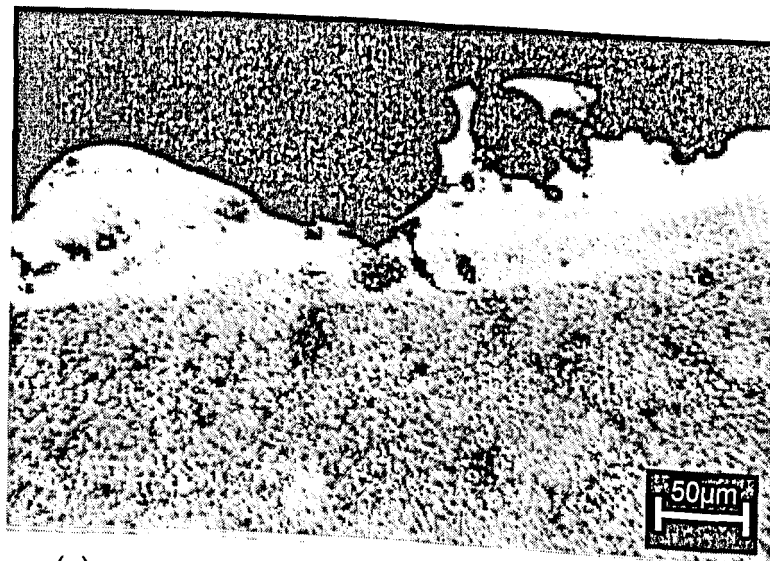


(a) Sem adição de pó.

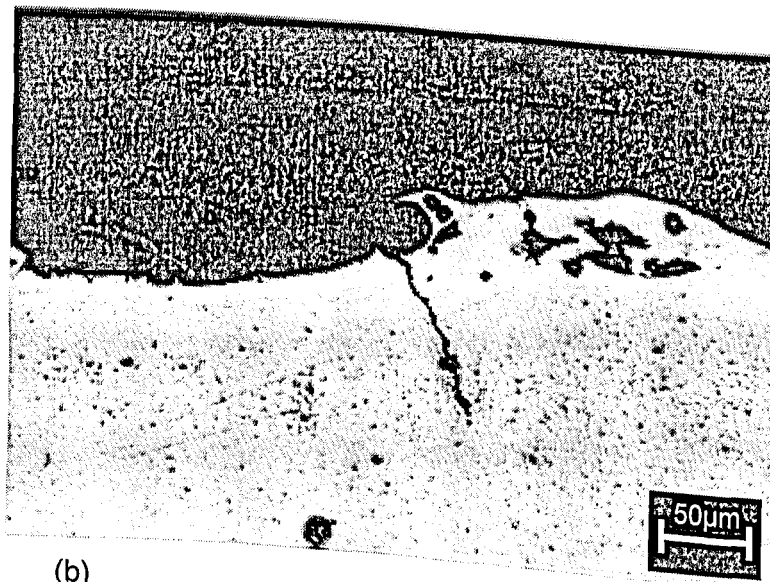


(b) Com adição de pó.

Figura 5.12: Seção transversal da superfície usinada do aço rápido ABNT M2 com o fluido dielétrico C, MO, atacadas com *Nigreen*. Na foto superior a usinagem foi feita sem pó e na foto abaixo com adição de pó de SiC.



(a)



(b)

Figura 5.13: Vista lateral obtida por MO da superfície usinada do aço rápido ABNT M2 com o fluido dielétrico C, atacadas com *Nigreen*. Ambas as micrografias são de superfícies usinadas com adição de pó de SiC.

As trincas geradas durante processo EDM, no aço rápido ABNT M2 podem ainda circundar as crateras e bolhas do material refundido e resolidificado. Segundo (Pandey e Shan, 1985), essas microtrincas têm suas profundidades e extensões determinadas pela energia de descarga. As superfícies apresentadas anteriormente, mostram-se também

bastante semelhantes com as observadas por Kremer et al. (1997). Este mesmo autor afirma nos seus trabalhos, que o desenvolvimento das microtrincas, está relacionada com o surgimento de elevadas tensões térmicas que superam a tensão máxima de resistência do material.

