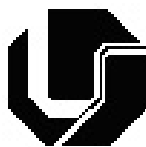


RENATO MONTANDON DE LIMA

**UTILIZAÇÃO DE FLUIDOS DIELÉTRICOS À BASE DE
ÓLEOS VEGETAIS NA USINAGEM POR
DESCARGAS ELÉTRICAS POR PENETRAÇÃO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2008

RENATO MONTANDON DE LIMA

**UTILIZAÇÃO DE FLUIDOS DIELÉTRICOS À BASE DE ÓLEOS
VEGETAIS NA USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS POR
PENETRAÇÃO**

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

Área de Concentração: Materiais e
Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Alberto Arnaldo Raslan

Uberlândia - MG

2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- L732u Lima, Renato Montandon de, 1966-
Utilização de fluidos dielétricos à base de óleos vegetais na usinagem por descargas elétricas por penetração / Renato Montandon de Lima. - 2008.
104 f. : il.
- Orientador: Alberto Arnaldo Raslan.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.
1. Usinagem - Teses. 2. Fluidos - Teses. I. Raslan,, Alberto Arnaldo. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621.9

(FOLHA DE APROVAÇÃO)

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pela força, saúde e perseverança. Dedico ao meu pai (†) que não pôde estar aqui agora... Minha mãe que sempre nos incentivou a estudar. Uma dedicatória especial à Francielle, minha esposa, que nunca me deixou desanimar e sempre esteve ao meu lado em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o Prof. Dr. Alberto Arnaldo Raslan, meu Orientador, pela ajuda, incentivo e disponibilidade durante todo o trabalho.

Ao professor Dr. José Daniel Biasoli de Mello pelas excelentes aulas, conselhos e ajuda durante todo o trabalho.

Aos professores do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), Dr. Ing. Sinésio Domingues Franco, Dra. Henara Lillian Costa, MsC. Rafael Ariza Gonçalves.

Aos técnicos do LTM, Ângela, Eunice e Flávio e os engenheiros Juliano e Henry.

Ao professor Dr. Álisson Rocha Machado, primeiro docente no mestrado e aos colegas do LEPU (UFU).

Agradeço à Faculdade de Engenharia Mecânica, a Coordenação da Pós-graduação, a Diretoria e professores.

Ao engenheiro Dr. Luciano José Arantes pela grande ajuda durante todo o trabalho.

Aos alunos de iniciação científica do LTM que ajudaram nos ensaios e trabalhos com muito profissionalismo, em especial Tiago, Ricardo, Aurélio e Flávia.

A todos os colegas que cursaram as mesmas disciplinas e pelo conhecimento adquirido com eles.

Ao CEFET-MG pela concessão de minha licença de mestrado e a CAPES pela bolsa de estudos.

Ao Departamento de Pós-graduação e Pesquisa do CEFET-MG.

Aos professores da Coordenação de Mecânica do CEFET-MG, unidade de Araxá.

A todos os colegas do CEFET-MG, unidade de Araxá que compartilharam os bons e maus momentos das viagens para Uberlândia que participaram e colaboraram com a minha formação.

Ao César, meu professor de inglês que sempre colaborou com as traduções com muita paciência.

À professora Valdirene, grande colega de trabalho que corrigiu os erros de português deste trabalho.

À bibliotecária Íris Lopes que trabalhou na formatação deste trabalho com muito profissionalismo e o seu esposo, Prof. Henrique.

Aos professores do Instituto de Química da UFU, professores Dra. Rosana Maria Nascimento Assunção e Dr. Roberto Chang.

Àqueles da minha família que colaboraram e ajudaram em todos os momentos e de várias formas para que eu pudesse chegar até aqui.

LIMA, R. M. **Utilização de fluidos dielétricos à base de óleos vegetais na usinagem por descargas elétricas por penetração**. 2008 Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

Resumo

Os fluidos dielétricos usados nos processos de usinagem por descargas elétricas por penetração (EDM) têm, em geral, preços elevados, são tóxicos e apresentam dificuldades para armazenamento e descarte. Os fluidos dielétricos à base de petróleo além de poluírem o meio ambiente, estão sujeitos às variações de preço do mercado internacional, o que acarreta a elevação dos custos de produção. São empregados em grandes quantidades e descartados após pouco tempo de uso. Além disso, a tendência de esgotamento das reservas mundiais de petróleo não deve ser desconsiderada. Este trabalho mostra a comparação do desempenho de 5 fluidos dielétricos de origem vegetal com o querosene e um óleo mineral. Foi usado um aço rápido ABNT M2 com parâmetros pré-estabelecidos de acabamento fino e desbaste com eletrodos de cobre e grafite. Foram medidas as taxas de remoção de material (TRM) e o desgaste dos eletrodos-ferramenta. Foram avaliadas as modificações superficiais no material usinado, como a rugosidade e a morfologia, a quantidade e o comprimento de microtrincas, a espessura das camadas refundidas e da zona afetada pelo calor. As modificações nas propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaios de microdureza Vickers. Em comparação com fluidos tradicionais, tanto nas usinagens com eletrodos de cobre quanto de grafite, os resultados mostram a competitividade dos fluidos de origem vegetal, principalmente em termos de desbaste.

Palavras Chave: usinagem por descargas elétricas, óleos vegetais, fluidos dielétricos, taxa de remoção de material, topografia.

LIMA, R. M. **The use of vegetal-based dielectric fluids in die-sink EDM processes.** 2008
Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia.

Abstract

Dielectric fluids usually used in electrical discharge machining (EDM) are generally expensive, toxic and demand special storage and disposal procedures. Oil-based dielectric fluids pollute the environment and are subject to the price variations of the international market. Moreover, they are used in large quantities and discarded after short periods of time, thus increasing the production cost. Furthermore, the tendency toward exhausting world oil reserves should not be disconsidered. This paper presents a performance comparison of five vegetal-based dielectric fluids with kerosene and a specific synthetic oil. High speed steel with pre-established fine finishing and wear parameters was utilized, employing both copper and graphite electrodes. The material removal rate (MRR) and wear of the tool electrode were measured. An evaluation of the superficial modifications of the machined material was made including roughness, the morphology, number and length of microcracks, the thickness of the recast layer and the heat-affected zone. The modifications of the mechanical properties were evaluated by Vickers' micro-hardness testing. In comparison to traditional fluids, using both copper and graphite electrodes, the results show the competitiveness of the vegetal-based fluids, especially in terms of rough regimen.

Keywords: EDM, vegetal oils, dielectric fluids, MRR, topography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Eletrodo-ferramenta de cobre, matriz e peça.....	20
Figura 2.2 - Matriz confeccionada por usinagem por descargas elétricas (EDM) com eletrodo-ferramenta de grafite	20
Figura 2.3 - Peças com geometrias complexas obtidas através do processo de usinagem por descargas elétricas (EDM).....	20
Figura 2.4 - Ciclo de uma descarga elétrica entre dois eletrodos submersos num meio líquido de trabalho.....	22
Figura 2.5 - Esquema dos principais elementos construtivos de um equipamento de usinagem por descargas elétricas (EDM).....	24
Figura 2.6 - Impacto ambiental resultante do uso da usinagem por descargas elétricas de matriz profunda	25
Figura 2.7 - Alta frequência, acabamento	32
Figura 2.8 - Baixa frequência, desbaste.....	32
Figura 2.9 - Acabamento ou textura e integridade superficiais	35
Figura 2.10 -Micrografia obtida via MEV do aço rápido D2 usinado com eletrodo-ferramenta de cobre e querosene como fluido dielétrico - Corrente utilizada: 12 A; tempo de duração da descarga: 15 μ s	36
Figura 2.11 -Micrografia obtida via MEV mostrando a penetração da microtrinca no material base do aço D2 - eletrodo-ferramenta de cobre, dielétrico querosene - Corrente utilizada: 6A; tempo de duração da descarga: 15 μ s....	37
Figura 2.12 -Seção transversal obtida por microscópio ótico da superfície usinada do aço rápido da classe M com fluido dielétrico derivado de petróleo e eletrodo-ferramenta de cobre.....	38
Figura 2.13 -Seção transversal da superfície usinada do aço rápido da classe M com fluido dielétrico derivado de petróleo e eletrodo-ferramenta de cobre, atacadas com Nigreen	38
Figura 2.14 -Micrografia via MEV mostrando a camada refundida no aço rápido AISI P 20 usinado com eletrodo-ferramenta de cobre e um fluido hidrocarboneto como dielétrico	39
Figura 2.15 -Micrografia apresentando as camadas características do processo de usinagem por descargas elétricas (EDM)	40
Figura 2.16 -Impressões de microdureza Vickers, com carga de 50g, aço rápido da classe M observado em microscopia ótica	41
Figura 3.1 - Máquina de usinagem por descargas elétricas (EDM) por penetração - Engemaq 440 NC.....	42
Figura 3.2 - Cuba com capacidade para 10 litros utilizada nos ensaios. (a) - vista frontal e (b) - vista lateral	43
Figura 3.3 - Dimensões da barra do aço rápido ABNT M2 usado nos ensaios	46
Figura 3.4 - Dimensões (mm) dos eletrodos-ferramenta de cobre e grafite utilizados nos ensaios.....	47
Figura 3.5 - Esquema da metodologia utilizada para os ensaios.....	49

Figura 3.6 - Desenho esquemático mostrando o comprimento do eletrodo-ferramenta e como foi realizada a medição	51
Figura 3.7 - Desenho esquemático mostrando da usinagem até o corte para a preparação das amostras para os ensaios	52
Figura 3.8 - Face da barra usinada (<i>bit</i>) utilizada para medição de microtrincas.....	54
Figura 4.1 - TRM obtidas através do processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) em regime desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite	56
Figura 4.2 - TRM obtidas através do processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) em regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite	57
Figura 4.3 - Valores do desgaste volumétrico obtido através do processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) em regime desbaste com eletrodo-ferramenta de cobre e grafite.....	59
Figura 4.4 - Comportamento do desgaste volumétrico relativo do aço rápido AISI P20 sob usinagem de desbaste com corrente média durante a descarga de 32A e variação de relação de contato de 0,5 a 0,8	60
Figura 4.5 - Valores do desgaste volumétrico obtido através do processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) em regime de acabamento fino com os eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.....	61
Figura 4.6 - Topografia das superfícies obtidas no regime de acabamento fino (esquerda) e desbaste (direita) usinadas com eletrodo-ferramenta de cobre utilizando como dielétricos os fluidos milho, mineral e querosene. Microscopia eletrônica de varredura	63
Figura 4.7 - Topografia das superfícies obtidas no regime de acabamento fino (esquerda) e desbaste (direita) usinadas com eletrodo-ferramenta de grafite utilizando como dielétricos os fluidos milho, mineral e querosene. Microscopia eletrônica de varredura	64
Figura 4.8 - Rugosidades das superfícies geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de desbaste utilizando eletrodos-ferramentas de cobre e grafite	66
Figura 4.9 - Topografia obtida via interferometria laser das superfícies usinadas pelo processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) com eletrodo-ferramenta de cobre (esquerda) e grafite (direita) no regime de desbaste com os fluidos milho, mineral e querosene.....	67
Figura 4.10 -Rugosidade das superfícies geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de acabamento fino utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite..	68
Figura 4.11 -Topografias obtidas via interferometria laser das superfícies usinadas pelo processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) com eletrodo-ferramenta de cobre (esquerda) e grafite (direita) no regime de acabamento fino com os fluidos milho, mineral e querosene.	69
Figura 4.12 -Imagens obtidas através da microscopia eletrônica de varredura das microtrincas das superfícies geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) com eletrodos-ferramenta de cobre (esquerda) e grafite (grafite) no regime de desbaste...	71

Figura 4.13 -Quantidade de microtrincas geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de desbaste utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.....	72
Figura 4.14 -Densidade de microtrincas geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de desbaste utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.....	73
Figura 4.15 -Comprimento médio das microtrincas geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de desbaste utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.....	73
Figura 4.16 -Imagens obtidas através da microscopia eletrônica de varredura das microtrincas das superfícies geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) com eletrodos-ferramenta de cobre (esquerda) e grafite (grafite) no regime de acabamento fino.	75
Figura 4.17 -Quantidade de microtrincas geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de acabamento fino utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.....	76
Figura 4.18 -Densidade de microtrincas geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de acabamento fino utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.....	77
Figura 4.19 -Comprimento médio das microtrincas geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de acabamento fino utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.....	77
Figura 4.20 -Imagens obtidas através da microscopia ótica da camada refundida e da zona afetada pelo calor (ZAC) com eletrodos-ferramenta de cobre (esquerda) e grafite (direita). Fluido de milho, mineral e querosene - regime de desbaste.....	79
Figura 4.21 -Espessura média da camada refundida gerada no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.....	80
Figura 4.22 -Imagens obtidas através da microscopia ótica da camada refundida e da zona afetada pelo calor (ZAC) com eletrodos-ferramenta de cobre (esquerda) e grafite (direita). Fluido de milho, mineral e querosene - regime de acabamento fino.....	82
Figura 4.23 -Espessura média da camada refundida gerada no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.....	83
Figura 4.24 -Espessura média da zona afetada pelo calor (ZAC) gerada no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.	85
Figura 4.25 -Espessura média da zona afetada pelo calor (ZAC) gerada no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.	86
Figura 4.26 -Microdureza Vickers da camada refundida do aço rápido após processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de desbaste utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.	88

- Figura 4.27 -Microdureza Vickers da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço rápido após processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de desbaste utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite 89
- Figura 4.28 -Microdureza Vickers da camada refundida do aço rápido após processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime acabamento fino utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite..... 91
- Figura 4.29 -Microdureza Vickers da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço rápido após processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de acabamento fino utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite 92

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 -	Parâmetros utilizados para usinagens nos regimes de acabamento fino e desbaste.....	44
Tabela 3.2 -	Correntes e voltagens medidas durante os ensaios	45
Tabela 3.3 -	Composição aproximada do aço rápido ABNT M2 em (%)	46
Tabela 3.4 -	Características físicas do cobre e do grafite.....	47
Tabela 3.5 -	Média de preços de mercado por litro para os fluidos testados orçados no varejo (valores em reais).....	48
Tabela 3.6 -	Viscosidade em <i>centipoise</i> dos fluidos testados.....	49
Tabela 4.1 -	Valores da TRM obtidos no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.	55
Tabela 4.2 -	Valores da TRM obtidos no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramentas de cobre e grafite.	57
Tabela 4.3 -	Valores da taxa de desgaste e do desgaste volumétrico relativo dos eletrodos-ferramenta de cobre e grafite obtidos no regime de desbaste.....	59
Tabela 4.4 -	Valores da taxa de desgaste e do desgaste volumétrico relativo dos eletrodos-ferramenta de cobre e grafite obtidos no regime de acabamento fino.....	61
Tabela 4.5 -	Valores da rugosidade média aritmética superficial (S_a) obtida no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.	65
Tabela 4.6 -	Valores da rugosidade média aritmética superficial (S_a) obtida no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.	68
Tabela 4.7 -	Quantidade, densidade e comprimento médio das microtrincas geradas no regime de desbaste, com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite	72
Tabela 4.8 -	Quantidade, densidade e comprimento médio das microtrincas geradas no regime de acabamento fino, com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite	76
Tabela 4.9 -	Valores da espessura média da camada refundida gerada no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.	80
Tabela 4.10 -	Valores da espessura média da camada refundida gerada no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.	83
Tabela 4.11 -	Valores da espessura média da zona afetada pelo calor (ZAC) no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.	84
Tabela 4.12 -	Valores da espessura média da zona afetada pelo calor (ZAC) no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.	86
Tabela 4.13 -	Valores da microdureza Vickers da camada refundida do aço rápido usinado no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.....	87
Tabela 4.14 -	Valores da microdureza Vickers da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço rápido usinado no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite	89

Tabela 4.15 - Valores da microdureza Vickers da camada refundida do aço rápido usinado no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite	90
Tabela 4.16 - Valores da microdureza Vickers da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço rápido usinado no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite	92
Tabela 4.17 - Resultados obtidos no regime de desbaste	96
Tabela 4.18 - Resultados obtidos no regime de acabamento fino	98

LISTA DE SÍMBOLOS

EDM	-	Electrical discharge machining;
TRM	-	Taxa de remoção de material;
TD	-	Taxa de desgaste dos eletrodos-ferramenta;
ϑ	-	Desgaste volumétrico relativo;
ZAC	-	Zona afetada pelo calor;
MEV	-	Microscópio eletrônico de varredura;
Δm	-	Diferença entre a massa inicial e a final do material da peça (g);
γp	-	Massa específica da peça;
V	-	Volume de material removido da peça (mm ³);
T	-	Tempo de usinagem (min);
R _a	-	Rugosidade média aritmética (perfil) em μm ;
T _{on}	-	Tempo de duração de cada descarga (μs);
T _{off}	-	Tempo inativo de cada descarga (μs);
DT	-	Percentual relativo entre T _{on} e T _{off} (%);
T _s	-	Intensidade de corrente ajustável da máquina;
Sa	-	Média aritmética da rugosidade (superfície) em μm ;
HV	-	Dureza Vickers.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	Introdução.....	17
CAPÍTULO II	Revisão bibliográfica.....	19
2.1	O processo de usinagem por descargas elétricas (EDM).....	19
2.2	Princípio de funcionamento do processo de usinagem por descargas elétricas (EDM)	23
2.3	Fluidos dielétricos.....	24
2.3.1	Propriedades dos fluidos dielétricos	26
2.4	Eletrodos-ferramenta.....	29
2.5	Material usinado	30
2.6	Regime de acabamento fino e desbaste.....	31
2.7	Caracterização	33
2.7.1	Taxa de remoção de material	33
2.7.2	Desgaste dos eletrodos-ferramenta.....	34
2.7.3	Topografia.....	35
2.8	Microestrutura	36
2.8.1	Quantidade e comprimento das microtrincas	36
2.8.2	Camada refundida	38
2.8.3	Zona afetada pelo calor	39
2.8.4	Microdureza	40
CAPÍTULO III	Metodologia	42
3.1	Equipamento de usinagem por descargas elétricas (EDM).....	42
3.2	Variáveis de Usinagem	44
3.3	Material usinado	46
3.4	Materiais e geometria dos eletrodos-ferramenta.....	46
3.4.1	Eletrodo-ferramenta de cobre	47
3.4.2	Eletrodo-ferramenta de grafite.....	47
3.5	Fluidos utilizados.....	48
3.6	Taxa de remoção de material (TRM) e desgaste dos eletrodos-ferramenta (TD).....	50
3.6.1	Taxa de remoção de material (TRM).....	50
3.6.2	Taxa de desgaste do eletrodo-ferramenta e desgaste volumétrico relativo	50
3.7	Topografia	53
3.8	Modificações estruturais.....	53
3.8.1	Quantidade e comprimento das microtrincas	53
3.8.2	Camada refundida e zona afetada pelo calor (ZAC)	54
3.8.3	Microdureza	54

CAPÍTULO IV Resultados e Discussões	55
4.1 Taxa de remoção de material (TRM)	55
4.2 Desgaste dos eletrodos-ferramenta	58
4.3 Topografia	62
4.3.1 Morfologia (Através de microscopia eletrônica de varredura)	62
4.3.2 Rugosidade.....	65
4.4 Modificações estruturais.....	70
4.4.1 Quantidade e comprimento das microtrincas	70
4.4.2 Caracterização microestrutural e microdureza	78
4.4.2.1 Camada refundida	78
4.4.2.2 Zona afetada pelo calor (ZAC)	84
4.4.2.3 Microdureza	87
CAPÍTULO V Conclusão	94
REFERÊNCIAS	100

CAPÍTULO I

Introdução

A usinagem por descargas elétricas (EDM) é um dos processos de remoção de material não convencional mais extensivamente usado. Sua característica única de empregar a energia térmica para usinar peças condutoras eletricamente independentemente da dureza tem sido sua vantagem distintiva na fabricação de moldes, matrizes componentes automotivos, aeroespaciais e cirúrgicos (HO *et al*, 2003).

Amorim (2002) cita em sua tese que o processo de eletroerosão é amplamente utilizado na indústria de ferramentaria na confecção de características geométricas de difícil usinagem, como, por exemplo, cavidades estreitas e profundas, ranhuras de paredes finas e altas, e pequenos raios de canto.

A eletroerosão é um processo de conformação em que o eletrodo ou ferramenta de usinagem reproduz a sua imagem ou geometria na peça. Na obtenção desta imagem, remove-se o material por descargas elétricas. Em geral, a remoção é feita sob um líquido não condutor de eletricidade, denominado dielétrico. A peça e a ferramenta são posicionadas de forma que, entre ambos, situa-se a fenda de trabalho. Ao aplicar-se uma tensão elevada, tem-se uma descarga de uma faísca. Ocorre transmissão de calor que provoca a fusão e a evaporação de volumes de material. Assim a usinagem por eletroerosão se caracteriza por ser essencialmente um processo térmico (PIRES *et al*, 2002).

A preservação do meio ambiente, as rigorosas leis de proteção ao trabalhador e a preocupação das empresas em baixarem os seus custos, mostra que este processo necessita de mais avanços tecnológicos no que diz respeito aos fluidos dielétricos derivados de petróleo. Estes fluidos são tóxicos e necessitam de cuidados tanto no armazenamento quanto no seu descarte.

O objetivo deste trabalho é comparar o desempenho de cinco fluidos dielétricos à base de óleos vegetais com o querosene e um fluido mineral. Estes fluidos vegetais podem

substituir os fluidos derivados de petróleo, pois podem usinar nas mesmas condições, são renováveis, atóxicos e não necessitam de tantos cuidados na armazenagem e descarte.

Neste trabalho, um aço rápido foi usinado com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite utilizando parâmetros pré-estabelecidos. Para a avaliação do rendimento tecnológico do processo, os seguintes aspectos foram quantificados: a taxa de remoção de material (TRM), a taxa de desgaste (TD) e o desgaste volumétrico relativo (9). A morfologia foi analisada via microscopia eletrônica de varredura (MEV), a rugosidade através de interferometria laser, a espessura e a microdureza da camada refundida e da zona afetada pelo calor (ZAC) por microscopia óptica e microdureza Vickers complementarão este estudo.

Pretende-se com este trabalho promover o uso dos óleos vegetais para fins de proteger a saúde do operador, preservar o meio ambiente e baixar os custos de produção das indústrias que utilizam a eletroerosão.

No Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), já foram realizados alguns ensaios comparativos com querosene, fluido mineral e um fluido vegetal com resultados satisfatórios (COSTA BRASIL, 2006).

CAPÍTULO II

Revisão bibliográfica

2.1 O processo de usinagem por descargas elétricas (EDM)

Da mesma forma que ocorre em muitas outras áreas técnicas, a aplicação tecnológica prática de descargas elétricas como processo de produção aconteceu devido à necessidade do ambiente industrial em solucionar alguns dos seus intrínsecos problemas de fabricação (AMORIM, 2002).

Em 1943, dois russos, B.R. e N. I. Lazarenko, ao investigarem o desgaste de contatos de interruptores, deduziram que as descargas de centelhas poderiam ser utilizadas para usinar novos metais recém desenvolvidos que provaram ser difíceis de moldar pelos métodos convencionais (McGEOUGH, 1988).

A usinagem por descargas elétricas (EDM), um processo de usinagem não tradicional, tem substituído a furação, a fresagem, a retificação e outras operações de usinagem tradicionais e é agora uma opção de usinagem bem estabelecida em muitas indústrias em todo o mundo (SINGH *et al*, 2004).