As profundidades ou comprimentos médios das microtrincas observadas nas superfícies usinadas por EDM com e sem adição de SiC são apresentadas na Figura 5.14. Na Figura 5.15 tem-se a densidade de microtrincas na superfície usinada.

Da Figura 5.14 nota-se a existência de grandes desvios padrões do comprimento das trincas em relação aos valores médios. Isso pode ser notado da Figura 5.10(a), onde são observados trincas com grandes diferenças de tamanho. Nota-se também uma tendência de aumento do comprimento das trincas ao se passar do dielétrico A para o B, e desse para o C. Adicionalmente percebe-se que a adição de pó de SiC no fluido dielétrico A obteve valores relativamente baixos, mas no contexto geral observa-se que a adição de pós não conduziu a reduções significativas no comprimento médio das microtrincas.

O efeito da adição de pó de SiC é, todavia, notória na densidade de microtrincas. Em todos os dielétricos houve uma redução da densidade linear de microtrincas.

Fazendo-se uma comparação dos gráficos das Figuras 5.14 e 5.15, pode-se afirmar que as amostras de aço rápido ABNT M2, usinadas com a mistura (óleo C + SiC), apresentaram microtrincas com comprimento médio bastante elevado. Por outro lado foram observados valores relativamente baixos na densidade de microtrincas.

A Tabela 5.1 mostra os valores da altura média da camada de material fundido e redepositado sobre a superfície, além da espessura média da zona afetada pelo calor com e sem adição de SiC em pó. Os efeitos da adição de pó de SiC sobre essas camadas são analisadas por Fernandes (1999).

Fazendo-se uma comparação entre o gráfico da Figura 5.14 e Tabela 5.1, percebe-se que na usinagem sem adição de pó no fluido dielétrico A, as microtrincas estão dentro da zona afetada pelo calor. Em casos isolados, foi constatado que as mesmas atravessam a ZAC, tal como pode ser visualizado na Figura 5.10(a).

Utilizando o mesmo critério de comparação realizado acima, percebe-se um comportamento semelhante, todavia, as amostras usinadas com pó de SiC não apresentaram microtrincas, que atingissem o substrato como pode ser notado da Figura 5.10(b).

Já na usinagem com dieletrico B, as microtrincas apresentaram um comprimento médio ligeiramente superior aos verificados com dielétrico A. Isso combinado com uma menor espessura da ZAC no dielétrico B sem adição de SiC levou à formação de uma maior quantidade de trincas, que atingem o substrato (Figura. 5.11(a)).

Na usinagem por descargas elétricas sem SiC no fluido dielétrico C, boa parte das microtrincas estavam contidas na ZAC. Como percebe-se pela Figura 5.12(a).

As Figura 5.12(b) a 5.13(b), mostram superfícies usinadas com adição de pó de SiC no fluido dieletrico C, onde as microtrincas já se apresentam com extensões bastante elevadas atingindo com grande clareza a camada refundida e a ZAC, e em alguns casos o próprio material base, fato este que é esclarecido no gráfico da Figura 5.14. Observou-se ainda que algumas dessas microtrincas tinham origem em vales existentes entre o material refundido.