Cusanelli *et al* (2004) afirmam que a usinagem por descargas elétricas (EDM) é uma técnica amplamente usada para usinar metais duros e para executar tarefas específicas que não podem ser alcançadas usando técnicas convencionais.

A usinagem por descargas elétricas (EDM) é o processo de remoção de material por descargas elétricas de qualquer peça condutora. Isso é realizado aplicando corrente alternada ou contínua pulsada de alta frequência à peça, através de um eletrodo ou fio, que funde e vaporiza o material da peça (GUITRAU, 1997).

Neste processo, não há necessidade de o eletrodo-ferramenta possuir maior dureza do que a peça a ser usinada, como acontece nos processos de usinagem tradicionais. Isso pode reduzir os custos por um lado, mas a confecção da ferramenta geralmente possui custos elevados.

Nas Figuras 2.1, 2.2 e 2.3 são mostrados alguns exemplos de ferramentas, peça e produto final utilizados em usinagens por descargas elétricas.



Figura 2.1 - Eletrodo-ferramenta de cobre, matriz e faca (CATÁLOGO TÉCNICO CHARMILLES).



Figura 2.2 - Matriz confeccionada por usinagem por descargas elétricas (EDM) com eletrodo-ferramenta de grafite (CATÁLOGO TÉCNICO CHARMILLES).

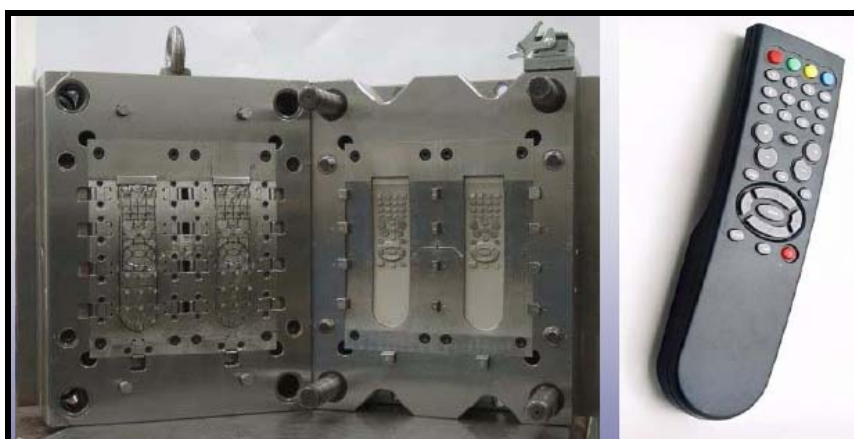


Figura 2.3 - Peças com geometrias complexas obtidas através do processo usinagem por descargas elétricas (EDM) (CATÁLOGO TÉCNICO CHARMILLES).

Existem várias teorias sobre a usinagem por eletroerosão para explicar a natureza de tudo o que acontece durante a ocorrência das descargas elétricas. Amorim (2002) cita, em sua tese, que a teoria termoelétrica apresenta as melhores evidências explicativas do fenômeno de remoção de material por descargas elétricas. De acordo com esta teoria, o ciclo de uma descarga elétrica entre dois eletrodos submersos num meio líquido de trabalho ocorre em quatro fases consecutivas, a saber:

1. Fase de ignição da faísca:

- ⇒ O eletrodo se aproxima da peça;
- ⇒ As duas unidades são energizadas;
- ⇒ Concentração do campo elétrico na fenda de trabalho (*gap*);

2. Formação do canal de plasma:

- ⇒ Criação de um canal ionizado entre o eletrodo e a peça;

3. Fusão e evaporação de uma pequena quantidade de material nos eletrodos:

- ⇒ Interrupção da centelha;
- ⇒ Material da peça se funde localmente e se desintegra;
- ⇒ O eletrodo se desgasta levemente;

4. Ejeção do material fundido:

- ⇒ Evacuação das partículas metálicas pelo fluxo do dielétrico.

Na Figura 2.4 é apresentado um esquema onde pode ser visto as quatro fases, que de acordo com a teoria termoelétrica, ocorre o ciclo de uma descarga elétrica entre dois eletrodos submersos num meio dielétrico.

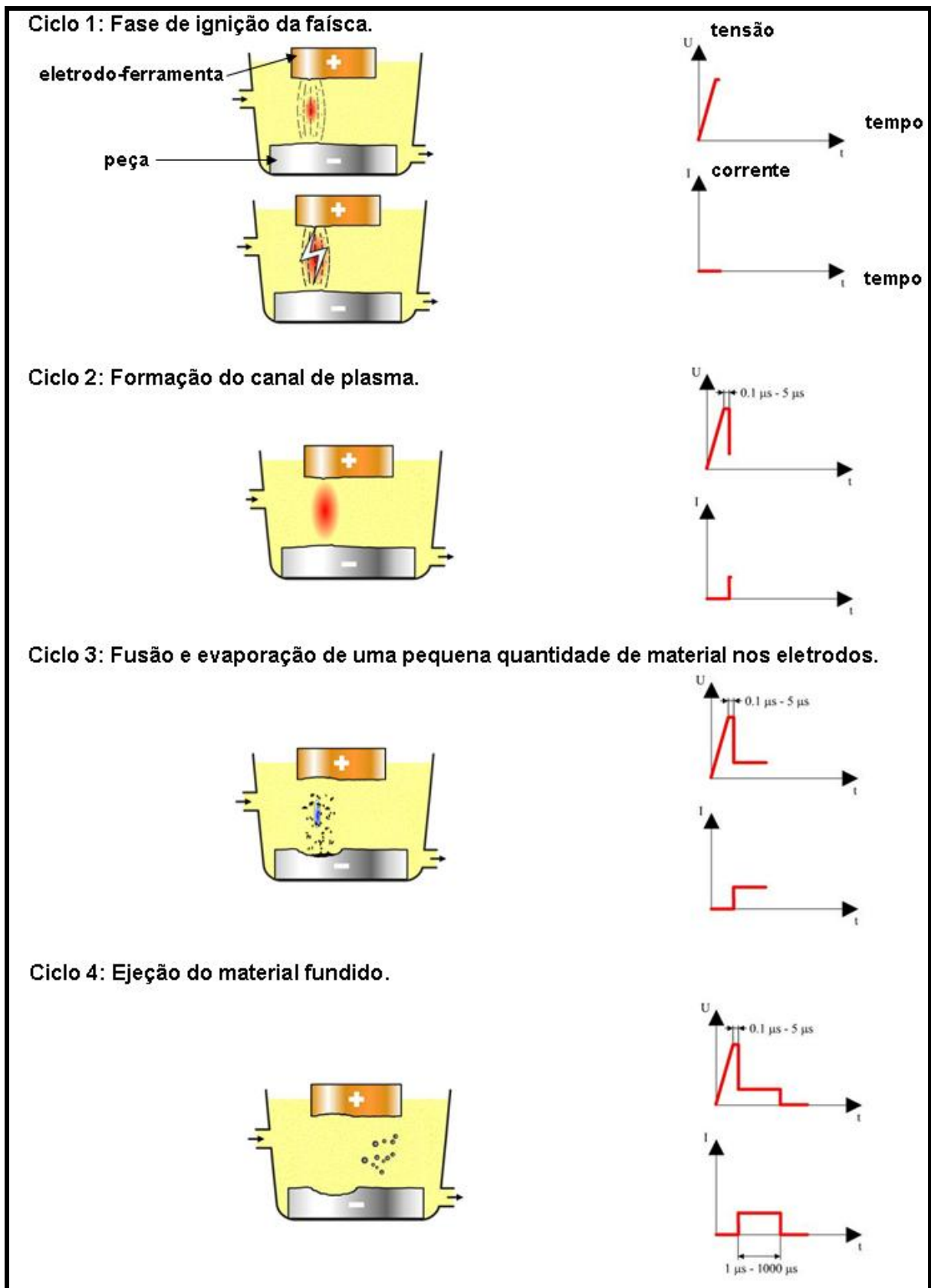


Figura 2.4 - Ciclo de uma descarga elétrica entre dois eletrodos submersos num meio líquido de trabalho.

2.2 Princípio de funcionamento do processo de usinagem por descargas elétricas (EDM)

Na máquina de eletroerosão, a ferramenta é avançada em direção à peça, ambos mergulhados num líquido isolante, ou fluido dielétrico como é mais conhecido. A ferramenta é carregada positivamente e a mesa e a peça são negativas (ou vice-versa).

Uma série de pulsos voltaicos é aplicada entre os dois eletrodos, que são separados pela fenda de trabalho (*gap*), numa distância em torno de 0,01 a 0,5 mm (McGEOUGH, 1988).

À medida que o eletrodo-ferramenta, carregado com um potencial de alta voltagem, se aproxima da peça, forma-se um intenso fluxo eletromagnético e, finalmente, rompem-se as propriedades isolantes do fluido dielétrico. O fluido dielétrico é integrado ao processo. Ele fornece isolamento contra descargas prematuras, resfria a área isolada, e remove os detritos (GUITRAU, 1997).

O processo de quebra do dielétrico é um evento localizado: ele ocorre num canal de raio, aproximadamente, 10 μm (McGEOUGH, 1988).

Quando os elétrons e os íons positivos alcançam o ânodo e o cátodo, eles liberam sua energia cinética na forma de calor. Temperaturas de aproximadamente 8000 a 12000° C e fluxos de calor de até 10^{17} Wm^{-2} podem ser atingidos. Devido à evaporação do dielétrico, a pressão no canal de plasma sobe rapidamente a valores de até 200 atm. Porém, no final do pulso, quando a voltagem é removida, a pressão também cai repentinamente, e o metal superaquecido é evaporado explosivamente (McGEOUGH, 1988).

À medida que a ação procede, o canal do plasma aumenta de largura, e a densidade da corrente através da fenda de trabalho (*gap*) intereletrodo diminui. Com a fração da corrente em função da diminuição dos elétrons, as contribuições dos íons positivos aumentam, e proporcionalmente mais metal é então erodido do cátodo. A erosão de metal do cátodo pode ser de até 99,5%, sendo o desgaste do ânodo mantido a 0,5%. Em usinagem por descargas elétricas (EDM), portanto, o eletrodo-catodo é transformado na peça e o ânodo torna-se a ferramenta (McGEOUGH, 1988).

Na Figura 2.5, é apresentado um esquema dos principais elementos construtivos de um equipamento usinagem por descargas elétricas (EDM).

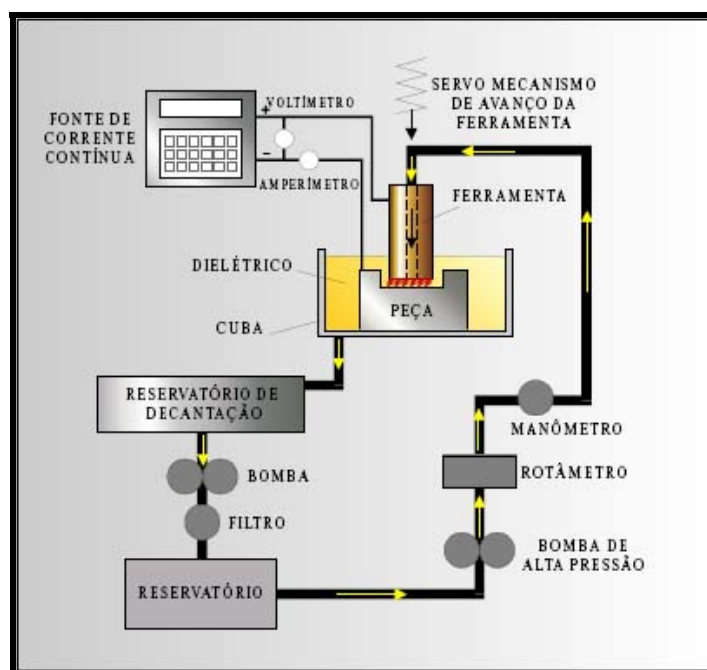


Figura 2.5 - Esquema dos principais elementos construtivos de um equipamento de usinagem por descargas elétricas (EDM) (ARANTES, 2001).

2.3 Fluidos dielétricos

A conservação do meio ambiente representa para as empresas uma responsabilidade incontestável. Por outro lado, cada vez mais o mercado exige da empresa uma atuação transparente e concreta de preservação e conservação do meio ambiente, a qual se materializa pela realização de atividades que apresentem um mínimo impacto ambiental (RIBÓ, 1998).

Uma das principais fontes de poluição ambiental foi atribuída à indústria manufatureira (TAN *et al*, 2002) e segundo Munoz *et al* (1995), os processos de usinagem desempenham um papel importante uma vez que ele é o processo de fabricação mais usado.

A minimização do impacto ambiental tem sido um importante tópico para os fabricantes de todo o mundo, especialmente após a introdução das padronizações de sistemas de gerenciamento ambiental da ISO 14000. Além de maximizar a qualidade e custos, é imperativo para as indústrias de manufatura estarem preocupadas com a minimização do impacto ambiental de seus processos e produtos. A abordagem que tem sido usada para ter uma produção limpa que esteja de acordo com as exigências da ISO 14000 é identificar e eliminar as origens da poluição (LEÃO *et al*, 2004).

Leão *et al* (2004), afirmam também que uma das principais origens de poluição em usinagens por descargas elétricas de matrizes profundas é o fluido dielétrico, particularmente os óleos hidrocarbonetos. No momento, não há nenhum processo de manufatura totalmente limpo que possa substituir a EDM. O uso de gás (ar, oxigênio) em EDM poderia ser uma alternativa porque não produz nenhum resíduo e não causa nenhum efeito adverso à saúde. Porém, esta técnica não está desenvolvida o suficiente para ser empregada eficientemente.

De acordo com a norma NBR 1004 (1987), fluidos dielétricos são considerados resíduos da classe I (perigosos). Segundo esta mesma norma, um fluido será caracterizado como inflamável quando uma amostra for líquida e tiver ponto de fulgor inferior a 60° C.

Segundo Evertz *et al* (2006), o contato com o fluido dielétrico (pelo ar ou diretamente) pode levar a reações alérgicas (principalmente de pele). Goh *et al* (1993) citam que os óleos hidrocarbonetos usados em EDM possuem componentes que irritam a pele causando dermatites. Leggat *et al* (2006) confirmam que os fluidos dielétricos contém agentes que irritam a pele dos operadores de EDM.

A Figura 2.6 mostra o impacto ambiental resultante do uso de usinagem por descargas elétricas (EDM) de matrizes profundas. Segundo Leão *et al* (2004), após a usinagem por descargas elétricas existem sedimentos (materiais removidos da peça e da ferramenta), resíduos dielétricos, cartuchos de filtros e resinas deionizadas que necessitam serem descartadas adequadamente para evitar a poluição do solo e rios.

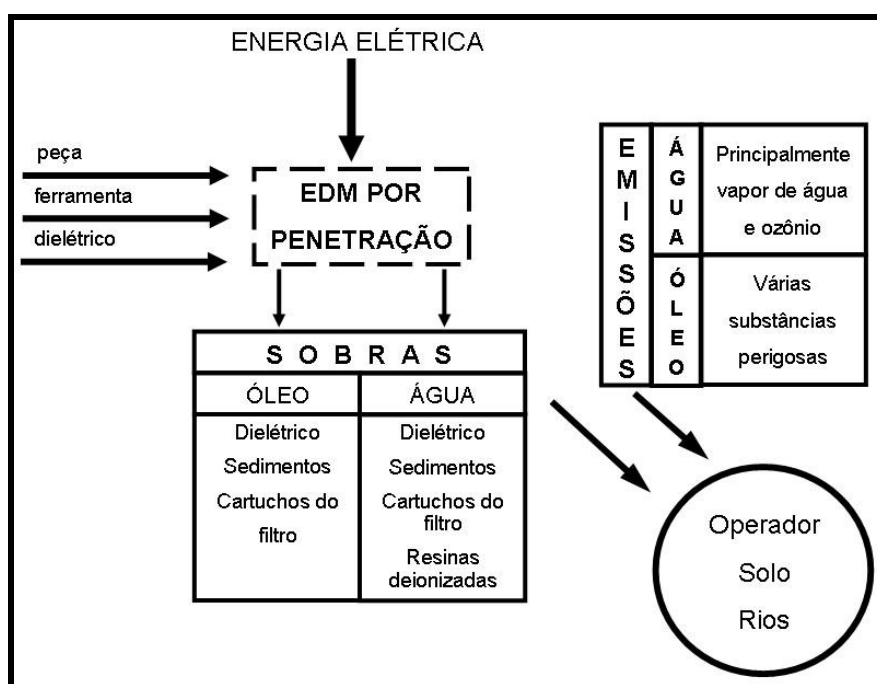


Figura 2.6 - Impacto ambiental resultante do uso da usinagem por descargas elétricas de matriz profunda (LEÃO *et al*, 2004).

Os fluidos dielétricos, especificamente desenvolvidos para o processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) submersa, são produtos hidrocarbonetos altamente refinados (ou sintéticos). Há numerosas características químicas e físicas que podem ser usadas para definir e identificar o desempenho de cada fluido (INTECH EDM, 1996).

Os fluidos dielétricos cumprem uma função extremamente importante com respeito à produtividade, aos custos e à qualidade das peças usinadas. Saúde, segurança e meio ambiente são também aspectos importantes particularmente quando óleo hidrocarboneto é usado (LEÃO *et al*, 2003).

EDM de matrizes profundas geralmente operam com óleo hidrocarboneto, enquanto a fio, micro EDM e furação rápida de furos geralmente trabalham com água deionizada (LEÃO *et al*, 2003).

Segundo Wong *et al* (1995), as características básicas requeridas para um dielétrico usado em EDM são alta rigidez e rápida recuperação após a descarga, resfriamento rápido efetivo e habilidade de lavagem. McGeough *et al* (1997) afirmam que as principais qualidades exigidas do fluido dielétrico são: possuir rigidez dielétrica suficientemente alta para permanecer eletricamente não condutor até que a tensão de ruptura seja alcançada; ser capaz de se desionizar rapidamente após a descarga. Rehbein *et al* (2004), confirmam as informações dos autores acima, citando em seu trabalho que os fluidos devem remover as partículas erodidas; aumentar a densidade do canal de plasma e esfriar ferramenta e peça.

De acordo com Amorim (2002), a viscosidade do dielétrico age diretamente sobre os índices da taxa de remoção de material e do desgaste relativo, por causa de sua influência sobre as condições de lavagem e estrangulamento do canal de plasma, bem como sobre a refrigeração dos eletrodos.

Wong *et al* (1995) relatam também que há muita informação na literatura sobre a influência da lavagem dos detritos de EDM na taxa de remoção de material, no desgaste do eletrodo-ferramenta e na precisão dos perfis produzidos, mas há pouca informação da influência na integridade dos componentes usinados por EDM.

2.3.1 Propriedades dos fluidos dielétricos

Para atender às exigências que o processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) requer do dielétrico, as características principais destes fluidos são descritas a seguir:

Rigidez Dielétrica: capacidade de isolamento de um dado fluido para EDM. Maior rigidez dielétrica implica menor distância entre ferramenta-peça, com o conseqüente aumento da precisão da usinagem. Alta rigidez dielétrica ajuda a minimizar o arco e é freqüentemente tida como indicadora do desempenho do processo EDM. (INTECH EDM, 1996).

Tempo de Deionização: este se refere ao tempo para íons e elétrons se recombinarem depois de uma descarga. Quanto menor é o tempo de deionização, menor é o tempo inativo de cada descarga (**Toff**) necessário entre os pulsos subseqüentes. Esta característica faz com que se evitem curtos-circuitos (ARANTES, 2001).

Viscosidade: Viscosidade é uma medida da resistência ao escoamento do fluido. Menor viscosidade, melhores serão as características de escoamento, particularmente em cavidades profundas, pequenos detalhes, etc., apesar de alta viscosidade poderem proporcionar bom desempenho em alguns tipos de operações de desbaste. Alta viscosidade prejudica a expulsão dos produtos da erosão da interface ferramenta-peça. Para pulsos de pequena energia, é aconselhável uma baixa viscosidade do dielétrico para maior eficiência do processo. (INTECH EDM, 1996).

Calor Específico: Quanto maior o calor específico, mais energia térmica pode ser acumulada sem grande aumento na temperatura, o que aumenta o rendimento do processo e a vida do fluido dielétrico. O elevado crescimento da temperatura aumenta a difusão de átomos da peça para o fluido e vice-versa, o que pode causar alterações significativas na estrutura do material usinado, além do aparecimento de uma maior quantidade de microtrincas causadas pelo calor excessivo (FERNANDES, 1999).

Condutividade Térmica: Quanto maior a condutividade térmica do fluido dielétrico, menor é o tempo necessário para solidificar e refrigerar as gotas de metal expelidas da zona de erosão. Isso reduz a possibilidade de partículas se aderirem ao eletrodo ou se redepositarem na superfície da peça. (ARANTES, 2001).

Ponto de Ebulição: Quanto maior o ponto de ebulição do dielétrico, este se mantém mais estável em temperaturas elevadas sem perder suas propriedades originais, perdendo frações menores de componentes pela evaporação seletiva das frações mais voláteis. (INTECH EDM, 1996).

Ponto de Fulgor: é a menor temperatura na qual um líquido libera vapor ou gás em quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável. Por mistura inflamável, para fins de apuração do ponto de fulgor, entenda-se a quantidade de gás ou vapor misturada com o ar atmosférico suficiente para iniciar uma inflamação em contato com uma chama (isto é, a queima abrupta do gás ou vapor), sem que haja a combustão do líquido emitente. (INTECH EDM, 1996).

Limite de Fluidez: é um indicador da capacidade que o fluido tem de escoar livremente a baixas temperaturas. A temperatura indicada é a mais baixa na qual o fluido pode escoar. (INTECH EDM, 1996).

Odor: Um “odor” pode indicar, muitas vezes, evaporação excessiva do dielétrico, mas pode também indicar a qualidade do local de trabalho para o operador. A maioria dos fluidos de alta qualidade do mercado são desodorizados ou com odor pequeno, mas tolerável (INTECH EDM, 1996).

Cor (Saybolt): A escala de Cor Saybolt é usada para descrever a cor de fluidos dielétricos para eletroerosão, usando valores numéricos de +30 até -30; com +30, indicando incolor, ou cor de água, e -30, uma cor de limão, um amarelo pálido. (INTECH EDM, 1996).

Estabilidade à Oxidação: A oxidação ocorre quando o oxigênio ataca e degrada o fluido dielétrico. O processo é acelerado pelo calor, luz e reações com metais; e na presença de água, ácidos e contaminantes sólidos. Quanto maior a estabilidade à oxidação do fluido dielétrico, maior será a duração no sistema EDM. (FERNANDES, 1999).

Custo: custo é um fator importante em qualquer produto usado por uma empresa. Entretanto, é uma falsa economia tentar economizar dinheiro usando produtos que não foram formulados para serem usados no processo EDM como fluido dielétrico. O risco de baixa expectativa de vida, potencial dano à saúde e baixo desempenho dielétrico são grandes. Por outro lado, alto custo não necessariamente corresponde a um melhor desempenho, ou melhor, qualidade das superfícies usinadas (INTECH EDM, 1996).

Perigo à saúde: Um fator muito importante, nos dias atuais, é o perigo à saúde causado por produtos químicos durante seu uso na indústria. Muitos esforços têm sido feitos para minimizar os riscos à saúde, graças à legislação trabalhista mais rigorosa, no Brasil e no mundo, visando proteger sempre a integridade física do operador. Fluidos sintéticos com

menores adições de aromáticos e até soluções aquosas são hoje usados para evitar problemas tais como dermatites, problemas respiratórios e até mesmo sérias intoxicações. Os efeitos à saúde causados por materiais manipulados têm se tornado um assunto de grande importância nos últimos anos. Apesar de todos os fornecedores de fluido EDM recomendarem um grande cuidado no armazenamento e que se evite prolongada exposição aos fluidos, na realidade, muitos operadores de EDM não usam proteções tais como luvas, máscaras e semelhantes. (INTECH EDM, 1996, ARANTES, 2001).

2.4 Eletrodos-ferramenta

Qualquer material que apresente condutividade elétrica pode ser utilizado como eletrodo-ferramenta. Os materiais que possuem alto ponto de fusão, condutividade elétrica e térmica apresentam menores taxas de desgaste.

Há uma extensa lista de materiais empregados para ferramentas de EDM, porém os mais usados são cobre e grafite. Lima (1997) afirma que dependendo do grau de complexidade da geometria que se deseja usinar, o tempo e custo de fabricação de uma ferramenta para esse processo é maior quando comparado com a obtenção de ferramentas a serem utilizadas nos processos convencionais. Por conseguinte, a escolha do material da ferramenta para a usinagem por descargas elétricas deve ser realizada de forma bastante criteriosa.

Existem vários outros materiais que podem ser utilizados como eletrodo-ferramenta tais como: cobre ao telúrio, cobre ao tungstênio, bronze, tungstênio à prata, liga de alumínio, latão, aço e outros.

O cobre tem como principais características as elevadas condutividades elétrica e térmica, boa resistência à corrosão e facilidade de fabricação, aliadas a elevadas resistências mecânica e à fadiga (ASM HANDBOOK, v. 2, 1990). Sua densidade é de 8,91 g/cm³, um pouco acima da do aço, e sua temperatura de fusão é de 1083 °C. Mas sua propriedade física mais importante é, sem dúvida, sua elevada condutividade elétrica, que é tomada como referência e estabelecida como sendo 100 % IACS (International Annealed Copper Standard). A resistividade elétrica do cobre está em torno de 17,1 nΩ·m (ASM HANDBOOK, v. 2, 1990).

Segundo Amorim (2002), o cobre apresenta grande vantagem em relação à grafite como material para eletrodos utilizados em aplicações para a indústria de equipamentos médicos. Isso se deve à boa capacidade de polimento do cobre. Existem casos de moldes

com estreitas tolerâncias onde não são adequados trabalhos de polimento, após a eletroerosão, por haver perda da repetitividade do molde durante a sua utilização. Dessa forma, a ferramenta é submetida somente a usinagem por EDM.

A grafite é um material que apresenta alto ponto de fusão (3727 °C), baixa densidade (em torno de 1,77 g/cm³) e boa resistência ao desgaste. Por apresentar baixa densidade, com grafite pode-se fabricar eletrodos de grande porte o que facilita o manuseio dentro das fábricas. Mas a grafite apresenta alguns inconvenientes como a fragilidade o que dificulta a fabricação de eletrodos-ferramenta de pequeno porte. A porosidade da grafite também pode gerar problemas de contaminação do eletrodo-ferramenta. A resistividade elétrica do grafite é mais alta do que a do cobre (em torno de 14,7 μΩ. m).

Amorim (2002) afirma que eletrodos de grafite são mais caros do que os de cobre. O mesmo autor afirma que o grafite tem uma menor dilatação térmica que o cobre, apresentando deformação quase nula durante o processo. Em especial, na eletroerosão de cavidades profundas sob condições de desbaste, a dilatação térmica volumétrica do cobre é consideravelmente alta, fato que normalmente compromete as condições de lavagem das partículas eletro erodidas.

2.5 Material usinado

Quanto maior for o ponto de fusão e vaporização do material da peça, menores serão a taxa de remoção de material, o desgaste do eletrodo e melhor o acabamento superficial. Materiais como alumínio, chumbo, magnésio e suas ligas são fáceis de serem usinados pelo EDM, por causa dos seus baixos ponto de fusão e vaporização. O contrário ocorre com materiais como o ósmio, titânio e suas ligas que têm elevados pontos de fusão e vaporização. Outra propriedade do material bastante influente é a condutividade elétrica. Quanto melhor condutor elétrico for o material, maior a taxa de remoção de material (ARANTES, 2001).

Os aços ferramentas são aqueles utilizados nas operações de corte, conformação, afiação e quaisquer outras relacionadas com a modificação de um material para um formato utilizável. Estes aços geralmente contém adições elevadas de teores de carbono e elementos de ligas, como tungstênio, molibdênio, vanádio, manganês e cromo. Boa parte dos aços ferramenta são forjados, mas alguns também são fabricados por fundição de precisão ou por metalurgia do pó. A seleção da matéria-prima para a fabricação dos aços

ferramentas é um fator importante do processo, e a sua seleção costuma ser cuidadosamente realizada inclusive na utilização de sucata (INFOMET, 1998 - 2006).

A fusão dos aços ferramenta é realizada, normalmente, em quantidades relativamente pequenas nos fornos elétricos, tomando-se um especial cuidado com as tolerâncias de composição química e homogeneidade do produto final. Estas e outras particularidades tornam o aço rápido um material de custo mais elevado do que os aços comuns (INFOMET, 1998 - 2006).

2.6 Regime de acabamento fino e desbaste

Os regimes de acabamento fino e desbaste apresentam graus de severidade distintos que facilitam a análise dos resultados obtidos.

No processo de usinagem por descargas elétricas (EDM), a polaridade representa qual lado da descarga é positiva ou negativa. A polaridade pode afetar a velocidade de remoção de material, ou melhor, taxa de remoção de material (TRM), acabamento e estabilidade (GUITRAU, 1997).

Segundo Arantes (2001), máquinas EDM por penetração podem usar tanto polaridade positiva quanto negativa, dependendo mais da aplicação, mas a maioria das operações são realizadas com o eletrodo positivo. A polaridade positiva vai usinar mais lentamente que a polaridade negativa, mas é usada na maioria das vezes para proteger a ferramenta de um desgaste excessivo. Amorim (2001) relata que em regime de desbaste, onde se empregam maiores níveis de correntes, as altas pressões e temperaturas do canal de plasma são mantidas por um maior período de tempo, isto é, mais longos são os tempos ótimos de duração da descarga. Assim se estabelece a polaridade positiva para o eletrodo-ferramenta e a negativa, para a peça. Em função disso, aumenta-se a taxa de remoção de material, diminui-se a taxa de desgaste do eletrodo-ferramenta e reduz o desgaste volumétrico.

Na usinagem com acabamento fino, percebe-se a alta frequência, onde a duração das descargas é mais curta. Aplicam-se grandes quantidades de descargas em mesma unidade de tempo. Dessa forma se obtêm superfícies com crateras pequenas com menor rugosidade. A camada refundida e a zona afetada pelo calor tendem a apresentar menores espessuras. A Figura 2.7 mostra o exemplo de alta frequência utilizada em regimes de acabamento.

Já na usinagem no regime de desbaste, a frequência é baixa, a duração das descargas são maiores na mesma unidade de tempo. Nesse regime se funde mais material, criando crateras grandes e com mais rugosidade. Devido à maior corrente aplicada, mais material será fundido, gerando, portanto, maiores espessuras de camada refundida e zona afetada pelo calor. A Figura 2.8 mostra o exemplo de baixa frequência utilizada em regimes de desbaste.

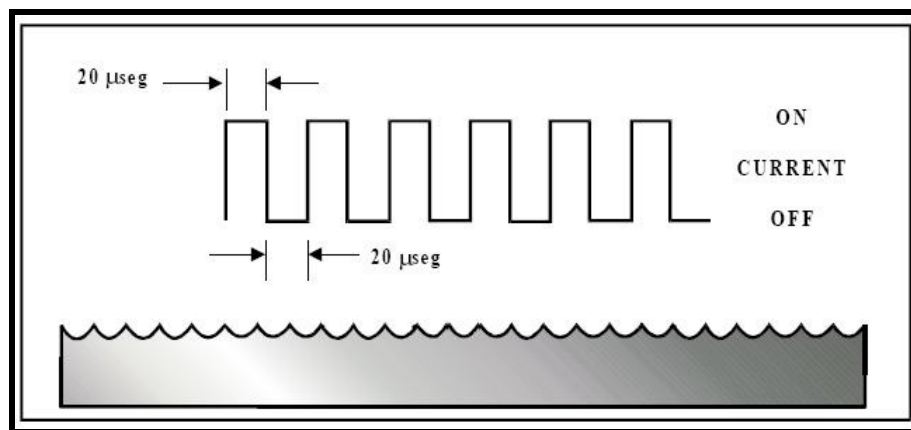


Figura 2.7 – Alta frequência, acabamento (GUITRAU, 1997).

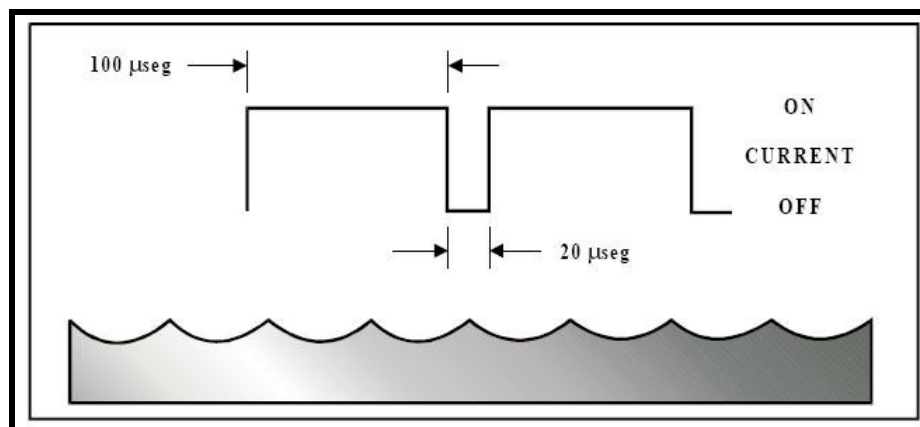


Figura 2.8 – Baixa frequência, desbaste (GUITRAU, 1997).

Guu *et al* (2003) relatam que correntes de pulso mais altas causam um acabamento de superfície de baixa qualidade superficial. Para um excelente acabamento fino, o mesmo autor informa dentre os parâmetros de usinagem, as correntes são baixas e com curta duração, o que ocasiona maior tempo de usinagem.

Lee *et al* (2003) mostraram, na usinagem dos aços ferramentas D2 e H13 com eletrodo-ferramenta de cobre, utilizando querosene como dielétrico, que à medida que a corrente de pulso e a duração do pulso ligado aumentam, a topografia da superfície piora

devido à enorme quantidade de calor gerada pelas descargas que causa fusão e vaporização do material, seguido de resfriamento rápido.

Chen *et al* (1999) relatam que devido ao grande número de variáveis (do processo) e a grande variedade de materiais (utilizados como ferramenta e peça), raramente é alcançado um ótimo desempenho na usinagem por descargas elétricas (EDM).

2.7 Caracterização

2.7.1 Taxa de remoção de material

Ainda não existe na literatura uma fórmula matemática precisa que possa expressar a taxa de remoção de material (TRM). O que se tem apresentado até agora são resultados realizados em laboratórios com equipamentos, parâmetros, óleos individuais e que gerou TRM semelhantes.

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

- a) As propriedades do material da peça, incluindo o ponto de fusão e calor latente;
- b) As propriedades do material da ferramenta, até mesmo os fatores geométricos;
- c) Os parâmetros de usinagem, dados principalmente por V e I;
- d) As características elétricas da forma do pulso de descarga, *Ton* e *Toff*;
- e) Sistema de lavagem;
- f) Tamanho da fenda de trabalho (*gap*);
- g) Fluido dielétrico (propriedades elétricas e térmicas, aditivos, temperatura...).

A dificuldade de modelagem ou simulação da TRM é bem complexa e pouco precisa (ARANTES, 2001).

A taxa de remoção de material pode ser expressa como:

$$TRM = \Delta m_p / \gamma_p \cdot \Delta t \text{ (mm}^3\text{/min)} \quad (2.1)$$

Onde:

Δm_p = Diferença entre a massa inicial e a final do material da peça (g);

γ_p = Massa específica material. No caso, aço rápido;

Δt = Tempo de usinagem (min)

2.7.2 Desgaste dos eletrodos-ferramenta

Os fabricantes de máquinas de usinagem por descargas elétricas (EDM) apresentam em seus catálogos algumas tabelas de referência onde se previne o desgaste do eletrodo-ferramenta. Essas tabelas são baseadas em condições laboratoriais de teste, podendo haver variações em função do material do eletrodo, procedimentos operacionais, lavagem utilizada, variação local da rede elétrica, tipo e contaminação do dielétrico.

No processo de usinagem por descargas elétricas por penetração, existe desgaste do eletrodo-ferramenta independentemente da polaridade escolhida. A energia aplicada no processo gera crateras no eletrodo-ferramenta que podem modificar a sua geometria e comprometer o desempenho da TRM e a precisão requerida.

Segundo Chen *et al* (1999), a taxa de desgaste dos eletrodos-ferramenta é o volume de material desgastado do eletrodo-ferramenta dividido pelo tempo de usinagem, dado em milímetros cúbicos por minuto.

$$TD = V/T \text{ (mm}^3\text{/min)} \quad (2.2)$$

Onde:

V = Volume de material desgastado do eletrodo-ferramenta (mm³);

T = Tempo de usinagem (min).

O mesmo autor informa que o desgaste relativo (desgaste volumétrico relativo) é a razão entre o volume de material desgastado do eletrodo-ferramenta e o volume de material erodido da peça dado em valores percentuais.

$$\vartheta = TD/TRM \text{ (%)} \quad (2.3)$$

Onde:

TD = Taxa de desgaste do eletrodo-ferramenta (mm³/min);

TRM = Taxa de remoção de material da peça (mm³/min).

2.7.3 Topografia

Uma superfície de uma peça tem dois aspectos importantes que devem ser definidos e controlados. O primeiro diz respeito às irregularidades geométricas da superfície, e o segundo diz respeito às alterações metalúrgicas da superfície e da camada da superfície. Este segundo aspecto foi chamado de integridade superficial. Tanto a textura quanto a integridade superficiais devem ser definidas, medidas, e mantidas dentro dos limites especificados no processamento de qualquer produto (FIELD *et al*, 1989).

A Figura 2.9 mostra os elementos inerentes à textura e à integridade superficiais.

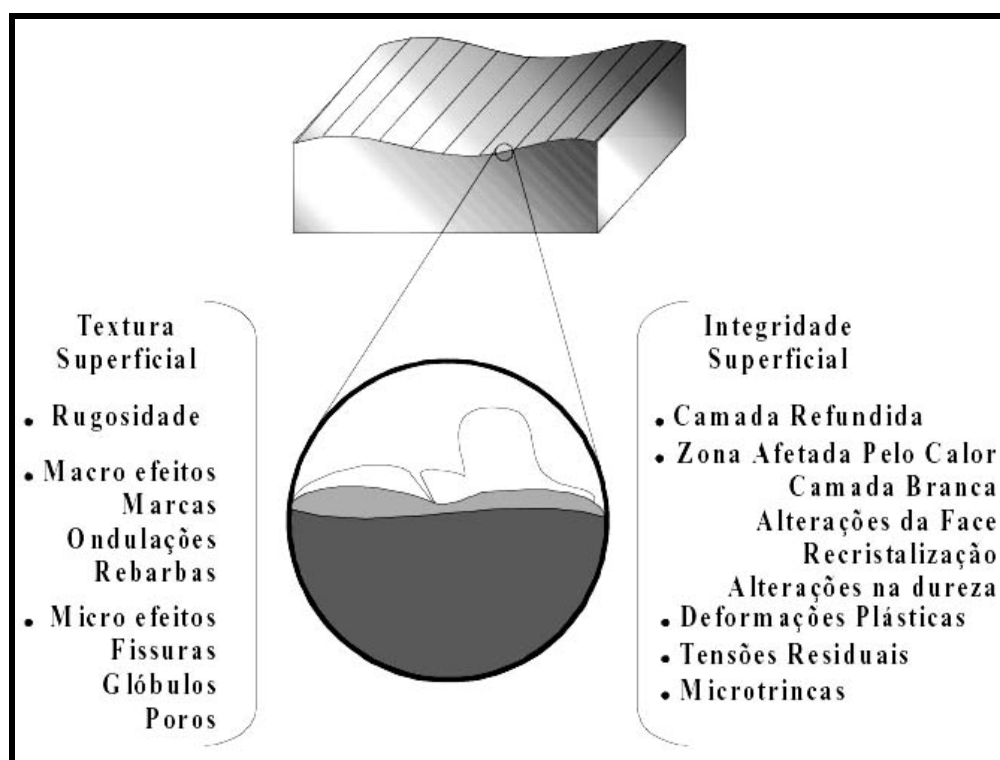


Figura 2.9 - Acabamento ou textura e integridade superficiais (FIELD *et al*, 1989).

Segundo Arantes *et al* (2003), a rugosidade média aritmética (R_a) do aço M2 usinado no regime de desbaste severo com óleos hidrocarbonetos e o querosene apresentaram uma diferença de 36% do pior para melhor óleo. O querosene apresentou um desempenho ruim em relação aos óleos hidrocarbonetos no mesmo trabalho do autor.

Percebe-se que mesmo entre os óleos hidrocarbonetos, especialmente desenvolvidos para a usinagem por descargas elétricas (EDM), existe uma diferença considerável na rugosidade obtida no processo. O querosene, que é muito consumido no Brasil, apresenta desempenho inferior.

2.8 Microestrutura

Lee *et al* (2003) relatam que devido aos efeitos do aquecimento e resfriamento rápido induzido pelo processo EDM uma camada termicamente afetada se formará na superfície da peça usinada que é diferente da microestrutura da matriz. Os mesmos autores informam que ela possui defeitos tais como vazios, microtrincas, fissuras, tensões, etc., causando deterioração das propriedades mecânicas dos componentes.

Na Figura 2.10, é apresentada uma micrografia de um aço rápido D2 onde podem ser vistos a camada refundida, microtrincas, a zona afetada pelo calor e o material base.

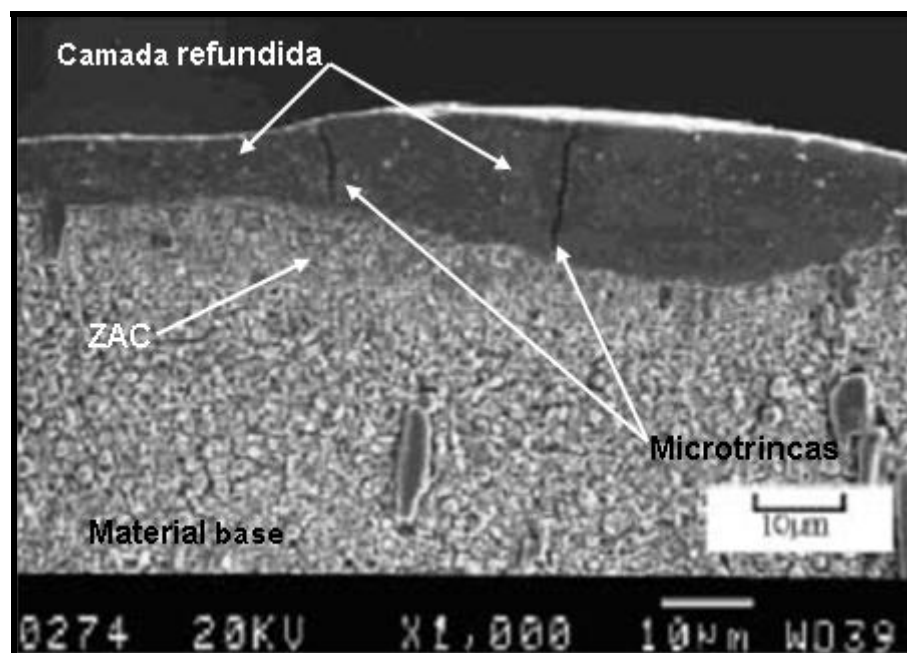


Figura 2.10 - Micrografia obtida via MEV do aço rápido D2 usinado com eletrodo-ferramenta de cobre e querosene como fluido dielétrico - Corrente utilizada: 12 A; tempo de duração da descarga: 15 μ s. (LEE *et al*, 2003).

2.8.1 Quantidade e comprimento das microtrincas

Segundo Lim *et al*, 1991, outra característica proeminente nas superfícies de EDM é a abundância de microtrincas. Estas microtrincas se irradiam de e também para as crateras circunvizinhas. Elas se formam porque as tensões térmicas e as transformações geradas no material associadas com taxa extrema de esfriamento depois da descarga normalmente se aproximam da resistência a tração máxima do material.

Lim *et al* 1991 afirmam também que, em geral, a densidade de microtrincas na superfície aumenta com o aumento da energia da descarga e, freqüentemente, penetram a várias profundidades.

A Figura 2.11 mostra uma micrografia obtida via MEV de um aço rápido D2 usinado com eletrodo de cobre e como dielétrico foi usado o querosene. Nota-se nesta micrografia a camada refundida e as microtrincas que ultrapassaram esta camada e atingiram o material base.

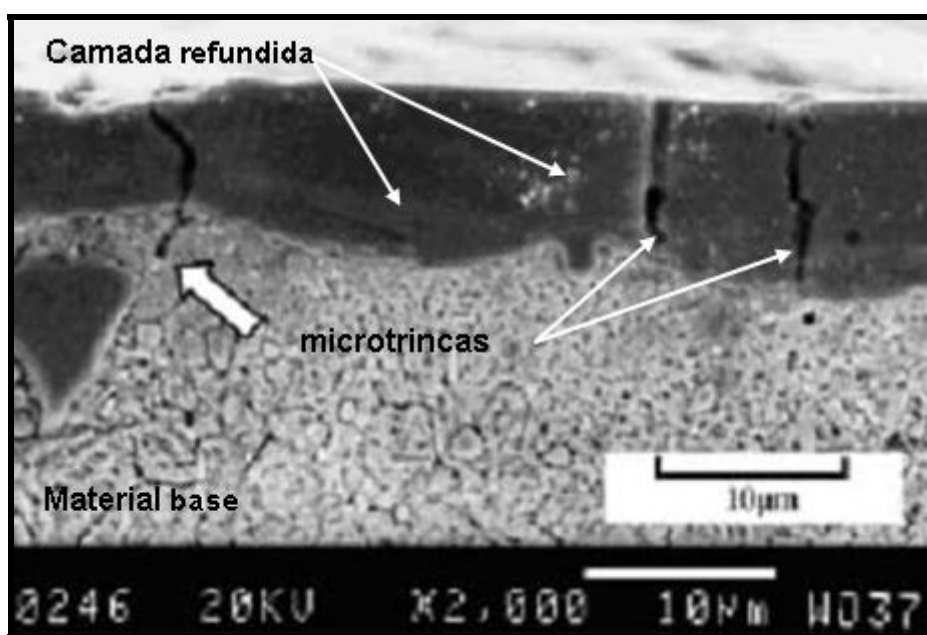


Figura 2.11 - Micrografia obtida via MEV mostrando a penetração da microtrinca no material base do aço D2 - eletrodo-ferramenta de cobre, dielétrico querosene - Corrente utilizada: 6A; tempo de duração da descarga: 15 μ s (LEE *et al*, 2003).