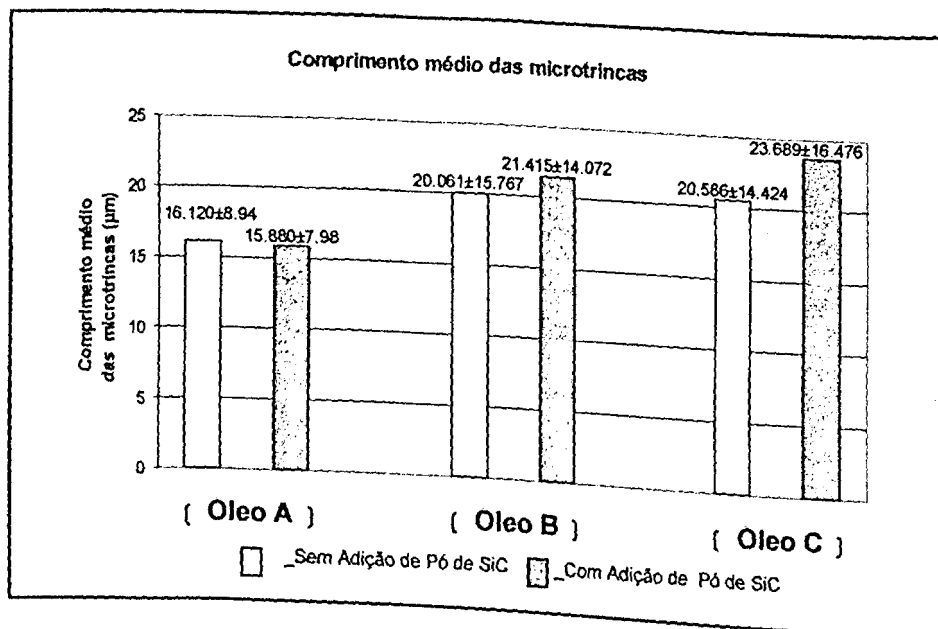


Figura 5.14: Comprimento médio das microtrincas ao longo da superfície usinada.

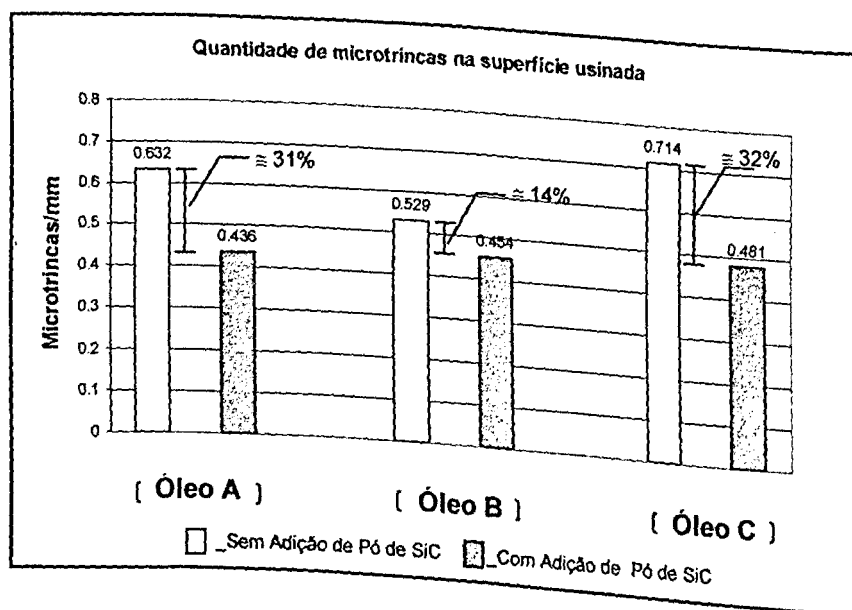


Figura 5.15: Quantidade de microtrincas por milímetro da superfície usinada.

Fazendo-se uma análise detalhada no gráfico da Figura 5.14, percebe-se que as amostras que foram usinadas com pó de SiC adicionado no fluido dielétrico A, apresentam

microtrincas com comprimento médio em torno de $15.9\mu\text{m}$ com desvio padrão de $8.0\mu\text{m}$, portanto, inferior quando comparadas até mesmo com amostras usinadas com adição de pó, como por exemplo a mistura (óleo C + SiC em pó), onde estas apresentavam comprimento médio de $23.0\mu\text{m}$ e desvio padrão de $16.5\mu\text{m}$.

Sob o aspecto de microtrincas, o fluido dieletrico A com adição de SiC, representa alternativa atraente para a usinagem do aço rápido ABNT M2.