De acordo com Rodrigues (1999), as Fig. 2.12 e 2.13 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 de calor e, em alguns casos atingindo o material base. Além das microtrincas verticais, nota-se a presença de microtrincas subsuperficiais, localizadas tanto dentro da camada refundida, quanto dentro do material base. As microtrincas subsuperficiais apresentam-se, normalmente, associadas às microtrincas de tração (verticais). Outro aspecto a ser notado é o fato de as microtrincas verticais estarem muitas vezes associadas a defeitos tais como bolhas ou vazios.

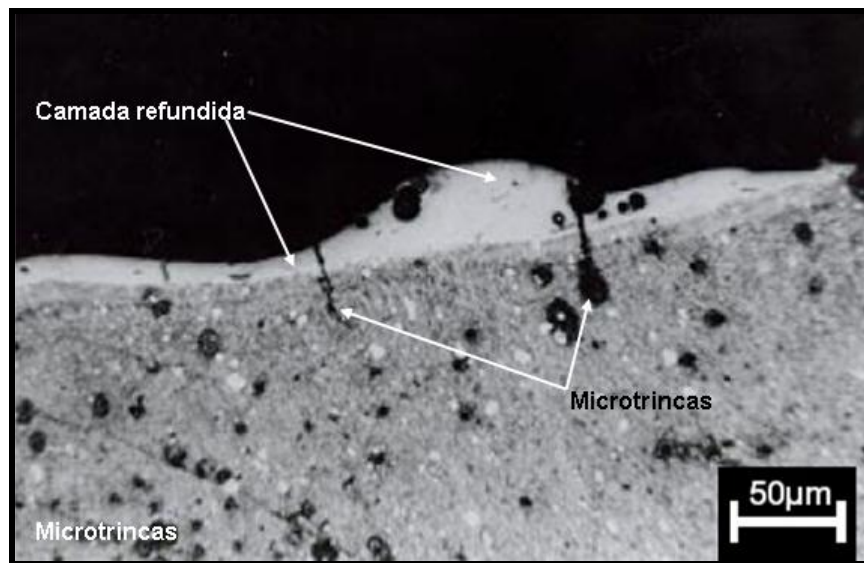


Figura 2.12 - Seção transversal obtida por microscópio ótico da superfície usinada do aço rápido da classe M com fluido dielétrico derivado de petróleo e eletrodo-ferramenta de cobre (RODRIGUES, 1999).

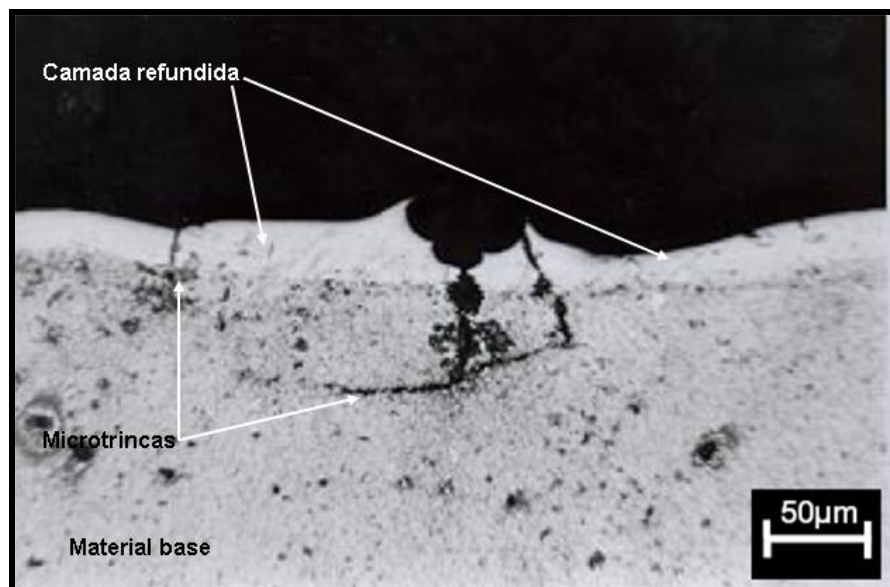


Figura 2.13 - Seção transversal da superfície usinada do aço rápido da classe M com fluido dielétrico derivado de petróleo e eletrodo-ferramenta de cobre, atacadas com Nigreen (RODRIGUES, 1999).

2.8.2 Camada refundida

Guu *et al* (2003) relatam que o processo EDM produz uma camada danificada que possui um comportamento mecânico diferente da matriz. Segundo Ramasawmy *et al* (2005),

vários estudos mostraram que a superfície das peças erodidas por descargas consiste de uma camada refundida dura, também conhecida como camada branca.

Ao usinar uma peça com EDM, uma zona afetada pelo calor, de multicamadas é formada na superfície da peça. A camada superior desta zona é chamada de camada refundida. Tem uma dureza elevada e contém muitas microtrincas. Como as outras camadas da zona afetada pelo calor, a camada refundida tem outras características microestruturais e metalográficas diferentes do material base (KRUTH *et al*, 1995). A Figura 2.14 mostra a micrografia de um aço rápido com a presença da camada refundida.

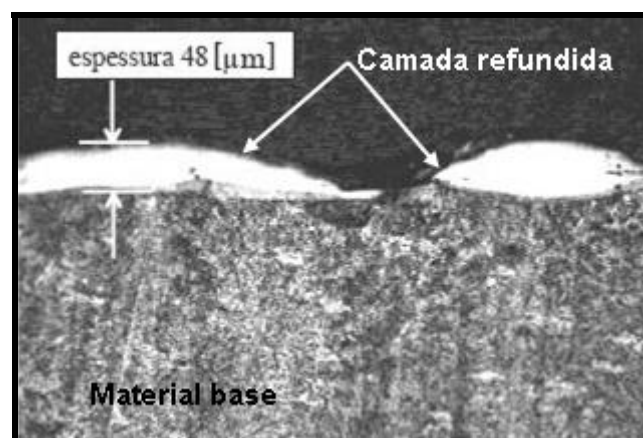


Figura 2.14 - Micrografia via MEV mostrando a camada refundida no aço rápido AISI P 20 usinado com eletrodo-ferramenta de cobre e um fluido hidrocarboneto como dielétrico (AMORIM, 2002).

Esta camada comporta uma estrutura com transformações de fase, tensões residuais, alterações na composição química e microtrincas. Todos estes fatores influem na vida útil de qualquer mecanismo. A camada refundida está intimamente associada a TRM (FERNANDES, 1999).

2.8.3 Zona afetada pelo calor

Assim como a camada refundida é inerente ao processo de usinagem por descargas elétricas (EDM), a zona afetada pelo calor (ZAC) também aparece devido às altas temperaturas que acontecem neste processo.

A camada refundida tem uma zona afetada pelo calor imediatamente abaixo dela e de uma espessura, aproximadamente, igual à máxima da camada refundida (MACHINING DATA HANDBOOK, MACHINABILITY DATA CENTER).

Sempre que EDM for usada na fabricação de peças estruturais altamente tensionadas, a zona afetada de calor produzida deve ser removida. Geralmente, durante o desbaste por EDM, a camada que apresenta mudanças microestruturais, incluindo uma camada fundida ressolidificada, é menor que 0,13 mm de profundidade. Durante o acabamento por EDM, ela é menor que 0,025 mm de profundidade (FIELD *et al*, 1989).

Na Figura 2.15 é apresentada uma micrografia com as camadas características do processo de eletroerosão.

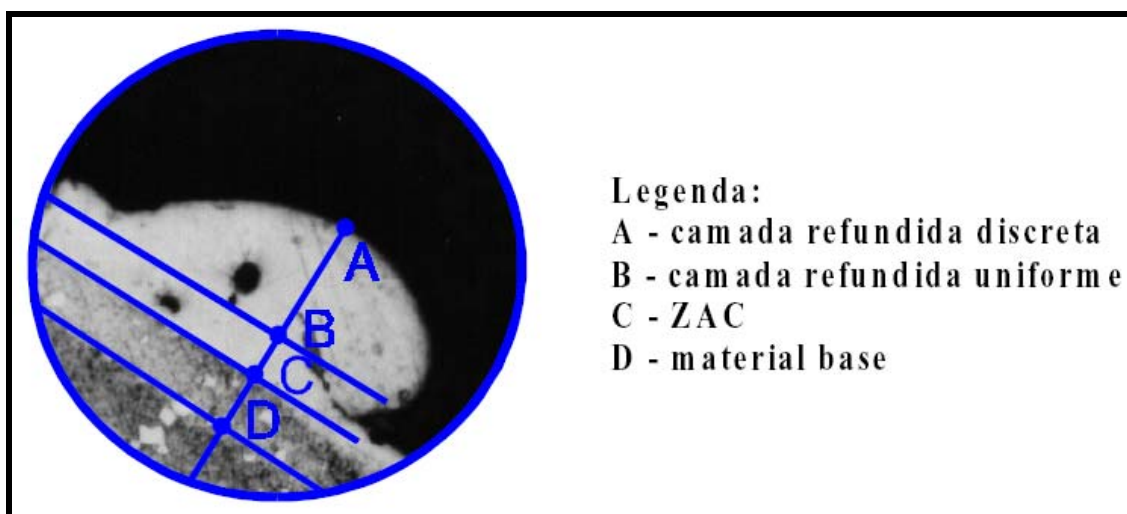


Figura 2.15 - Micrografia apresentando as camadas características do processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) (FERNANDES, 1999).

2.8.4 Microdureza

A microdureza emprega uma carga, geralmente, menor que 1 Kgf com penetrador de diamante, produzindo uma impressão microscópica. A superfície do corpo de prova deve ser plana e polida.

A microdureza pode ser aplicada para:

- Levantamento de curvas de profundidade de têmpera, cementação ou outro tratamento superficial;
- Determinação da dureza de microconstituintes individuais de uma microestrutura;
- Determinação da dureza de materiais frágeis;
- Determinação da dureza de peças pequeníssimas e finas.

A Figura 2.15 apresenta uma micrografia obtida através de microscópio ótico onde podem ser observadas as impressões de microdureza na camada refundida, na zona afetada pelo calor e no material base.

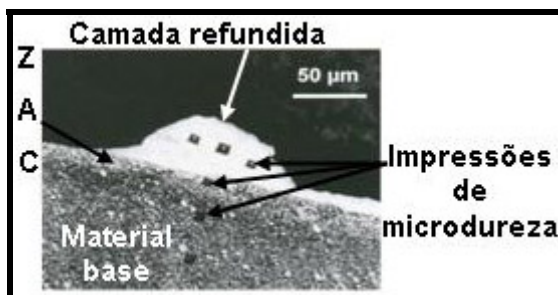


Figura 2.15 - Impressões de microdureza Vickers, com carga de 50g, aço rápido da classe M observado em microscopia ótica (FERNANDES, 1999).

CAPÍTULO III

Metodologia

3.1 Equipamento de usinagem por descargas elétricas (EDM)

Os ensaios foram realizados numa máquina de eletroerosão da marca Engemaq, modelo EDM 440 NC, que possui um gerador de controle de pulso. Ela opera de forma automática, após a seleção dos níveis de operações possíveis, mediante prévia seleção das funções disponíveis no painel gerador. A Figura 3.1 mostra a máquina de eletroerosão utilizada nos ensaios no LTM.

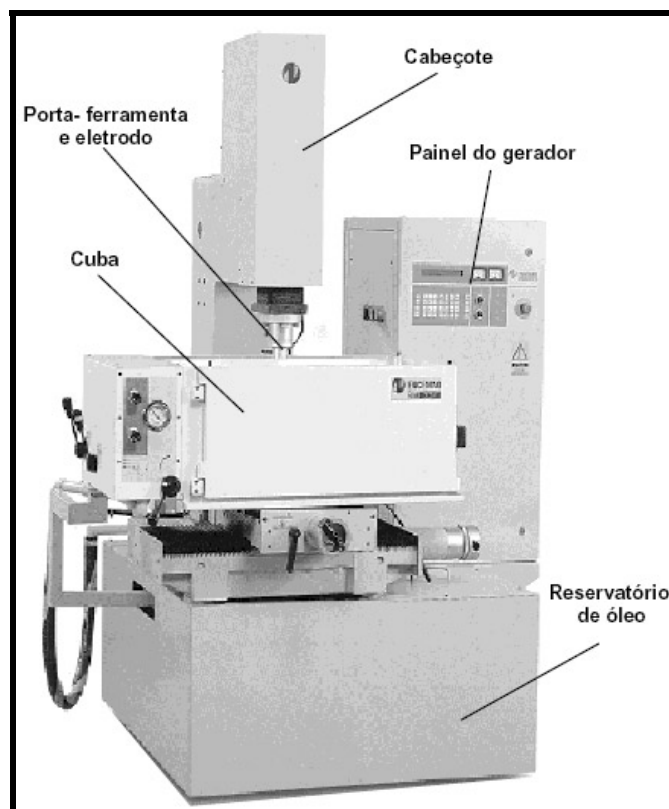
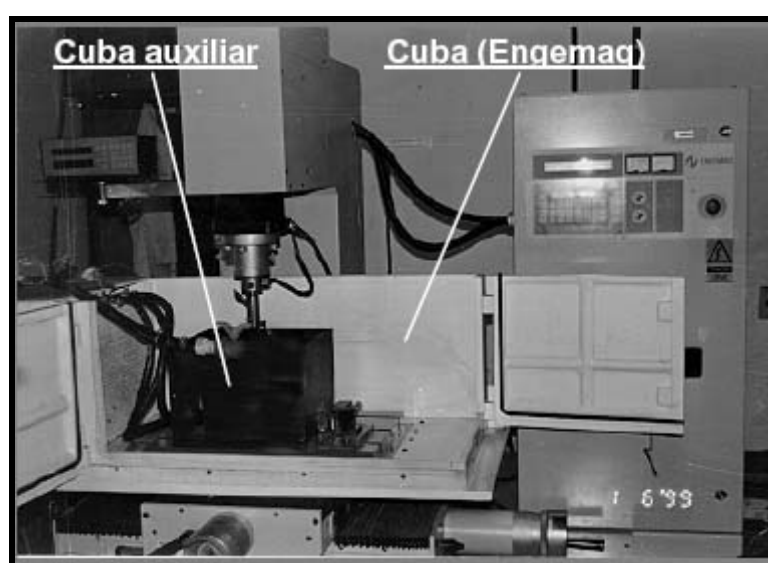
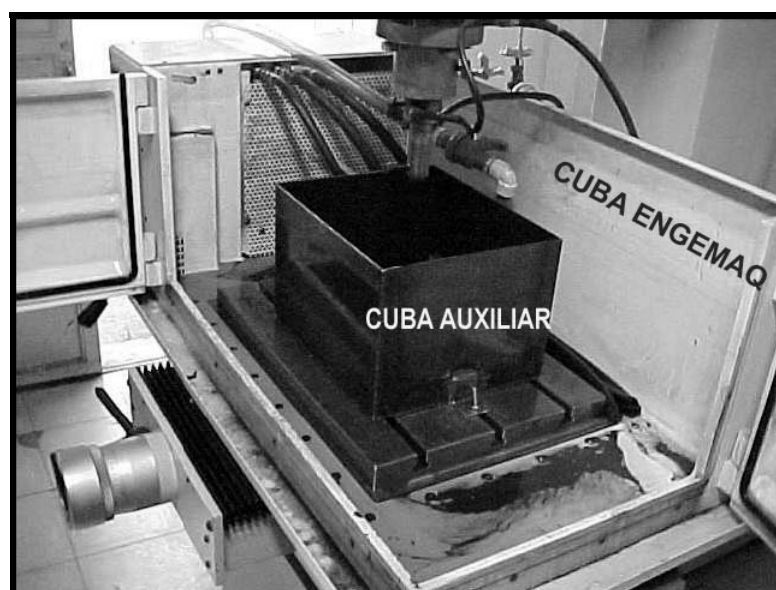


Figura 3.1 - Máquina de usinagem por descargas elétricas (EDM) por penetração - Engemaq 440 NC.

Todos os experimentos foram realizados dentro de uma cuba, desenvolvida no LTM (RODRIGUES, 1999), com capacidade para 10 litros. Nessa cuba não ocorreu a movimentação e filtração dos fluidos testados. O reservatório da máquina possui capacidade para 420 litros de fluido, o que praticamente inviabilizaria os ensaios devido à grande quantidade de fluido a ser adquirido, trocado, à limpeza para remoção do fluido testado e ao alto custo. Dessa forma, utilizou-se uma cuba menor, fixada dentro da cuba da máquina, para a realização dos ensaios. A Figura 3.2 mostra a cuba de 10 litros utilizada nos ensaios, posicionada dentro da cuba da Engemaq.



(a)



(b)

Figura 3.2 - Cubas com capacidade para 10 litros utilizadas nos ensaios. (a) – vista frontal e (b) - vista lateral.

3.2 Variáveis de Usinagem

Os regimes de usinagem utilizados nos ensaios foram os de desbaste e acabamento fino. Esses regimes adotados neste trabalho foram pré-estabelecidos por ensaios já realizados no LTM por Fernandes (1999) e Arantes (2001). Esta medida permite a comparação de resultados obtidos por diferentes pesquisadores. Na Tabela 3.1, são mostrados os parâmetros usados para os dois regimes de usinagem.

Nos ensaios com o regime de desbaste, foi cronometrado o tempo necessário para se usinar uma profundidade de 2 mm, uma vez que neste regime o tempo de usinagem é rápido devido às maiores descargas.

Nos ensaios com acabamento fino, foi cronometrado o tempo de 1 h de usinagem e verificado no painel da máquina a profundidade usinada. Este tempo de 1h foi adotado devido à pequena profundidade usinada neste modo devido às menores correntes empregadas.

Tabela 3.1 - Parâmetros utilizados para a usinagem nos regimes de desbaste e acabamento fino.

PARÂMETROS	REGIMES	
	DESBASTE	ACABAMENTO FINO
T_{on} (μ s)	450	10
DT (%)	70	50
T_s	8	2
Tempo de erosão (s)	15	15
Afastamento (mm)	3	3
Intervalo	0	0
Gap	8	8
Tempo de usinagem	Cronometrado após 2 mm de usinagem	1h
Profundidade de usinagem	2 mm (Padrão)	Medida após 1h de usinagem (Padrão)

Onde:

T_{on} = tempo de duração de cada descarga dado em microsegundos (μ s). Pode variar de 1 a 999 μ s;

T_{off} = tempo inativo de cada descarga dado em microsegundos (μ s);

DT = percentual relativo entre T_{on} e T_{off} , pode variar de 1 a 99 %;

T_s = (Transistor Standard - fonte 100 v), intensidade de corrente ajustável da máquina. Os transistores standard podem ser programados de 0 a 11,5 em passos de 0,5 TS;

Tempo de erosão: tempo de erosão para afastamento. Pode variar de 0 a 60 s.

Afastamento: distância de afastamento. Pode variar de 0 a 99,9 mm.

Intervalo: define o afastamento adotado, no caso "0" o afastamento será sempre fixo.

GAP (fenda de trabalho): regula a fenda de trabalho entre eletrodo e peça. Adimensional;

Optou-se, neste trabalho, pela polaridade positiva para os eletrodos-ferramenta enquanto que a peça e a mesa são negativas, seguindo os mesmos procedimentos dos trabalhos já realizados no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM).

Nos ensaios realizados, a corrente e a tensão não foram pré-determinadas e sim os parâmetros de usinagem possíveis na máquina. As correntes e voltagens medidas nos ensaios podem ser vistas na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 - Correntes e voltagens medidas durante os ensaios.

FLUIDOS	ELETRODO FERRAMENTA	PARÂMETROS DE USINAGEM			
		DESBASTE		ACABAMENTO FINO	
		A	V	A	V
MILHO	COBRE	12 -2	80 -10	1 ± 0	60 ± 0
	GRAFITE	12 ± 0	85 -10	1 ± 0	60 ± 0
ALGODÃO	COBRE	12 ± 0	80 ±10	1 ± 0	60 ± 5
	GRAFITE	12 ± 0	80 ±10	1 ± 0	60 ± 10
CANOLA	COBRE	12 ± 0	80 ±10	1 ± 0	60 ± 5
	GRAFITE	12 ± 0	80 ±10	1 ± 0	60 ± 10
MAMONA	COBRE	10 ±2	60 ±10	1 ± 0	60 + 10
	GRAFITE	10 ±1	60 ±5	1 ± 0	60 ± 10
GIRASSOL	COBRE	12 ± 0	75 ±10	1 ± 0	60 ± 0
	GRAFITE	12 ± 0	75 ±10	1 ± 0	60 ± 10
MINERAL	COBRE	10 ± 0	90 ±10	1 ± 0	65 ± 5
	GRAFITE	10 ± 0	90 ±10	1 ± 0	60 + 5 -10
QUEROSENE	COBRE	12 ± 0	90 ±5	1 ± 0	60 ± 5
	GRAFITE	12 ± 0	85 ±10	1 ± 0	60 ± 5

3.3 Material usinado

Neste trabalho, foi usinado um aço rápido ABNT M2. As amostras usinadas têm a forma de uma barra de seção quadrada (*bits*), com dimensões de 9,5 x 9,5 x 104 mm, conforme a Fig. 3.3. De acordo com o ASM Handbook v. 1 (1990), a densidade desse aço é 0,00768 [g/mm³] e composição química, % em peso, é dada na Tab. 3.3.

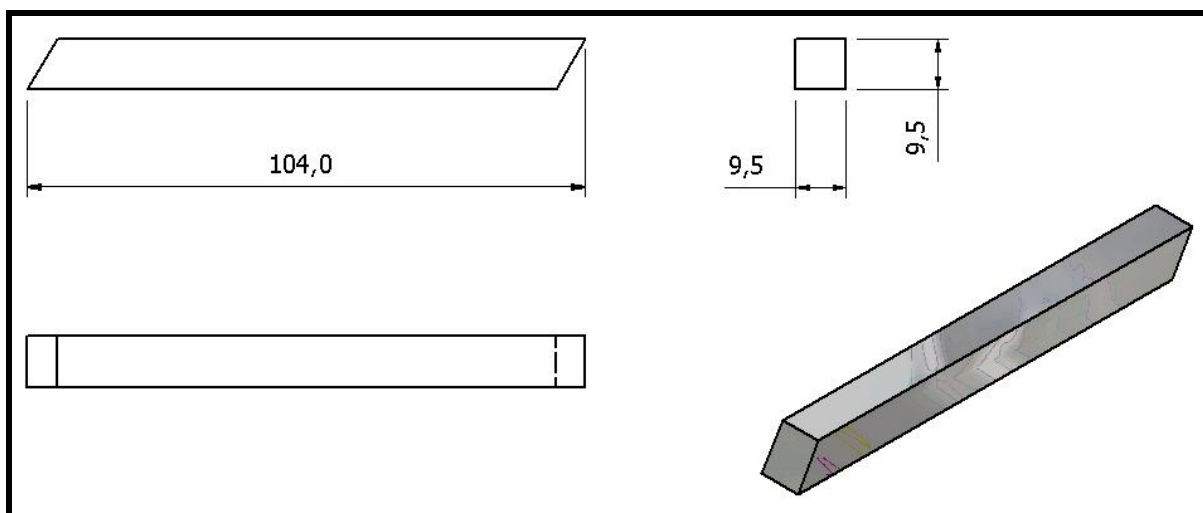


Figura 3.3 – Dimensões da barra de aço rápido ABNT M2 usada nos ensaios.

Tabela 3.3 - Composição aproximada do aço rápido ABNT M2 em % (ASM HANDBOOK, v. 1, 1990).

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V
0,78 - 0,88	0,15 -	0,20 -	3,75 -	0,30	4,50 -	5,50 -	1,75 -
	0,40	0,45	4,50	max	5,50	6,75	2,20

3.4 Materiais e geometria dos eletrodos-ferramenta

Os eletrodos-ferramenta utilizados nos ensaios foram de cobre e de grafite, com a mesma geometria e dimensões. Estes eletrodos-ferramenta são cilíndricos, com furos passantes, conforme pode ser visto na Fig. 3.4.

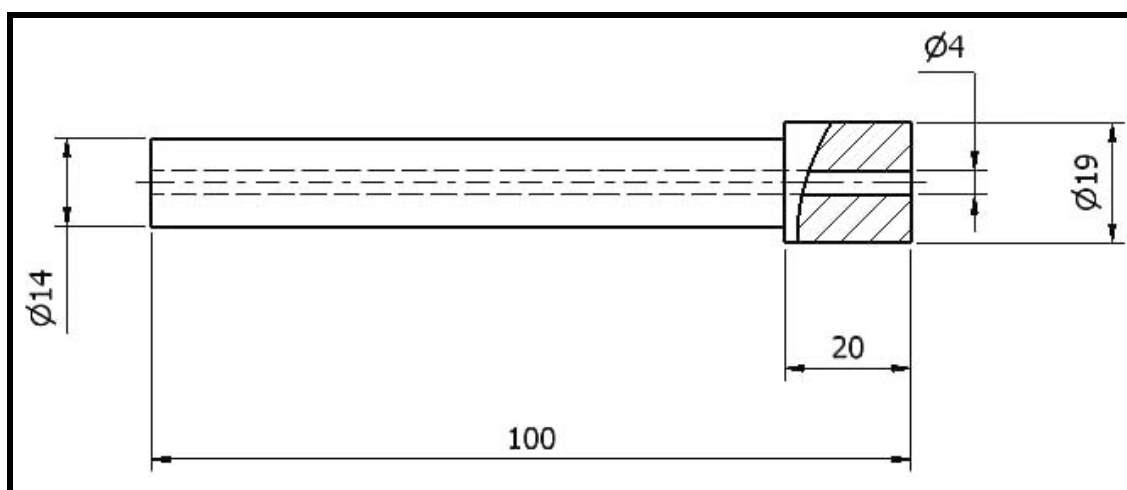


Figura 3.4 – Dimensões (mm) dos eletrodos-ferramenta de cobre e grafite utilizados nos ensaios.

3.4.1 Eletrodo-ferramenta de cobre

O cobre eletrolítico foi um dos materiais utilizados como material da ferramenta neste trabalho. Suas principais características são a alta condutividade térmica e elétrica, elevada resistência à corrosão, alta trabalhabilidade (ASM HANDBOOK, V. 2, 1990). Este material também oferece baixo custo, baixo ponto de fusão com relação à grafite.

3.4.2 Eletrodo-ferramenta de grafite

O grafite foi o outro material usado como o eletrodo-ferramenta neste trabalho. Ele é um excelente condutor, com alto ponto de fusão e alta resistência ao desgaste. Porém, tem alto custo, é relativamente frágil, porosa e difícil para a fabricação de ferramentas de pequeno porte. O eletrodo-ferramenta de grafite utilizado nos ensaios tem granulometria de 10 μm . Na Tabela 3.4, são apresentadas características físicas do cobre e do grafite.

Tabela 3.4 - Características físicas do cobre e do grafite.

ELETRODO FERRAMENTA	Ponto de fusão [°C]	Densidade [g/cm ³]	Resistividade [$\mu\Omega\cdot\text{m}$]
COBRE	1083	8,91	0,017
GRAFITE	3727	1,77	14,7

3.5 Fluidos utilizados

Nos ensaios, foram utilizados cinco fluidos de origem vegetal:

- óleo de milho;
- óleo de algodão;
- óleo de canola;
- óleo de mamona;
- óleo de girassol.

Os fluidos derivados do petróleo utilizados nos ensaios e que serão usados para comparação com os fluidos vegetais foram:

- querosene;
- fluido mineral.

Segundo Leão *et al* (2004), existem poucas publicações sobre os custos de operações de usinagem por descargas elétricas (EDM) usando fluidos alternativos aos óleos hidrocarbonetos.

Os fluidos dielétricos à base de óleos vegetais, utilizados neste trabalho, possuem disponibilidade para aquisição e uso pela indústria a um custo menor em relação aos fluidos derivados de petróleo. A Tabela 3.5 mostra o custo médio por litro de todos os fluidos testados.

Tabela 3.5 – Média de preços de mercado por litro para os fluidos testados orçados no varejo (valores em reais).

FLUIDOS	R\$ por litro
ÓLEO DE MILHO	3,79
ÓLEO DE ALGODÃO	5,99
ÓLEO DE CANOLA	4,09
ÓLEO DE MAMONA	5,70
ÓLEO DE GIRASSOL	3,98
FLUIDO MINERAL	4,50
QUEROSENE	5,75

Não houve a substituição dos fluidos durante a realização dos ensaios, mesmo ocorrendo a mudança de ferramentas e do regime de usinagem. O procedimento adotado foi: após colocar o fluido na cuba, usinaram-se três furos no regime de desbaste com eletrodo ferramenta de cobre e três furos com o de grafite sem haver a troca do fluido, o mesmo procedimento foi adotado para o regime de acabamento fino. Após este ciclo completo, o fluido foi removido e armazenado em local adequado. A cuba foi limpa e o outro fluido foi colocado para um novo ensaio.

Os resultados da TRM, TD e η foram obtidos a partir de uma média de 3 testes, perfazendo um total de 84 furos conforme a Fig. 3.5.

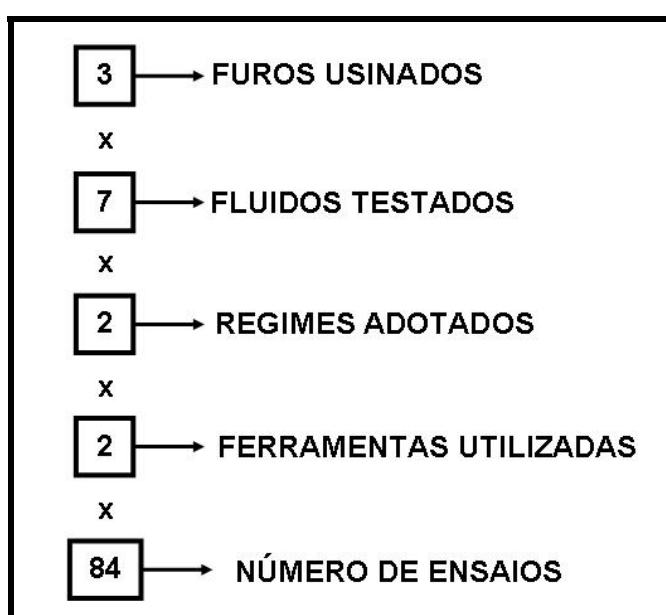


Figura 3.5 – Esquema da metodologia utilizada para os ensaios.

As viscosidades dos fluidos testados em temperatura ambiente são mostradas na Tab. 3.6.

Tabela 3.6 - Viscosidade em *centpoise* dos fluidos testados.

FLUIDOS	VISCOSIDADE <i>Cent Poise (cP)</i>
ÓLEO DE MILHO	39
ÓLEO DE ALGODÃO	34
ÓLEO DE CANOLA	41
ÓLEO DE MAMONA	36
ÓLEO DE GIRASSOL	34
FLUIDO MINERAL	3
QUEROSENE	1

3.6 Taxa de remoção de material (TRM) e desgaste dos eletrodos-ferramenta (TD)

3.6.1 Taxa de remoção de material (TRM)

A TRM nos ensaios foi medida verificando-se a massa inicial, antes da usinagem, e a massa final do aço rápido, após a usinagem dos 3 furos. Para a verificação da massa da peça e do eletrodo-ferramenta, foi utilizada uma balança analítica, marca Marte, AS 1000, com resolução 10^{-2} g. Antes e após cada usinagem, as peças e os eletrodos-ferramenta, com exceção da ferramenta porosa de grafite, foram mergulhadas na acetona, logo depois, foram colocadas em água corrente e secadas com ar comprimido a fim de eliminar os resíduos da usinagem.

3.6.2 Taxa de desgaste do eletrodo-ferramenta e desgaste volumétrico relativo

A taxa de desgaste dos eletrodos-ferramenta nos ensaios foi medida da mesma forma para o eletrodo-ferramenta de cobre e para o eletrodo-ferramenta de grafite. Realizou-se o cálculo do volume do eletrodo-ferramenta para verificar o quanto de massa cada um perdeu após o ciclo de usinagem. Para isso, foi utilizado um paquímetro com precisão de 0,02 mm. Foram realizadas várias medições do comprimento de cada eletrodo-ferramenta, tomando-se o cuidado para não usar como referência a extremidade do eletrodo-ferramenta que estivesse muito comprometida devido ao desgaste após cada ciclo de usinagem. Após cada ciclo de usinagem dos três furos, os eletrodos-ferramenta (após a realização das medições de comprimento) foram levados ao torno mecânico e usinados as suas extremidades que sofreram desgaste, de forma a deixar a extremidade perpendicular ao seu corpo, de modo que a cada novo ciclo de três furos, o eletrodo-ferramenta estava com a extremidade sem nenhum desgaste. Estas informações são mostradas na Fig. 3.6.

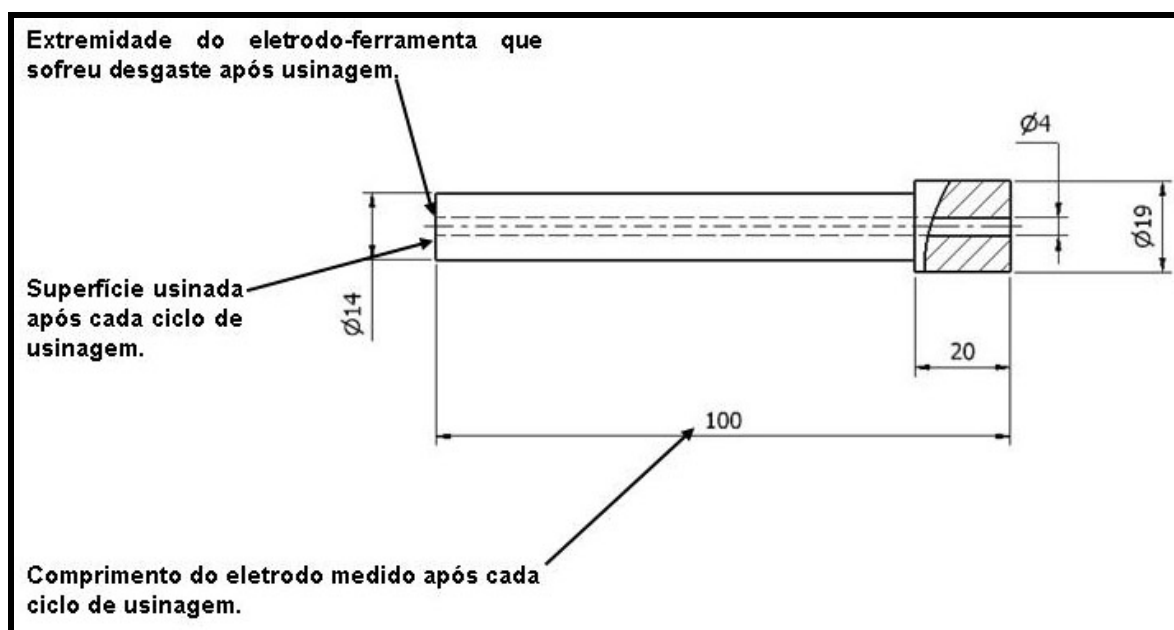


Figura 3.6 - Desenho esquemático mostrando o comprimento do eletrodo-ferramenta e como foi realizada a medição.

A grafite absorve o fluido dielétrico (devido à sua porosidade) durante o processo de usinagem e apresenta massa inicial superior à massa final. A fim de evitar este problema nos ensaios, foram adotados três eletrodo-ferramenta de grafite, de forma que um eletrodo-ferramenta era usado para um fluido e depois permanecia sem uso por um prazo de 10 dias a fim de que todo o fluido absorvido fosse evaporado. Foi realizada uma comparação dos resultados da perda de massa por volume e a pesagem dos eletrodos-ferramenta e chegou-se a uma diferença entre 3% e 5%. Para a verificação da massa da peça, foi utilizada uma balança analítica, marca Marte, AS 1000, com resolução 10^{-2} g.

A preparação das amostras para as análises da topografia e das modificações estruturais seguem a ordem apresentada na Fig. 3.7.

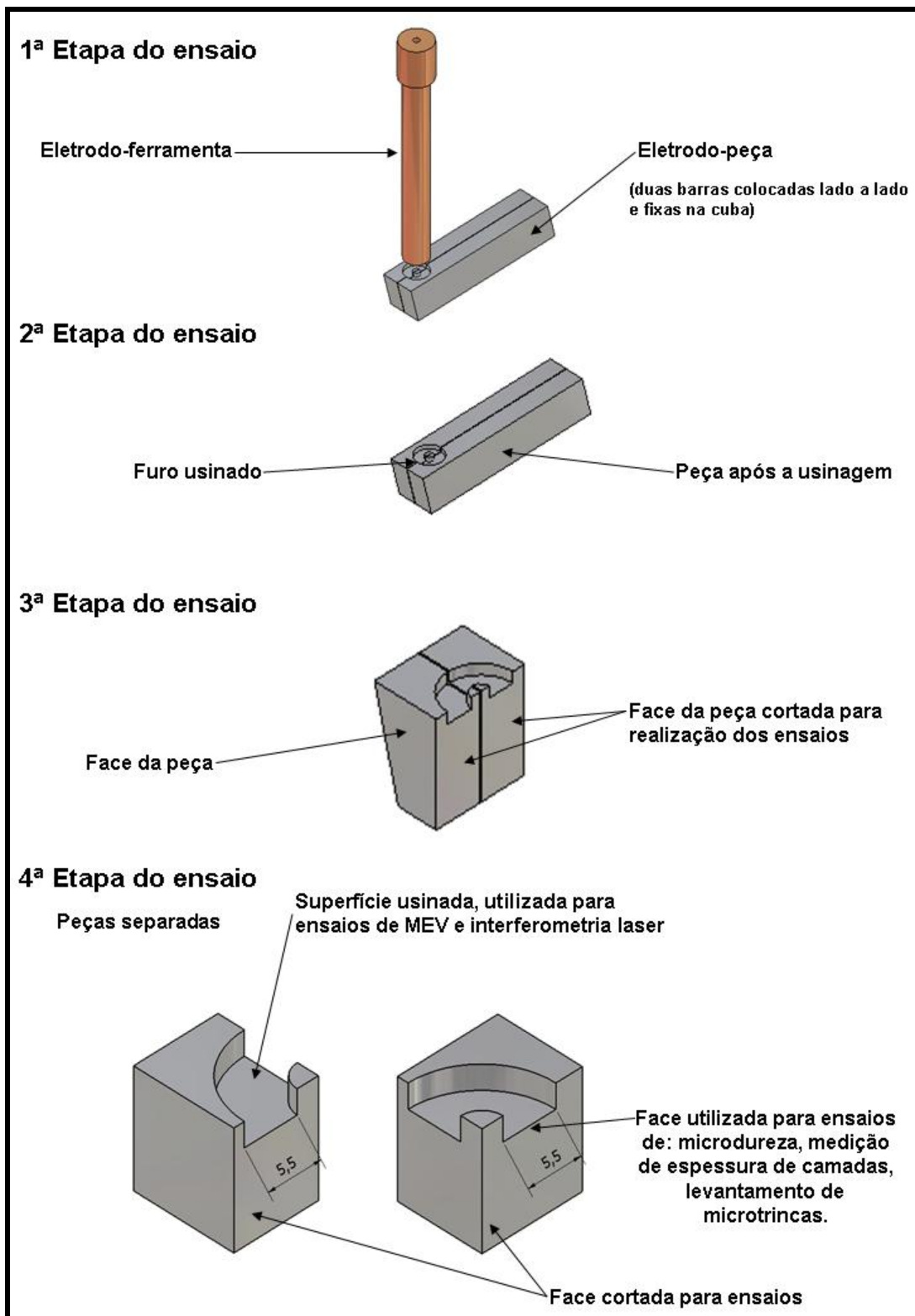


Figura 3.7 - Desenho esquemático mostrando da usinagem até o corte para a preparação das amostras para os ensaios.

3.7 Topografia

A topografia das superfícies usinadas, nos dois regimes, foi analisada via microscopia eletrônica de varredura e por interferometria laser.

Para a análise da morfologia da superfície usinada, foi usado um microscópio eletrônico de varredura, Leo, modelo 940 A. As amostras foram cortadas no centro do furo (gerado pelo processo EDM) com disco abrasivo 01 TRE (Arotec) em equipamento Discotom. Foram realizadas micrografias com aumento de 100x, buscando uma topografia que melhor representasse a superfície analisada.

Para a análise dos parâmetros da superfície, foi utilizado um interferômetro óptico a laser marca “UBM, modelo Microfocus Expert IV”. A análise da superfície foi realizada utilizando o programa MountainsMap Universal. Foi escolhida uma parte da superfície usinada, medindo 2 por 2 mm² para levantamento da rugosidade, com varredura de 1000 x 50.

3.8 Modificações estruturais

Para a análise das amostras usinadas do aço rápido, foram avaliados a formação de microtrincas, quantidade e o comprimento das mesmas, a espessura da camada refundida e da zona afetada pelo calor. As modificações nas propriedades mecânicas foram acompanhadas por ensaios de microdureza Vickers.

3.8.1 Quantidade e comprimento das microtrincas

Na preparação metalográfica, as peças foram cortadas no centro dos furos usinados com disco abrasivo 01 TRE (Arotec) em equipamento Discotom. Após o corte, as amostras foram limpas e embutidas em resina baquelita numa máquina Struers Tempopress 2. As amostras foram, então, lixadas em lixa de cinta 220 e, em seguida, foram lixadas em lixa manual 320. O polimento foi feito em politriz Struers Dap-7, utilizando-se pastas de diamante Struers, com granulometrias 15µm, 6µm, 3µm e 1µm, respectivamente. As amostras depois de polidas foram limpas e levadas para o microscópio da marca Shimadzu para levantamento da quantidade de microtrincas e o comprimento de cada uma. As microtrincas foram medidas uma a uma na face da barra usinada (*bit*), perpendicular ao eletrodo-ferramenta de usinagem, conforme desenho da Fig. 3.8. O comprimento utilizado para a

contagem das microtrincas foi de $5,5 \pm 0,3$. Para a medição das microtrincas, foi utilizado um micrômetro incorporado ao microscópio Shimadzu com precisão de $1 \mu\text{m}$.

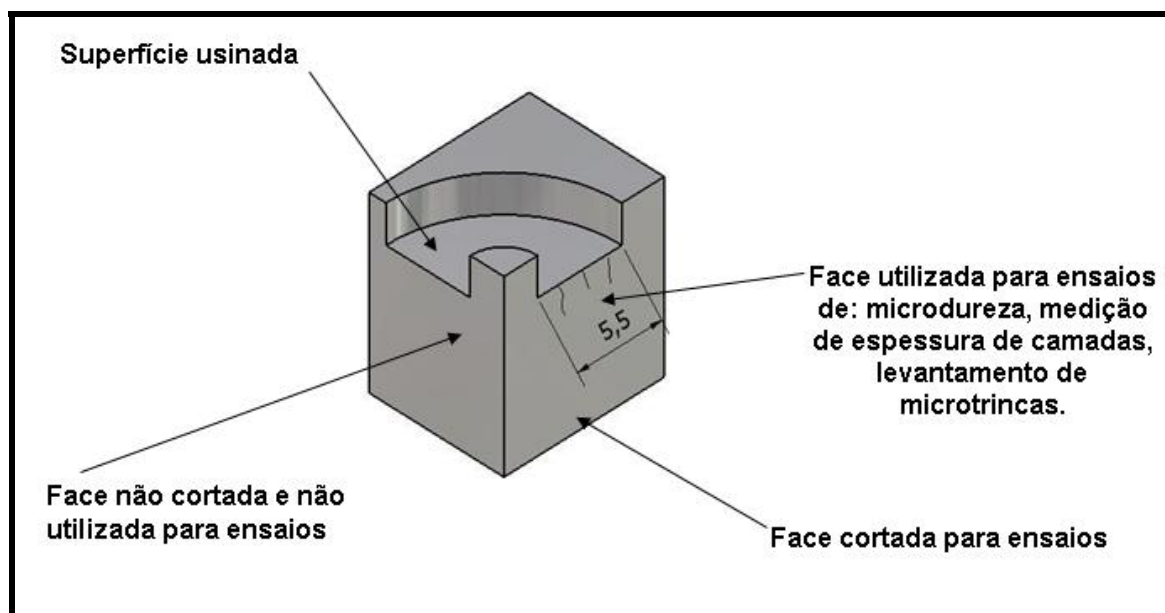


Figura 3.8 - Face da barra usinada (*bit*) utilizada para medição de microtrincas.

3.8.2 Camada refundida e zona afetada pelo calor (ZAC)

A camada refundida e a ZAC foram medidas ao longo da seção da peça cortada a fim de executar o maior número de medições desta camada. Para isto, as amostras receberam a mesma preparação metalográfica que está descrita no item 3.8.1 da página 52. Após a limpeza, as amostras foram atacadas com uma solução contendo 50% de Nital a 2% e 50% de Vilela, denominada Nigreen. O tempo de ataque para cada amostra variou entre 20 e 30 segundos.

3.8.3 Microdureza

A microdureza foi realizada utilizando um microdurômetro da marca Shimadzu com carga de 25g, estabelecendo-se um intervalo de confiança de 90%. As amostras foram atacadas quimicamente com reativo Vilela com uma de variação de 15 a 20 s.

CAPÍTULO IV

Resultados e Discussões

4.1 Taxa de remoção de material (TRM)

Nenhuma expressão foi ainda deduzida para que possa ser usada para prever completamente a TRM na usinagem por descargas elétricas (EDM). Essa taxa depende de uma grande variedade de propriedades do material da peça, incluindo seu ponto de fusão e o calor latente. Ela também é influenciada pelas propriedades do eletrodo-ferramenta, e por fatores geométricos como a forma e as dimensões da ferramenta e da peça e das condições de teste. A maioria dos dados práticos sobre usinagem está disponível nos fornecedores de equipamentos (McGEOUGH, 1988, GUITRAU, 1997). Os resultados da TRM dos fluidos dielétricos testados no regime de desbaste com eletrodo-ferramenta de cobre e grafite são mostrados na Tab. 4.1 e no gráfico da Fig. 4.1.

Tabela 4.1 - Valores da TRM obtidos no regime de desbaste com eletrodos-ferramentas de cobre e grafite.