Tabela 5.1: Espessura média das camadas superficiais e subsuperficiais e Zona Afetada pelo Calor (ZAC) sobre a superfície usinada do aço rápido ABNT M2, com e sem adição de SiC no fluido dielétrico no regime de desbaste (Fernandes 1999).

| | | Camada Refundida | Camada Branca | Camada Revenida | ZAC |
|-----------|--------------|------------------|---------------|-----------------|-------|
| Óleo A | S/ pó de SiC | 43.27 | 22.87 | 12.98 | 28.61 |
| | C/ pó de SiC | 44.27 | 14.85 | 13.31 | 34.1 |
| <hr/> | | | | | |
| Óleo B | S/ pó de SiC | 38.14 | 14.02 | 15.88 | 43.82 |
| | C/ pó de SiC | 30.79 | 7.86 | 12.23 | 28.56 |
| <hr/> | | | | | |
| Óleo C | S/ pó de SiC | 42.24 | 19.53 | 16.2 | 45.62 |
| | C/ pó de SiC | 40.55 | 6.47 | 16.98 | 42.16 |

Unidade: μm

Capítulo 6

Conclusões

Os testes realizados com e sem adição de pó de SiC no fluido dielétrico, na usinagem de barras de aço rápido ABNT M2 pelo processo EDM, permitem que sejam obtidas as seguintes conclusões:

- ⇒ As superfícies geradas por EDM convencional utilizando três tipos de dielétricos, apresentam diferentes aspectos superficiais, quando observados no MEV. Com a adição de pó de SiC ao fluido dielétrico, essa diferença foi sensivelmente reduzida. A rugosidade Ra constata essa conclusão;
- ⇒ As superfícies usinadas com adição de SiC aos fluidos dielétricos A e C, apresentaram uma melhor textura superficial, quando comparadas com as obtidas por EDM convencional. Já as obtidas com fluido dielétrico B, não foi constatado uma melhora significativa no valor de Ra;
- ⇒ Em todas as superfícies usinadas, foram observados glóbulos ou partículas esféricas, "chaminés", crateras e trincas resultantes do processo de usinagem. Com a adição de pó de SiC, essas imperfeições de forma geral foram reduzidas. Na superfície gerada com o dielétrico B, essa redução não pode ser constatada;
- ⇒ Utilizando-se elétrons retroespalhados, percebeu-se a presença de regiões de coloração escura sobre a superfície usinada, levando a crer que se trata de partículas de carboneto de silício e ou resíduos provenientes da degradação do dielétrico;
- ⇒ Existe uma ligeira tendência de aumento no comprimento médio das microtrincas, quando se usina com fluidos dielétricos na seqüência A, B e C. Associado a isso,

percebe-se que a adição de SiC no fluido dielétrico, não conduziu à reduções significativas no comprimento médio quando comparada com EDM convencional. Por outro lado, a ação do SiC foi mais evidente na densidade de microtrincas, obtendo-se valores relativamente baixos e próximos entre si em relação à EDM convencional;

- ↪ As amostras de aço rápido ABNT M2, usinadas com a mistura (óleo C + SiC) apresentaram os maiores valores de comprimento médio de microtrincas. Por outro lado, observou-se nessa configuração as menores densidades de microtrincas;
- ↪ Na usinagem com fluido dielétrico A sem adição de pó, foi constatada que a maioria das microtrincas se fazem presentes na ZAC. Em casos isolados, essas trincas estendem-se até o material base. Já com adição de pó de SiC, constatou-se um situação semelhante, porém essas microtrincas não atingem o substrato;
- ↪ Na usinagem com fluido dielétrico B, as microtrincas geradas são bem maiores, quando comparadas com as obtidas através do dielétrico A. Isso associado ao fato de que a ZAC no dielétrico B sem adição de pó é menor do que as obtidas por A, levou a formação de uma maior quantidade de microtrincas que atingiram o substrato;
- ↪ Nas superfícies usinadas por EDM convencional com o dielétrico C, um número elevado de microtrincas estão contidas dentro da camada material fundido, ou até mesmo na ZAC. Por outro lado, ao se usinar com adição de SiC, essas microtrincas podem atingir o substrato;
- ↪ Na usinagem com a mistura (óleo A + pó) as microtrincas apresentaram um comprimento médio em torno de 15.9 μ m com desvio padrão de 8.0 μ m, portanto um comprimento médio inferior, quando comparadas até mesmo às demais amostras usinadas com adição de pó, como por exemplo a mistura (óleo C + SiC em pó), onde estas apresentaram comprimento médio de 23.0 μ m e desvio padrão de 16.5 μ m.
- ↪ O Fluido dielétrico A com SiC, é o mais indicado para a usinagem do aço rápido ABNT M2, devido aos aspectos positivos que este promoveu sobre a textura e microtrincas superficiais.