FLUIDOS	TRM (mm ³ /min)	
	COBRE	GRAFITE
MILHO	158,5 ± 1,4	131,9 ± 1,6
ALGODÃO	139,0 ± 1,0	108,3 ± 0,9
CANOLA	132,7 ± 3,0	117,8 ± 1,1
MAMONA	180,9 ± 2,7	128,4 ± 1,9
GIRASSOL	158,8 ± 1,4	138,3 ± 3,0
MINERAL	152,9 ± 2,6	96,1 ± 1,7
QUEROSENE	164,9 ± 0,8	108,9 ± 2,0

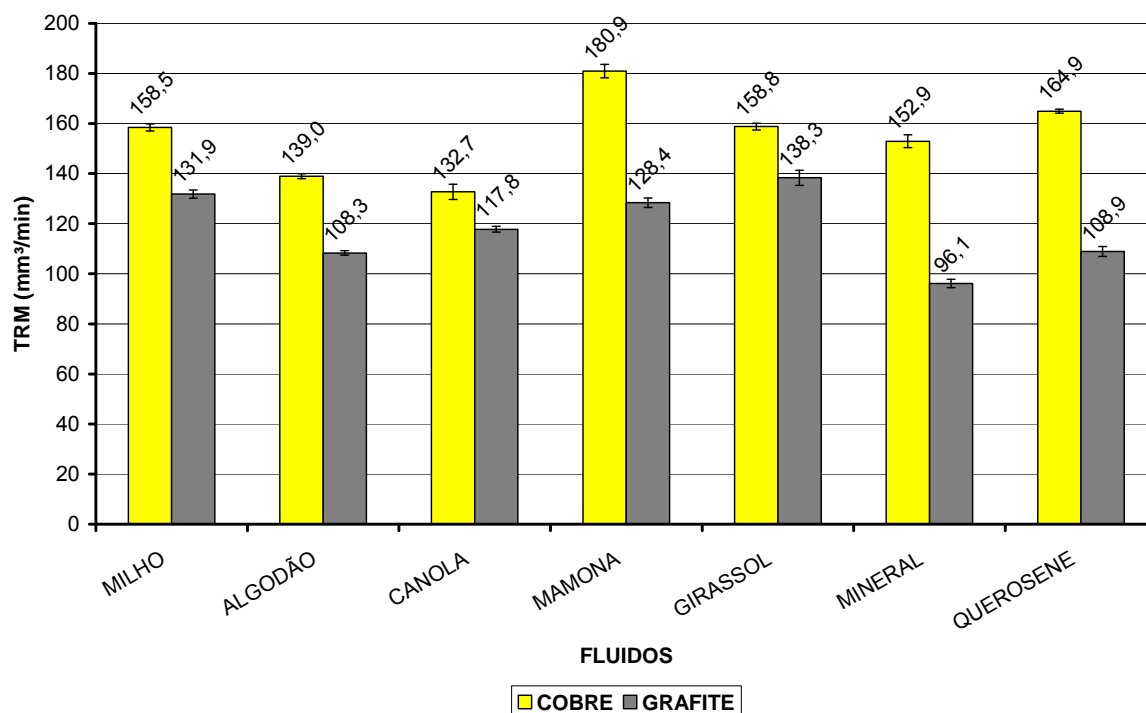


Figura 4.1 - TRM obtidas através do processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) em regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

Nota-se que alguns fluidos vegetais obtiveram desempenho semelhante e, em alguns casos, superior aos fluidos derivados do petróleo tanto com eletrodo-ferramenta de cobre quanto com o de grafite. Observa-se ainda que os resultados obtidos com eletrodo-ferramenta de cobre foram superiores aos resultados obtidos com o de grafite.

Segundo Che Haron *et al* (2007), a usinagem de um aço rápido com eletrodo-ferramenta de cobre, no regime de desbaste, foi mais satisfatória do que com o de grafite. O melhor desempenho do eletrodo-ferramenta de cobre em relação ao de grafite pode estar correlacionado à sua menor resistividade elétrica o que proporciona ao cobre potências de descargas maiores na usinagem.

Em trabalho realizado por Costa Brasil *et al* (2006) na usinagem do aço rápido M2 com eletrodo-ferramenta de cobre, no regime de desbaste, utilizando o fluido girassol, querosene e um fluido mineral sintético, não foi observada diferença significativa de desempenho entre estes fluidos em termos de TRM. Isso está em concordância com os resultados encontrados no presente trabalho.

Além de mostrar a viabilidade técnica do uso de fluidos vegetais no regime de desbaste, os resultados aqui obtidos mostram que, sob o ponto de vista de TRM, os fluidos vegetais são vantajosos em relação aos fluidos derivados do petróleo. O bom desempenho

dos fluidos vegetais pode estar relacionado às suas características físico-químicas que precisam ser melhor investigadas.

Na Tab. 4.2 e no gráfico da Fig. 4.2, são mostrados os resultados da TRM dos fluidos dielétricos testados no regime de acabamento fino com eletrodo-ferramenta de cobre e grafite.

Tabela 4.2 - Valores da TRM obtidos no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

FLUIDOS	TRM (mm ³ /min)	
	COBRE	GRAFITE
MILHO	2,6 ± 0,1	3,1 ± 0,0
ALGODÃO	1,6 ± 0,0	4,1 ± 0,1
CANOLA	2,3 ± 0,1	4,2 ± 0,1
MAMONA	2,7 ± 0,1	2,5 ± 0,1
GIRASSOL	2,5 ± 0,1	4,0 ± 0,2
MINERAL	9,7 ± 0,4	9,5 ± 0,1
QUEROSENE	11,1 ± 0,2	14,6 ± 0,3

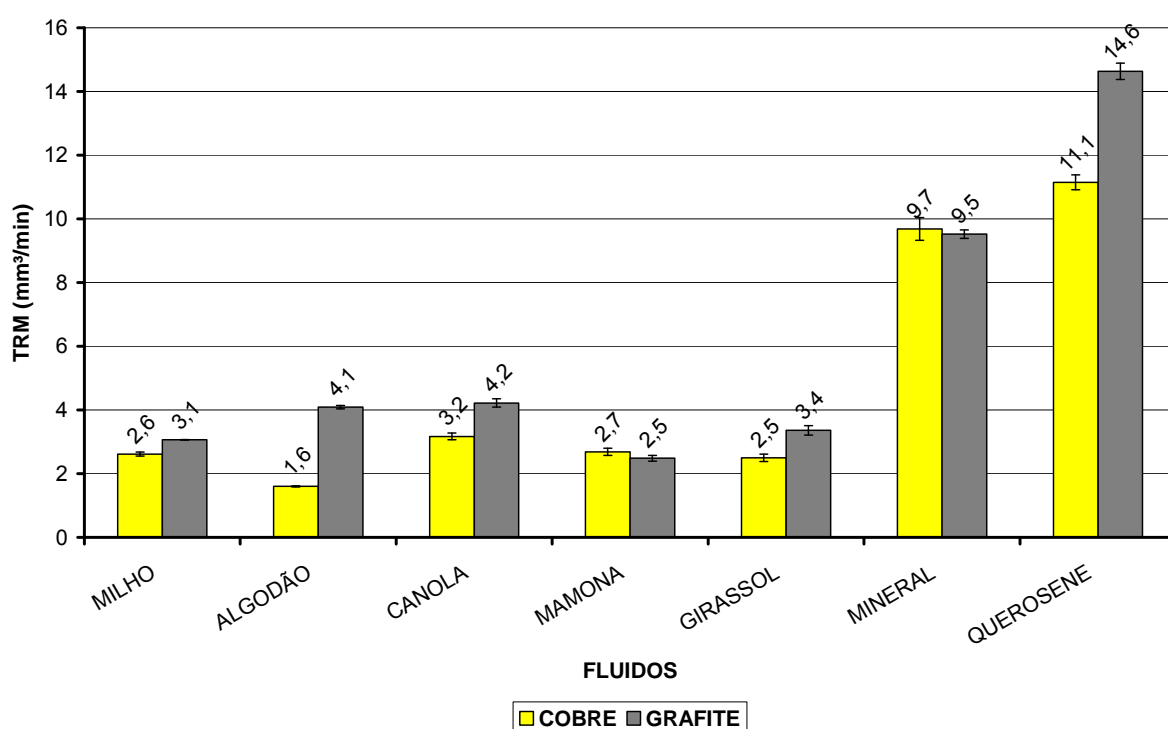


Figura 4.2 - TRM obtidas através do processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) em regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

Observa-se que o querosene obteve o melhor resultado com eletrodo-ferramenta de cobre e o óleo mineral ficou em segundo lugar com uma diferença de 14% inferior. Os fluidos vegetais não obtiveram bons resultados, a diferença entre o querosene e o fluido vegetal que apresentou melhor desempenho (canola) foi de mais de 300%. Na usinagem com eletrodo-ferramenta de grafite o querosene apresentou melhor desempenho, seguido pelo fluido mineral com uma diferença de 54%. Os fluidos vegetais apresentaram resultados pouco acima das TRM com eletrodo-ferramenta de grafite, sendo que o fluido vegetal (canola) com melhor desempenho ficou com 248% abaixo do querosene.

Estes resultados mostram que, sob o ponto de vista de TRM, os fluidos vegetais não são vantajosos em relação aos fluidos derivados do petróleo. Entretanto, verifica-se a viabilidade técnica de se utilizar fluidos de origem vegetal em regime de acabamento fino usando-se eletrodos-ferramenta tanto de cobre quanto de grafite.

O melhor desempenho dos fluidos derivados de petróleo tanto com eletrodos-ferramenta de cobre quanto com o de grafite pode estar relacionado à menor viscosidade relativa desses fluidos. Conforme Arantes (2001), para pulsos de pequena energia, é aconselhável uma baixa viscosidade do dielétrico para maior eficiência do processo. Che Haron *et al* (2007) obtiveram melhores resultados com eletrodo-ferramenta de grafite do que com o de cobre na usinagem de um aço rápido no regime de acabamento fino. O mesmo autor afirma que o cobre é melhor para regime de desbaste, enquanto a grafite é melhor para acabamento, em concordância com os resultados obtidos neste trabalho. O melhor desempenho com eletrodo-ferramenta de grafite deve-se à baixa condutividade térmica deste material, fazendo com que a energia das descargas seja mais absorvida pela peça e pelo dielétrico.

4.2 Desgaste dos eletrodos-ferramenta

O desgaste dos eletrodos-ferramenta e o desgaste volumétrico foram calculados da seguinte forma:

A taxa de desgaste dos eletrodos-ferramenta é o volume de material desgastado do eletrodo-ferramenta dividido pelo tempo de usinagem, dado em milímetros cúbicos por minuto. O desgaste relativo (desgaste volumétrico relativo) ϑ é a razão entre o volume de material desgastado do eletrodo-ferramenta e o volume de material erodido da peça dado em valores percentuais.

Os resultados da taxa de desgaste dos eletrodos-ferramenta e o desgaste volumétrico relativo com os fluidos dielétricos testados no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite são mostrados na Tab. 4.3 e no gráfico da Fig. 4.3.

Tabela 4.3 - Valores da taxa de desgaste e do desgaste volumétrico relativo dos eletrodos-ferramenta de cobre e grafite obtidos no regime de desbaste.

FLUIDOS	COBRE		GRAFITE	
	Taxa de desgaste do eletrodo (mm ³ /min)	Desgaste Volumétrico %	Taxa de desgaste do eletrodo (mm ³ /min)	Desgaste Volumétrico %
MILHO	2,9	1,8	2,2	1,7
ALGODÃO	0,5	0,3	0,7	0,7
CANOLA	0,4	0,3	0,4	0,3
MAMONA	0,6	0,3	0,9	0,7
GIRASSOL	2,1	1,3	1,8	1,3
MINERAL	0,5	0,3	0,6	0,7
QUEROSENE	2,2	1,3	0,7	0,7

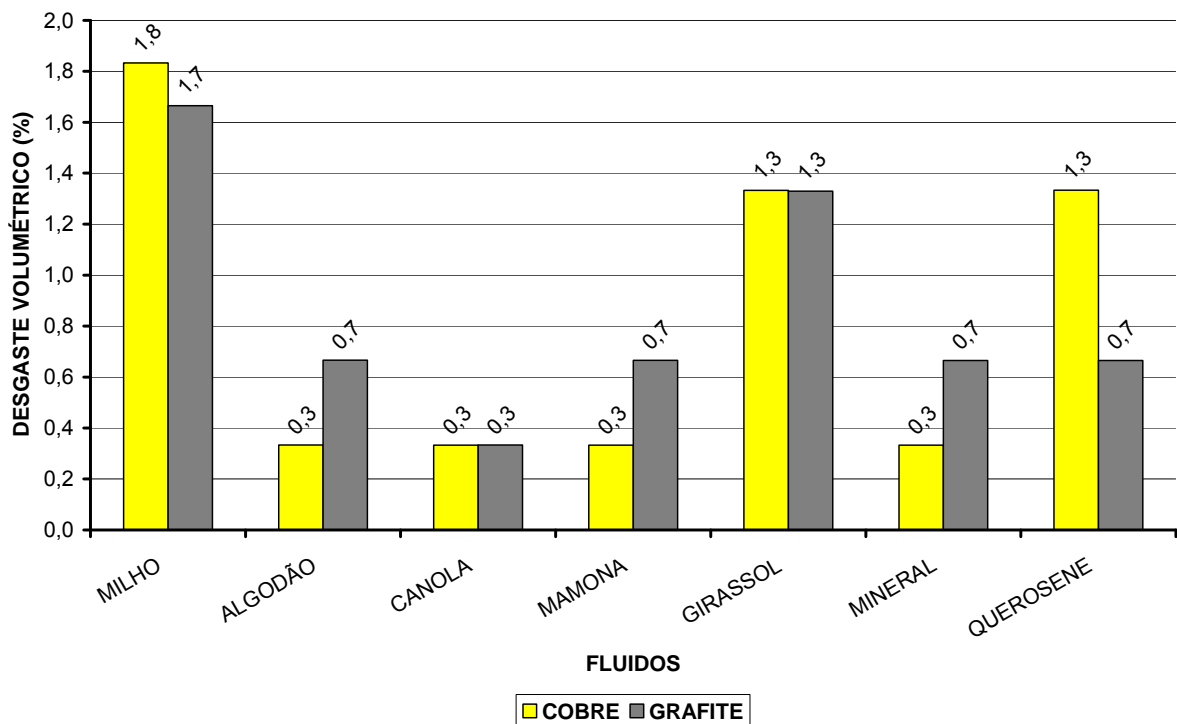


Figura 4.3 - Valores do desgaste volumétrico relativo obtido através do processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) em regime desbaste com os eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

Nota-se que o desempenho dos fluidos milho e girassol não foi satisfatório em termos de desgaste, tanto para eletrodo-ferramenta de cobre quanto para o de grafite, uma vez que apresentaram bons resultados em termos de taxa de remoção de material (TRM). O fluido querosene também não obteve bom desempenho na usinagem com eletrodo-ferramenta de cobre, apresentando uma taxa de desgaste alta com relação aos outros fluidos, mas obteve boa TRM. Verificou-se também um bom desempenho do fluido mamona na usinagem com eletrodo-ferramenta de cobre que apresentou baixo desgaste e a maior TRM. Nota-se que o desgaste volumétrico é mais baixo quando se trabalha no regime de desbaste, usando correntes mais altas e tempos de duração de descarga maiores. Amorim *et al* (2005) mostram que o desgaste volumétrico diminui com o aumento da duração da descarga na usinagem de um aço rápido com eletrodo-ferramenta de cobre, Fig. 4.4.

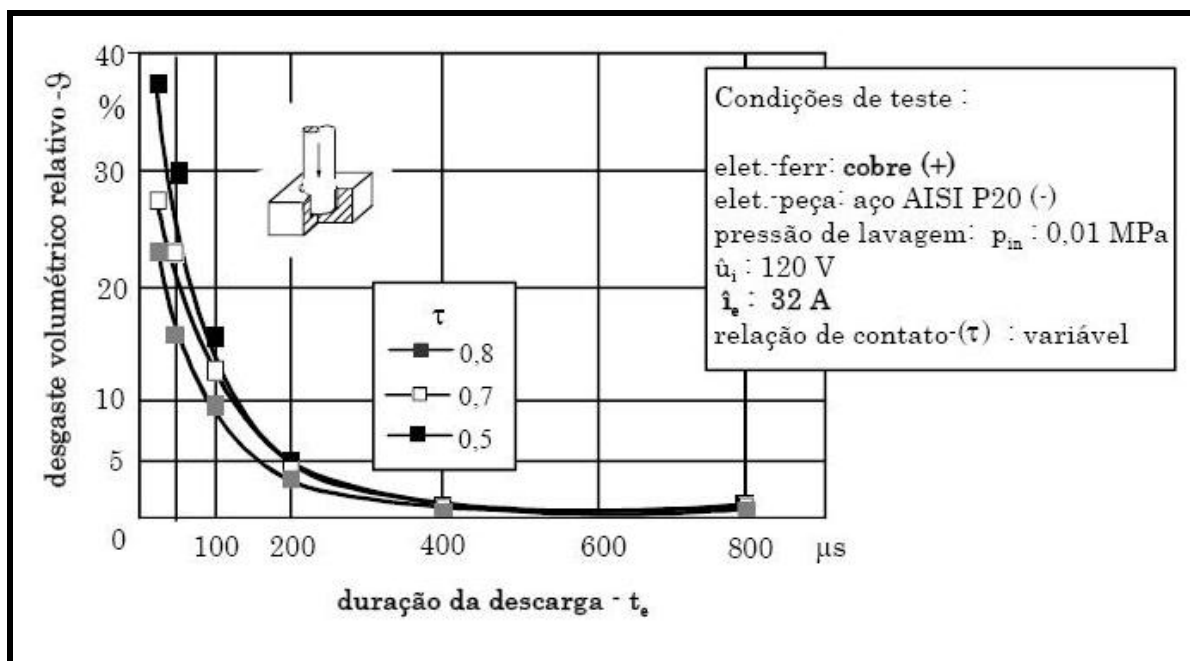


Figura 4.4 - Comportamento do desgaste volumétrico relativo do aço ferramenta AISI P20 sob usinagem de desbaste com corrente média durante a descarga de 32 A e variação de relação de contato de 0,5 a 0,8 (AMORIM, 2002).

Os resultados da taxa de desgaste dos eletrodos-ferramenta e o desgaste volumétrico relativo com os fluidos dielétricos testados no regime de acabamento fino com eletrodo-ferramenta de cobre e grafite são mostrados na Tab. 4.4 e no gráfico da Fig. 4.5.

Tabela 4.4 - Valores da taxa de desgaste e do desgaste volumétrico relativo dos eletrodos-ferramenta de cobre e grafite obtidos no regime de acabamento fino.

FLUIDOS	COBRE		GRAFITE	
	Taxa de desgaste do eletrodo (mm ³ /min)	Desgaste Volumétrico ρ (%)	Taxa de desgaste do eletrodo (mm ³ /min)	Desgaste Volumétrico ρ (%)
MILHO	0,1	4,5	0,5	15,4
ALGODÃO	0,1	5,9	0,6	15,0
CANOLA	0,4	11,9	0,8	19,0
MAMONA	0,2	7,0	0,2	9,5
GIRASSOL	0,4	15,1	0,7	19,6
MINERAL	1,7	18,0	1,8	18,8
QUEROSENE	2,0	18,2	2,7	18,7

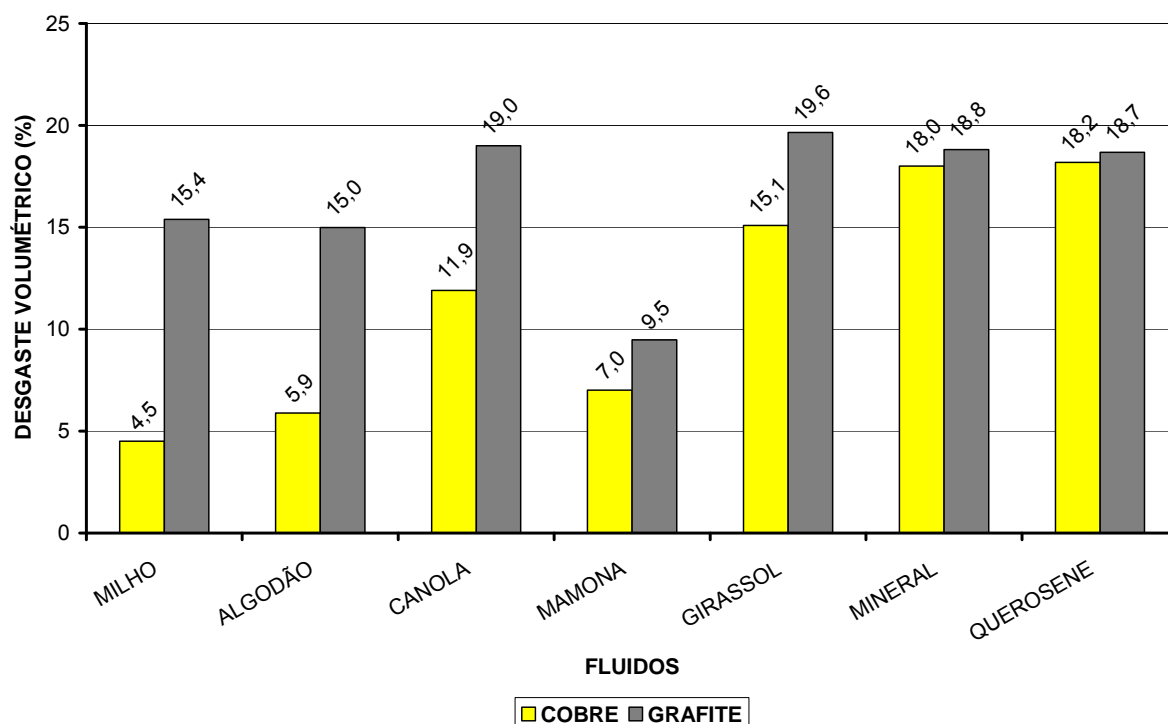


Figura 4.5 – Valores do desgaste volumétrico obtido através do processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) em regime de acabamento fino com os eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

Observou-se que os fluidos vegetais apresentaram taxas menores de desgaste das ferramentas em relação aos fluidos derivados de petróleo. A taxa de desgaste foi maior para

o eletrodo-ferramenta de grafite do que para o eletrodo-ferramenta de cobre. Isso está relacionado à maior TRM obtida com o eletrodo-ferramenta de grafite neste regime de usinagem, com exceção para o fluido mamona. Para os fluidos derivados de petróleo, o desgaste ficou equilibrado tanto para eletrodo-ferramenta de grafite quanto para eletrodo-ferramenta de cobre, uma vez que estes fluidos apresentaram melhores TRM. Singh *et al* (2003) mostraram que, na usinagem de um aço rápido com eletrodos-ferramenta de vários materiais, o cobre foi o que apresentou o menor desgaste, aproximadamente 0,1%. Essa mesma tendência foi verificada neste trabalho.

4.3 Topografia

4.3.1 Morfologia (Através de microscopia eletrônica de varredura)

Uma visão geral da morfologia das superfícies usinadas utilizando os fluidos vegetais e os derivados de petróleo, com eletrodos-ferramentas de cobre e grafite, respectivamente, no regime de desbaste e acabamento fino, é mostrada nas Fig. 4.6 e 4.7.

Na Figura 4.6, são mostradas as imagens das superfícies usinadas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) com eletrodo-ferramenta de cobre nos regimes de acabamento fino e desbaste. Na Figura 4.7, são mostradas as imagens das superfícies usinadas com o eletrodo-ferramenta de grafite nos mesmos regimes e com os mesmos fluidos. As figuras do lado esquerdo referem-se àquelas usinadas no regime de acabamento fino e as do lado direito no regime de desbaste.

Devido à semelhança das morfologias obtidas nas usinagens com os fluidos vegetais, optou-se em apresentar somente as imagens do fluido milho a fim de representar os resultados dos outros fluidos vegetais testados.

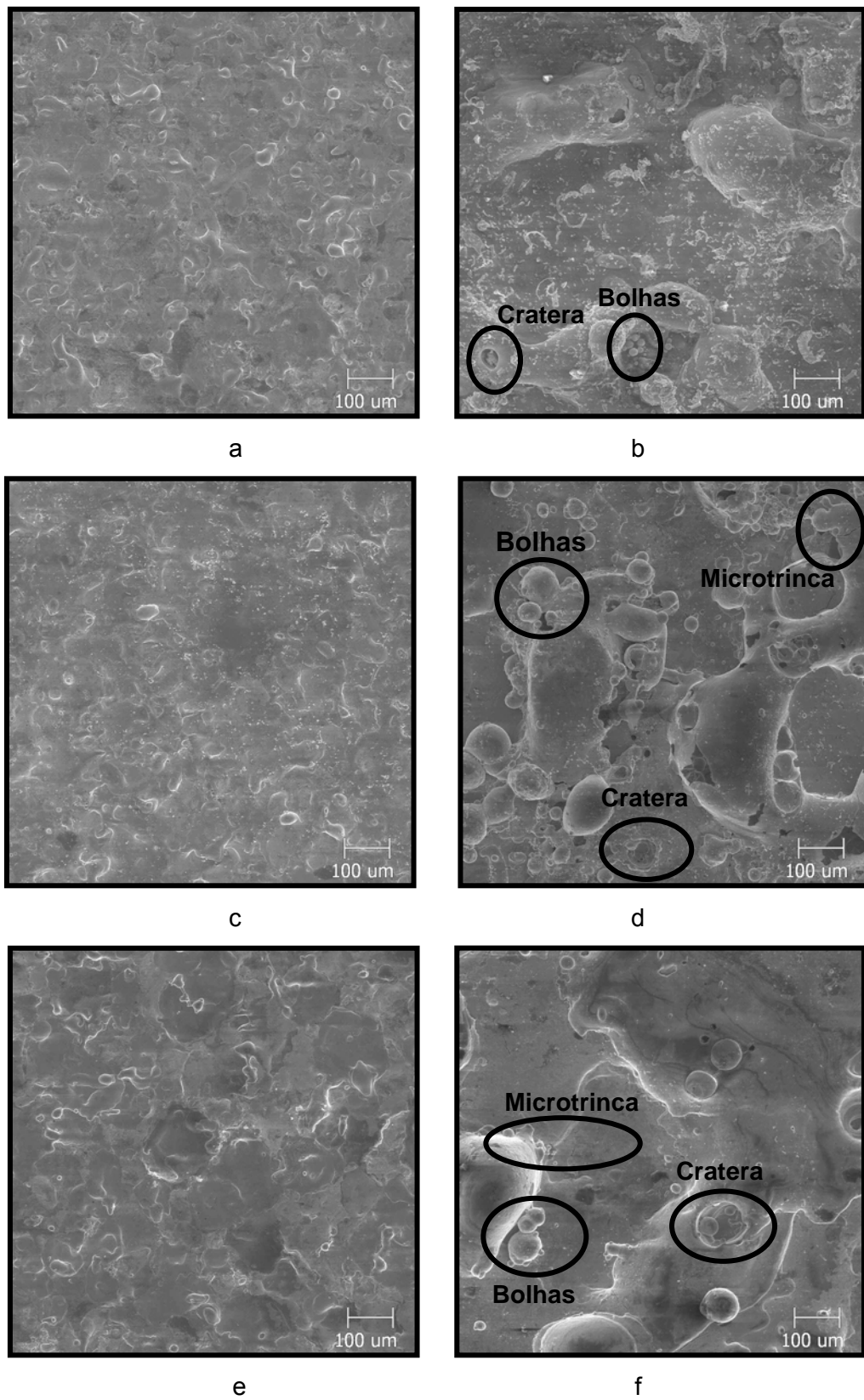


Figura 4.6 - Topografia das superfícies obtidas no regime de acabamento fino (a, c, e) e desbaste (b, d, f) usinadas com eletrodo-ferramenta de cobre usando fluidos a base de milho (a, b), óleo mineral (c, d) e querosene (e, f). Microscopia eletrônica de varredura.

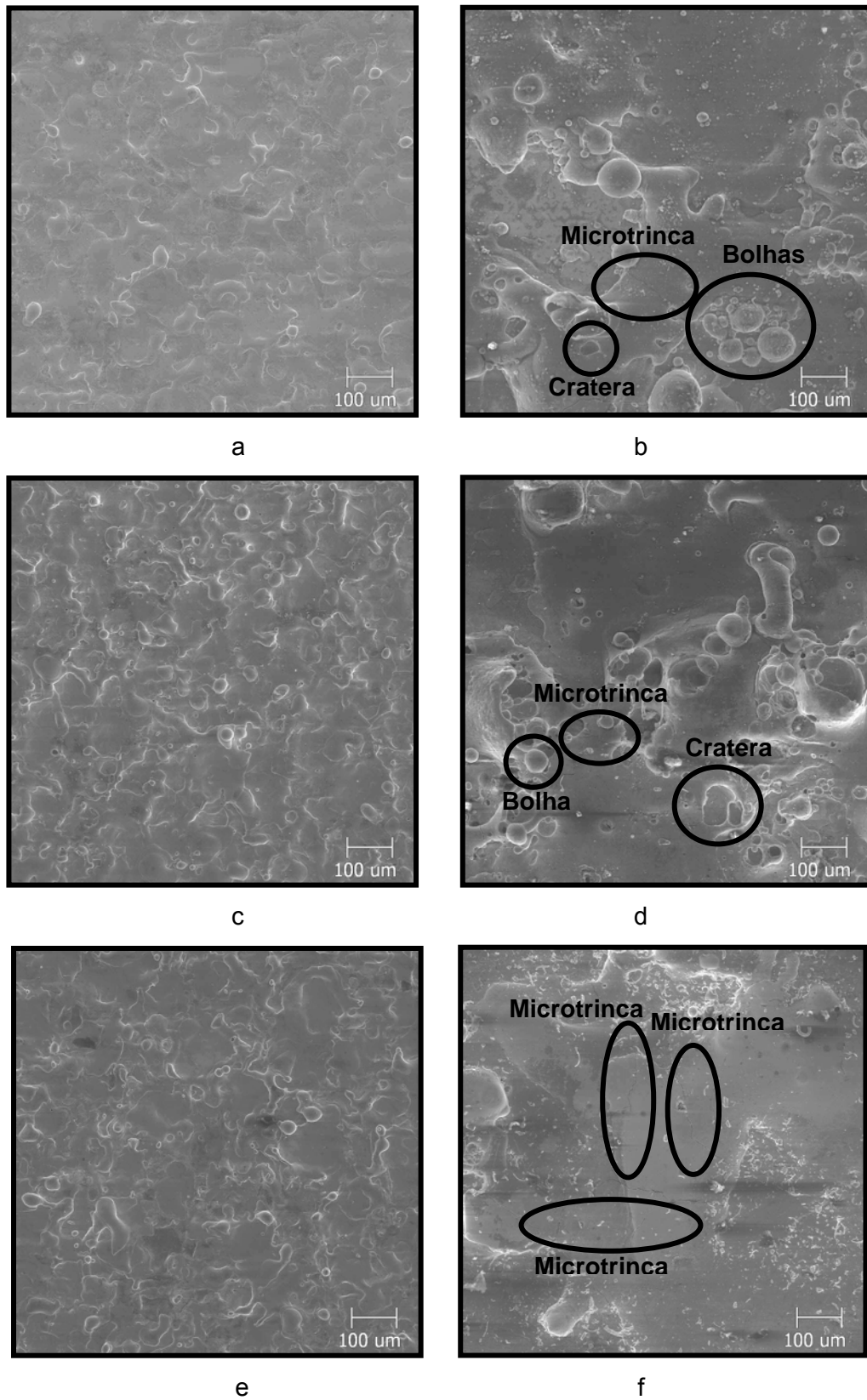


Figura 4.7 - Topografia das superfícies obtidas no regime de acabamento fino (a, c, e) e desbaste (b, d, f) usinadas com eletrodo-ferramenta de grafite usando fluidos a base de milho (a, b), óleo mineral (c, d) e querosene (e, f). Microscopia eletrônica de varredura.

Observa-se, na usinagem com eletrodo-ferramenta de cobre, que as superfícies não apresentaram grandes diferenças morfológicas. No regime de desbaste, as superfícies são mais irregulares com relação às de acabamento fino, devido à maior intensidade das descargas elétricas. Isso provoca a formação de defeitos tais como bolhas, crateras, microtrincas, etc.

Ocorreu o mesmo comportamento visto na usinagem com eletrodo-ferramenta de cobre na usinagem com o de grafite. As superfícies usinadas com grafite não apresentaram grandes diferenças de um fluido para o outro. A diferença aparece na mudança de regime de usinagem. Superfícies obtidas através da usinagem por descargas elétricas (EDM) exibem um aspecto característico que consiste na superposição de crateras devido à evaporação do metal durante a usinagem. O material erodido é ressolidificado e redepositado na superfície na forma de partículas esferoidais de diferentes tamanhos (GHANEM *et al*, 2003).

4.3.2 Rugosidade

Os resultados da rugosidade média aritmética da superfície (S_a) das amostras usinadas com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite no regime de desbaste são mostrados na Tab. 4.5 e na Fig. 4.8.

Tabela 4.5 - Valores da rugosidade média aritmética superficial (S_a) obtida no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

FLUIDOS	S_a (μm)	
	COBRE	GRAFITE
MILHO	19,7	16,9
ALGODÃO	16,6	24,1
CANOLA	22,4	22,2
MAMONA	20,2	20,5
GIRASSOL	19,7	20,3
MINERAL	18,4	19,3
QUEROSENE	11,5	13,7

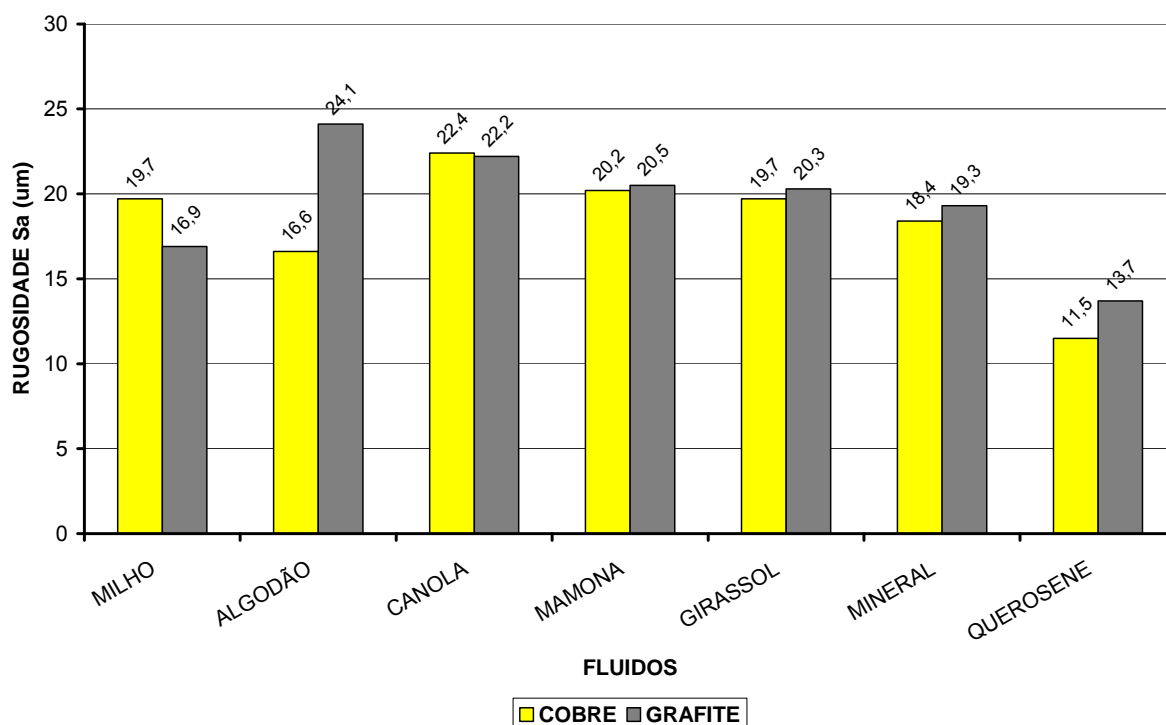


Figura 4.8 - Rugosidades das superfícies geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de desbaste utilizando eletrodos-ferramentas de cobre e grafite.

Observa-se, no geral, que não houve uma diferença significativa entre as rugosidades obtidas com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite. O querosene obteve menor rugosidade, fato que pode estar correlacionado com a sua menor viscosidade, que proporciona maior penetração no *gap* permitindo maior retirada de material. Segundo Guu *et al* (2003), correntes de pulso mais elevadas causam um pior acabamento superficial. Jeswani (1978) afirma que taxas de remoção de materiais mais altas resultariam em crateras maiores e assim numa superfície mais rugosa. Os resultados aqui obtidos estão em concordância com os resultados obtidos por esses autores. Fica evidenciado, portanto, que em regime de desbaste, as características físico-químicas dos diferentes fluidos não têm influência significativa sobre a rugosidade.

A Figura 4.9 mostra as topografias obtidas através da interferometria laser das amostras usinadas no regime de desbaste eletrodos-ferramenta de cobre e grafite. As figuras do lado esquerdo referem-se àquelas usinadas com eletrodo-ferramenta de cobre e as do lado direito com grafite.

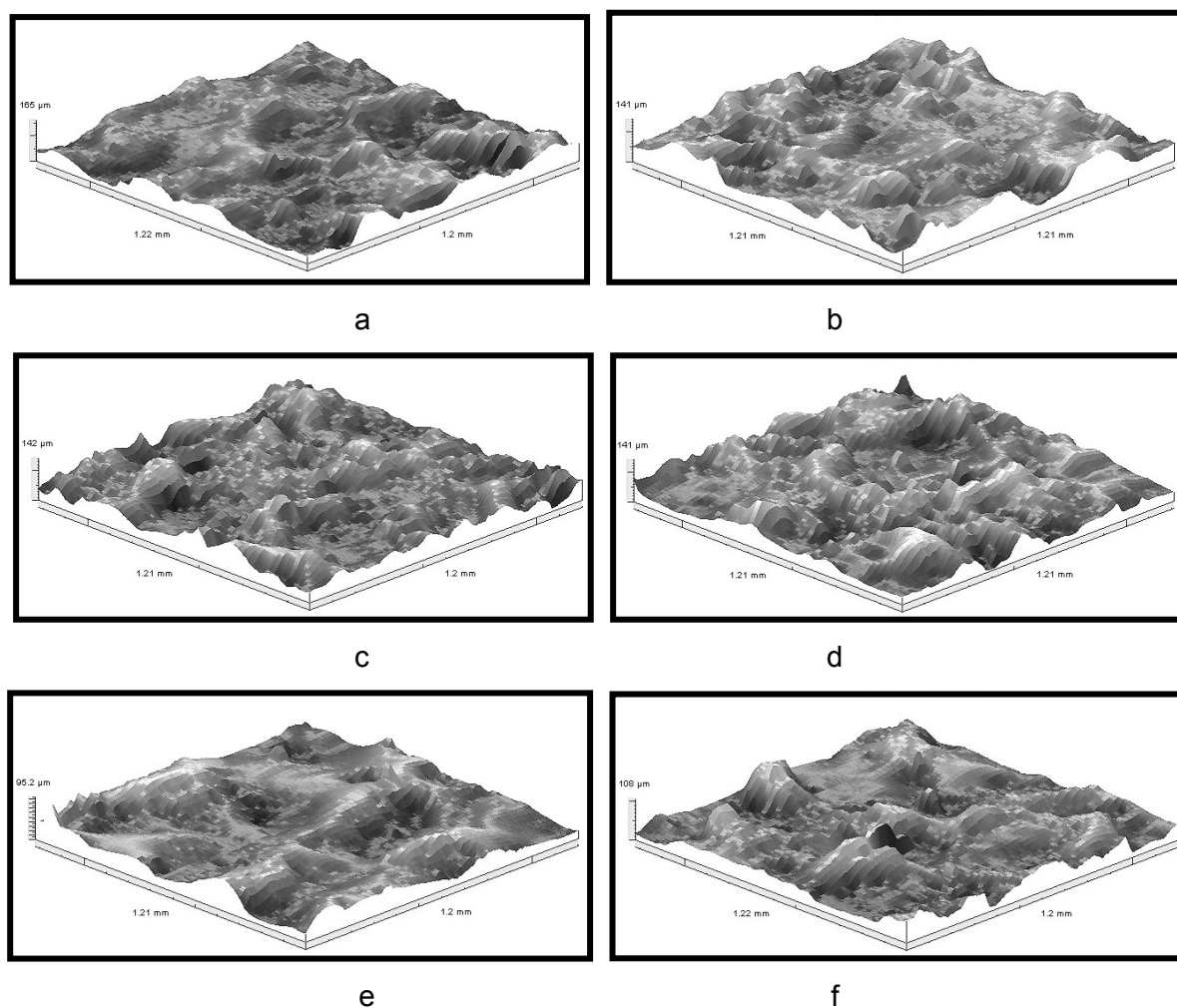


Figura 4.9 - Topografia obtida via interferometria laser das superfícies usinadas pelo processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) com eletrodo-ferramenta de cobre (a, c, e) e grafite (b, d, f) no regime de desbaste usando fluidos a base de milho (a, b), óleo mineral (c, d) e querosene (e, f).

Observa-se no regime de desbaste que as topografias tanto para eletrodo-ferramenta de cobre quanto para o de grafite apresentam aspecto muito próximo. Pode-se notar que, mesmo em regime de desbaste, as superfícies geradas com fluidos vegetais se assemelham aos fluidos derivados de petróleo.

Esses resultados estão em concordância com a morfologia observada no MEV, parágrafo 4.3.1, Fig. 4.6 e 4.7, páginas 63 e 64.

Os resultados da rugosidade das amostras usinadas com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite no regime de acabamento fino são mostrados na Tab. 4.6 e na Fig. 4.10.

Tabela 4.6 - Valores da rugosidade média aritmética superficial (S_a) obtido no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

FLUIDOS	S_a (μm)	
	COBRE	GRAFITE
MILHO	2,5	4,5
ALGODÃO	3,1	3,2
CANOLA	2,6	3,2
MAMONA	3,1	3,4
GIRASSOL	2,7	2,9
MINERAL	2,8	3,3
QUEROSENE	2,9	3,5

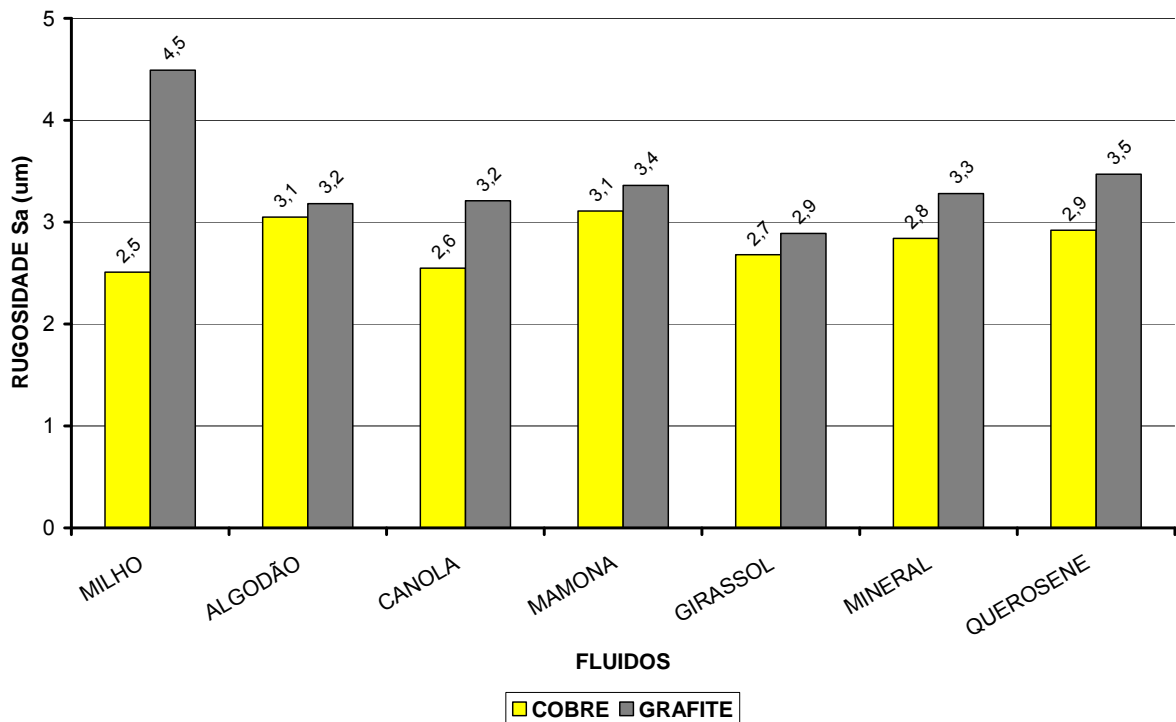


Figura 4.10 - Rugosidade das superfícies geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de acabamento fino utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

Nota-se que as rugosidades das superfícies usinadas com os fluidos vegetais são similares às obtidas com os fluidos derivados de petróleo, tanto para o eletrodo-ferramenta de cobre quanto para o de grafite. A rugosidade obtida com eletrodo-ferramenta de cobre é menor do que a obtida com o de grafite. Isso pode ser devido à menor absorção de energia (do processo) pelo grafite, o que ocasiona maior transferência de calor para a peça e

dielétrico, causando maior vaporização de material, piorando a rugosidade da superfície. Um valor relativamente elevado foi observado no caso do fluido milho na usinagem com eletrodo-ferramenta de grafite, para o qual não foi encontrada uma explicação.

A Figura 4.11 mostra as topografias obtidas através da interferometria laser das amostras usinadas no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite. As figuras do lado esquerdo referem-se àquelas usinadas com eletrodo-ferramenta de cobre e as do lado direito com grafite.