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

- ⇒ Verificar o efeito da adição de pós na geração de microtrincas utilizando o regime de acabamento;
- ⇒ Variar o sistema de lavagem utilizando os mesmos parâmetros e verificar seus efeitos sobre a integridade e textura superficial;
- ⇒ Investigar o efeito da adição de pós no processo EDM sobre a TRM e rugosidade superficial, com base nas crateras geradas sobre as superfícies, utilizando análises de elementos finitos;
- ⇒ Comparar a textura superficial de vários metais usinados com adição de pós no dielétrico;

Verificar o efeito de eletrodos vazados com várias geometrias e materiais diferentes, no processo EDM com pós, sobre a integridade superficial;

- ⇒ Estudar a acuracidade geométrica de peças de aço rápido ABNT M2, usinadas pelo processo EDM com pós adicionados variando os parâmetros elétricos;
- ⇒ Caracterizar a constituição da superfície usinada, com objetivo de se identificar a participação de pó de SiC no processo de fusão e solidificação.

Capítulo 7

Referências Bibliográficas

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

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

Cruz, C., 1989, *Análise da Usinagem do Aço-Villares: VC-131 para Matrizes com Diferentes Tratamentos Térmicos no Processo de Usinagem por Eletroerosão*, X COBEM, 1989.

Cruz, C., Malaquias, E. S. e Fernandes, L. A., 1999, *Introdução á Usinagem Não Tradicional*, DEEME, UFU, Uberlândia-MG,

Engemaq, 1996, *Manual de Instalação, Operação e Programação*, Engemaq Eletroerosão, Key West Co, Julho.

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

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

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

Jeswani. M.L., 1980, *Effect of the Addition of Graphite Powder to Kerosene used as the Dielectric Fluid in Electrical Discharge Machining*, *Wear*, n º 05, pg. 134 – 139.

Kahles, J. F., 1985, *Electrical Discharge Machining*, *Metals Handbook*, 7ªEd. Vol. 16 Machining.

Kurafuji, H., e 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.

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

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

Kremer, D., Lebrun, J. L., Rabelo, J. C. e Dias A. M., 1997, *Quantificação da Integridade das Superfícies*, III Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica – CIDIM'97, La Habana , September 1997.

König, W. e and SIEBERS F. J., 1998, *Estudo de um Sistema por Penetração em Meio Aquoso*, São Paulo, Revista Máquinas & Metais, pg. 21-27.

Lee L.C., Lim, L. C., Narayanan, V. e Venkatesh V. C., 1987, *Quantification of Surface Damage of Tool Steels After EDM*, International Journal Tools Manufacture, pp. 359-372, vol. 28, nº 4.

Lima, E. F., 1997, *Rugosidade de Integridade Superficial do Aço Rápido ABNT M2 Após Usinagem Por Descargas Elétricas*, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 97pgs.

Lim L. C., Lee, L. C., Wong, Y. S. e Lu H. H., 1991, *Solidification Microstructure of Electrodischarge Machined Tool Steels*, Materials Science and Technology, March, pg. 239 – 248, vol. 7.

Ming, Q. Y., e He L. Y., 1995, *Powder-Suspension dielectric Fluid for EDM*, Journal of Materials Processing Technology 52, pg. 44-54.

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

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

NBR 6405, 1995, *Rugosidade das superfícies*, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 9pgs.

Okada A. and Uno Y., 1997, *Surface Generation Mechanism in Electrical Discharge Machining with Silicon Powder Mixed Fluid*, International Journal of Electrical Machining, N ° 2, January 1997.

Pandey, P.C. e Shan, H.S., 1985, *Modern Machining Process*, Tata McGraw Hill, New Delhi.

Rhoades, L., 1990, "Post Processing of EDM Surfaces", EDM Digest, Vol. XII-Nr.1.

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

UNO, Y. e Okada A., 1997, *Surface Integrity in EDM of Aluminum Bronze with Nickel Powder Mixed Fluid*, International Journal of Electrical Machining, N ° 2, January 1997.

FU-00009910-B