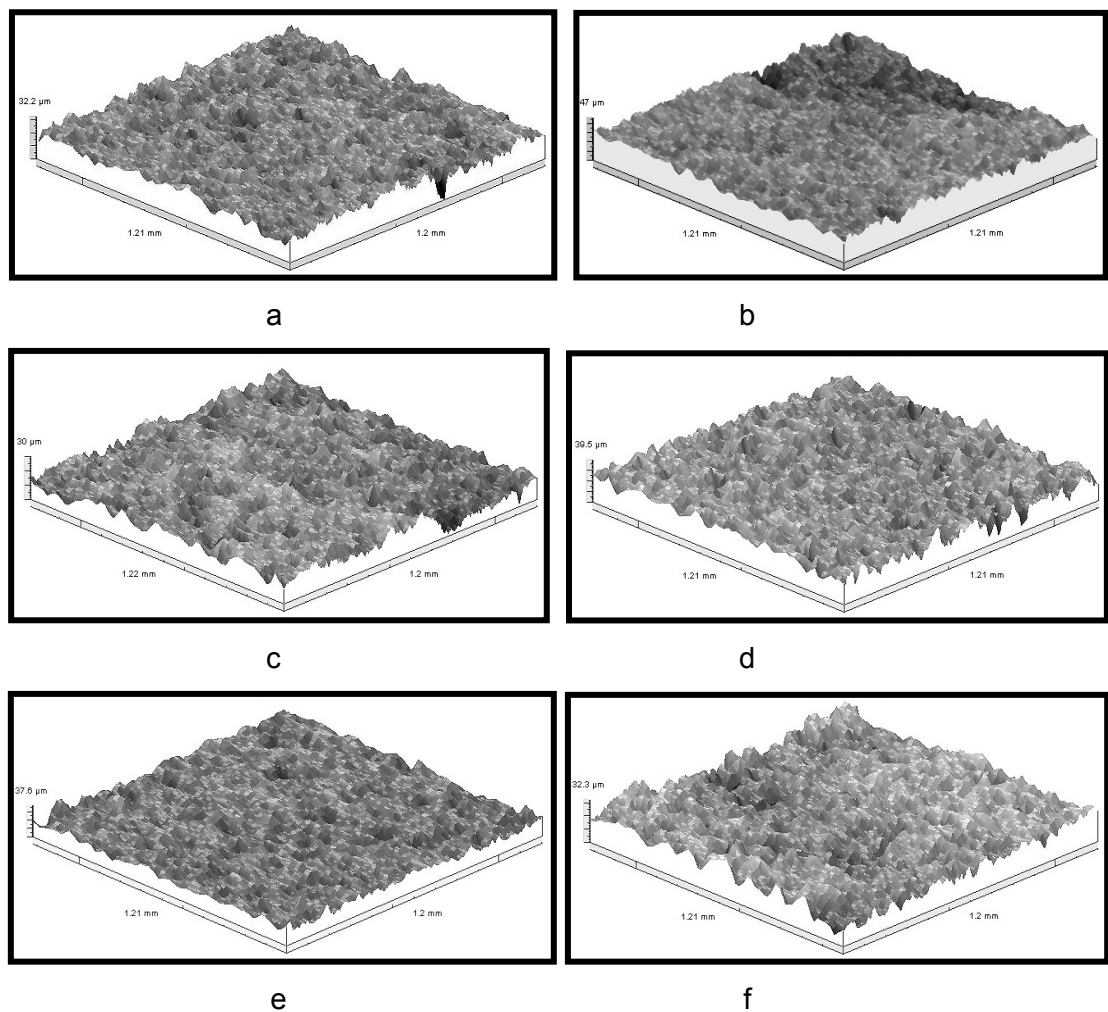


Figura 4.11 - Topografia obtida via interferometria laser das superfícies usinadas pelo processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) com eletrodo-ferramenta de cobre (a, c, e) e grafite (b, d, f) no regime de acabamento fino usando fluidos a base de milho (a, b), óleo mineral (c, d) e querosene (e, f).

A topografia das superfícies usinadas em regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite apresenta aspectos muito próximos. Isso mostra que, em termos de topografia de superfície, a usinagem com os fluidos vegetais apresenta bom

aspecto tanto quanto os fluidos derivados de petróleo. Arantes (2001) mostra que, na usinagem de um aço rápido com diferentes fluidos minerais específicos, a topografia de superfície não apresentou diferenças visuais significativas. Esses resultados estão em concordância com a morfologia observada no MEV, parágrafo 4.3.1, Fig. 4.6 e 4.7, páginas 63 e 64.

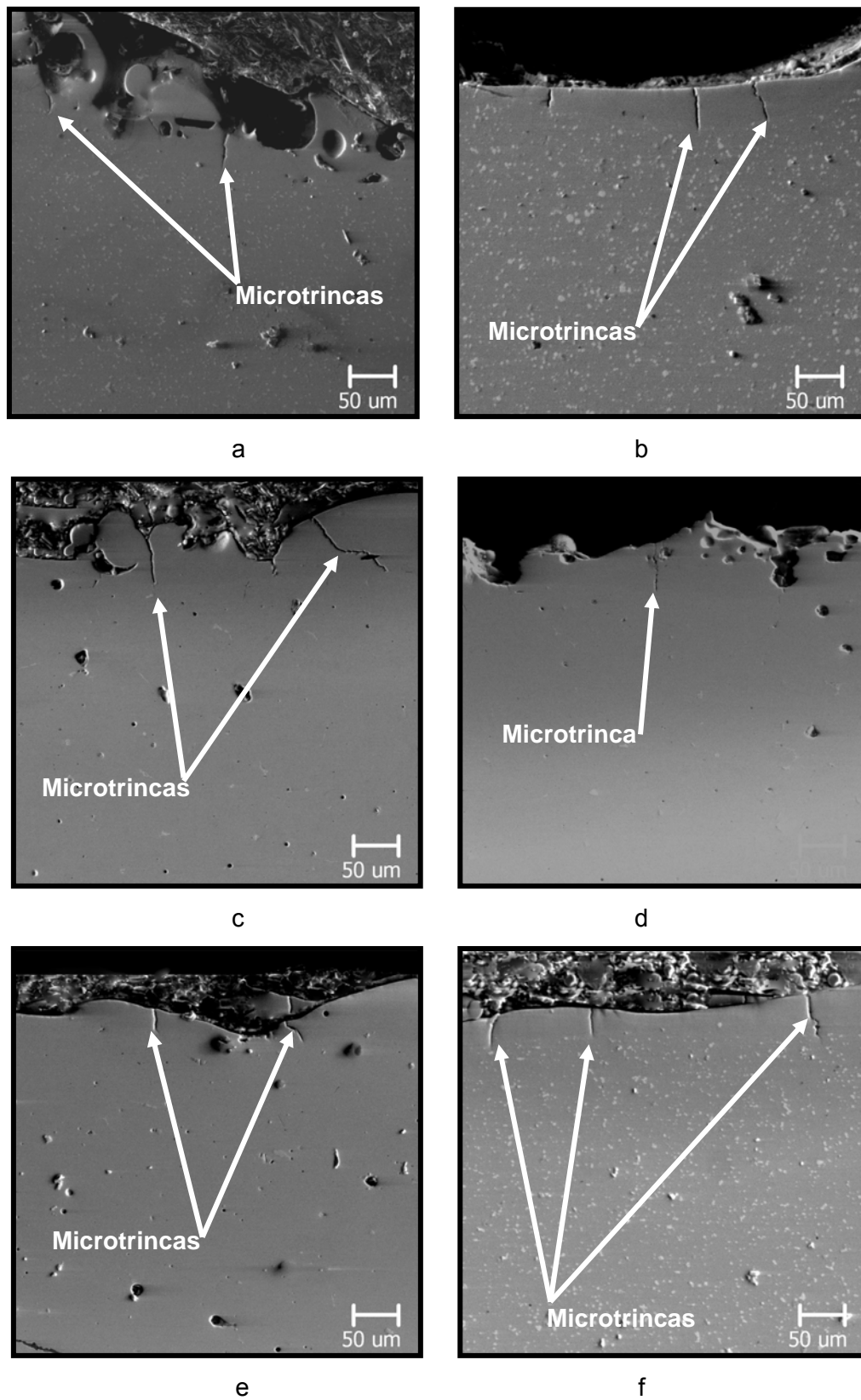
4.4 Modificações estruturais

4.4.1 Quantidade e comprimento das microtrincas

A Figura 4.12 mostra as imagens obtidas através da microscopia eletrônica de varredura das microtrincas das superfícies geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite no regime de desbaste. As figuras do lado esquerdo referem-se àquelas usinadas com eletrodo-ferramenta de cobre e as do lado direito com grafite.

Devido à semelhança das imagens obtidas nas usinagens com os fluidos vegetais, optou-se em apresentar somente as imagens do fluido milho a fim de representar os resultados dos outros fluidos vegetais testados.

Os resultados da quantidade, densidade e comprimento de microtrincas geradas no material usinado no regime de desbaste são apresentados na Tab. 4.7 e nas Fig. 4.13, 4.14, 4.15.



4.12 - Imagens obtidas através da microscopia eletrônica de varredura das microtrincas das superfícies geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) com eletrodos-ferramenta de cobre (a, c, e) e grafite (b, d, f) no regime de desbaste usando fluidos a base de milho (a, b), óleo mineral (c, d) e querosene (e, f).

Tabela 4.7 - Quantidade, densidade e comprimento médio das microtrincas geradas no regime de desbaste, com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

FLUIDOS	COBRE			GRAFITE		
	n	D	L(μm)	n	D	L(μm)
MILHO	5	0,9	27 \pm 11	10	1,8	38 \pm 18
ALGODÃO	14	2,4	43 \pm 39	11	1,9	32 \pm 19
CANOLA	7	1,2	46 \pm 20	20	3,5	47 \pm 45
MAMONA	13	2,3	29 \pm 24	11	1,9	22 \pm 21
GIRASSOL	9	1,6	28 \pm 17	7	1,2	22 \pm 16
MINERAL	13	2,3	31 \pm 30	18	2,7	35 \pm 28
QUEROSENE	11	2,0	24 \pm 12	9	1,7	22 \pm 11

Onde:

n = número de microtrincas;

D = densidade: microtrincas por mm;

L = comprimento médio das microtrincas em μm .

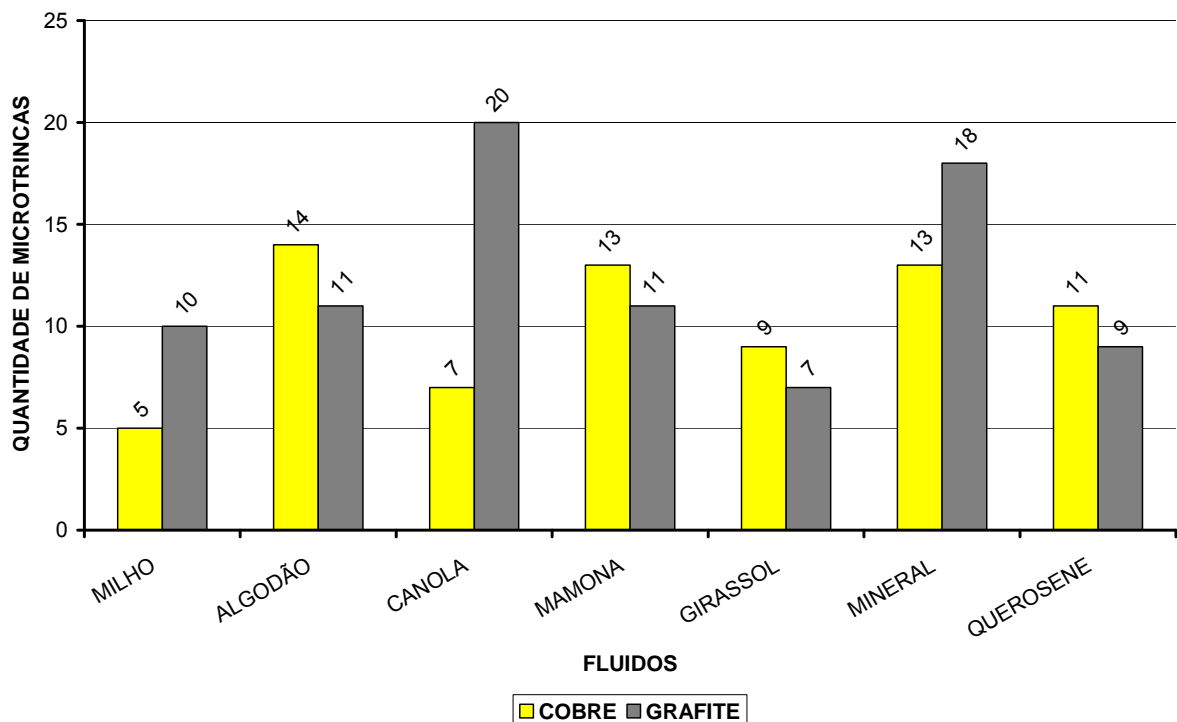


Figura 4.13 - Quantidade de microtrincas geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de desbaste utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

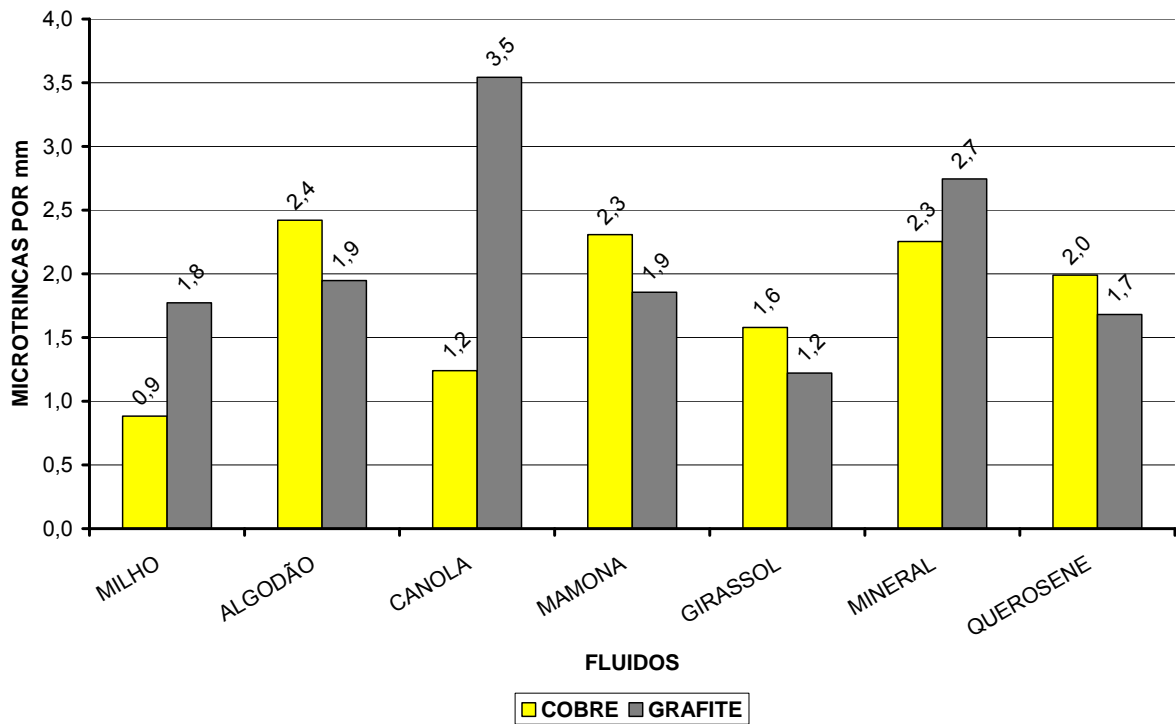


Figura 4.14 - Densidade de microtrincas geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de desbaste utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

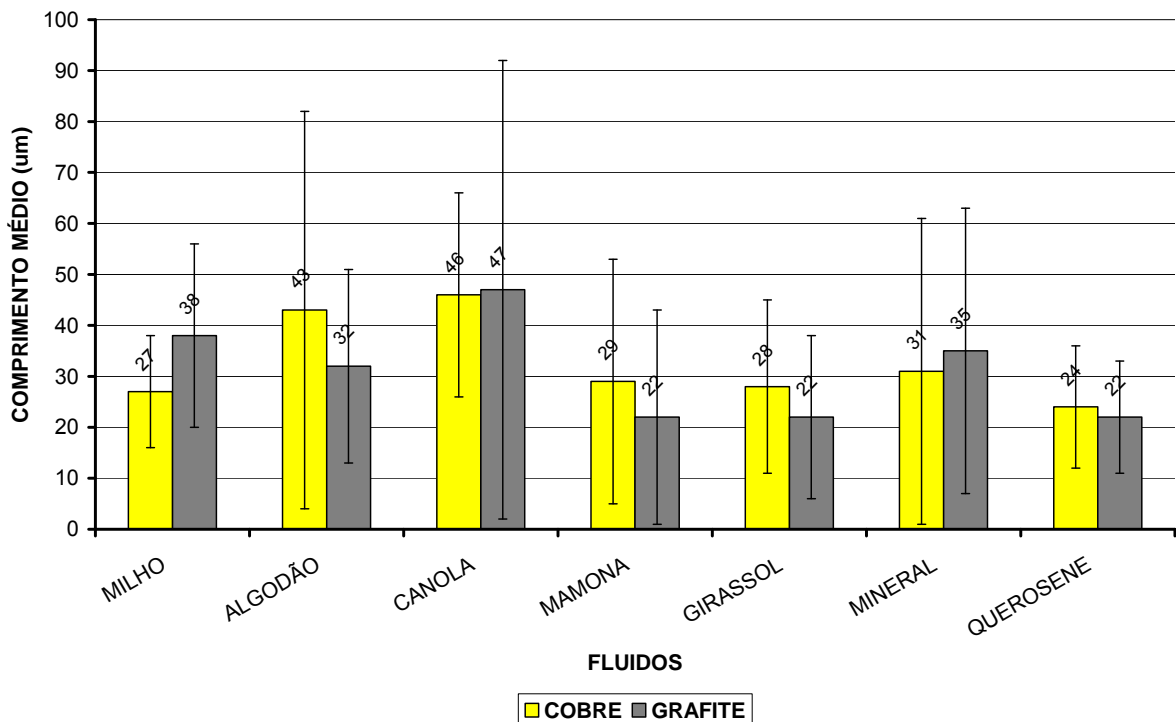


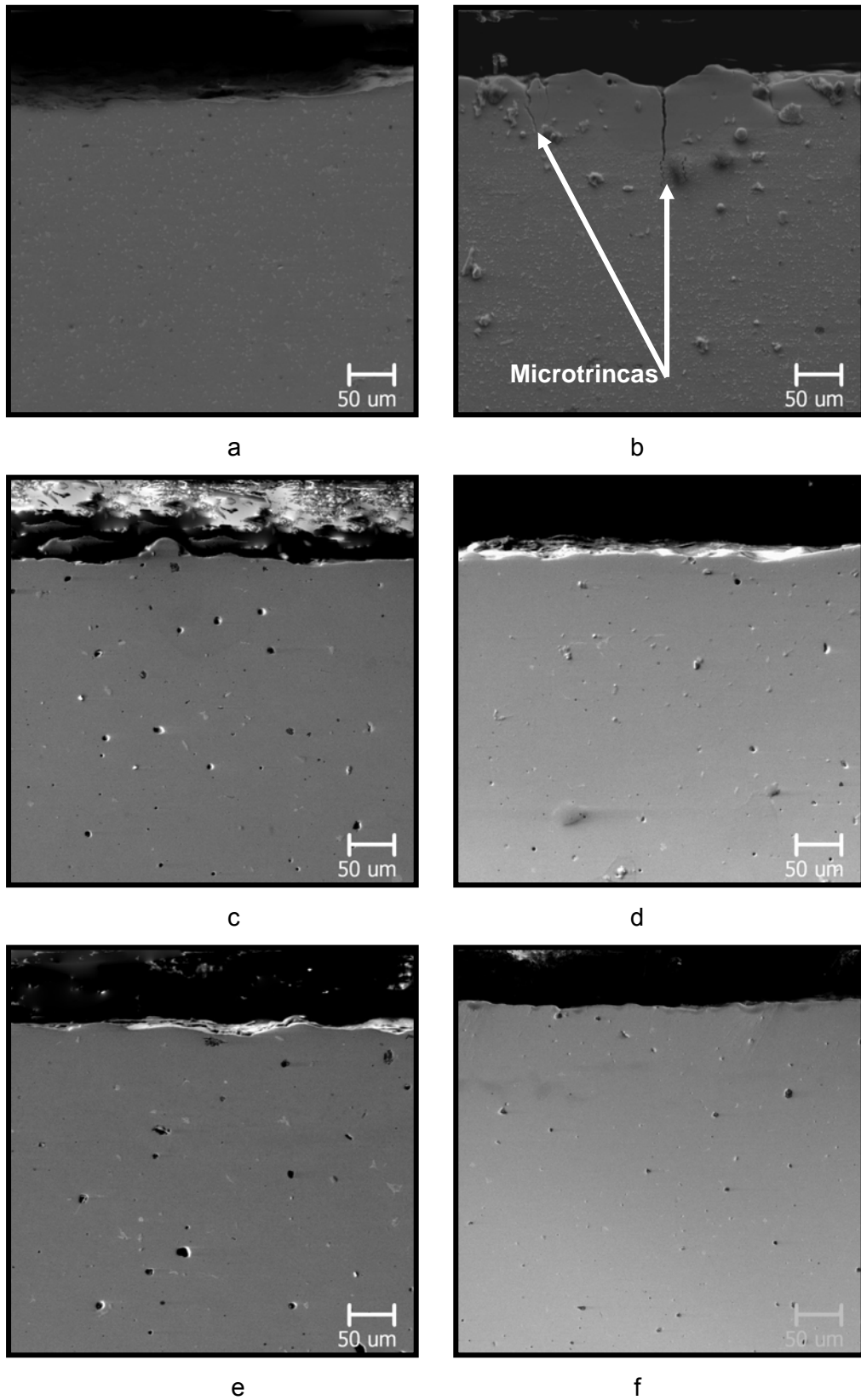
Figura 4.15 - Comprimento médio das microtrincas geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de desbaste utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

Observou-se que o número de microtrincas aumenta com o aumento do tempo de duração da descarga em regime de desbaste. Lee *et al* (2003) afirmam que a formação de microtrincas está relacionada com os parâmetros de EDM. Um aumento da duração do pulso aumenta a camada refundida e induz à tensão. Essas duas condições tendem a promover a formação de microtrincas. Os fluidos vegetais milho (na usinagem com cobre) e girassol (na usinagem com grafite) apresentaram os melhores resultados no item densidade de microtrincas. Já no comprimento de microtrincas, o querosene apresentou os melhores resultados para os dois eletrodos-ferramenta usados. Entre eletrodos-ferramenta, o cobre tem pequena vantagem com relação ao de grafite.

A Figura 4.16 mostra as imagens obtidas através da microscopia eletrônica de varredura das microtrincas das superfícies geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite no regime de acabamento fino. As figuras do lado esquerdo referem-se àquelas usinadas com eletrodo-ferramenta de cobre e as do lado direito com grafite.

Devido à semelhança das imagens obtidas nas usinagens com os fluidos vegetais, optou-se em apresentar somente as imagens do fluido milho a fim de representar os resultados dos outros fluidos vegetais testados.

Os resultados da quantidade, densidade e comprimento de microtrincas geradas no material usinado no regime de acabamento fino são apresentados na Tab. 4.8 e nas Fig. 4.17, 4.18, 4.19.



4.16 - Imagens obtidas através da microscopia eletrônica de varredura das microtrincas das superfícies geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) com eletrodos-ferramenta de cobre (a, c, e) e grafite (b, d, f) no regime de acabamento fino usando fluidos a base de milho (a, b), óleo mineral (c, d) e querosene (e, f).

Tabela 4.8 - Quantidade, densidade e comprimento médio das microtrincas geradas no regime de acabamento fino, com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

FLUIDOS	COBRE			GRAFITE		
	n	D	L(μm)	n	D	L(μm)
MILHO	1	0,2	43 \pm 0	11	2,1	41 \pm 24
ALGODÃO	10	1,9	35 \pm 31	2	0,4	21 \pm 11
CANOLA	8	1,6	78 \pm 72	10	1,9	43 \pm 29
MAMONA	7	1,3	36 \pm 21	14	2,6	85 \pm 82
GIRASSOL	0	0	0	14	2,6	29 \pm 25
MINERAL	0	0	0	0	0	0
QUEROSENE	0	0	0	0	0	0

Onde:

n = número de microtrincas;

D = densidade: microtrincas por mm;

L = comprimento médio das microtrincas em μm .

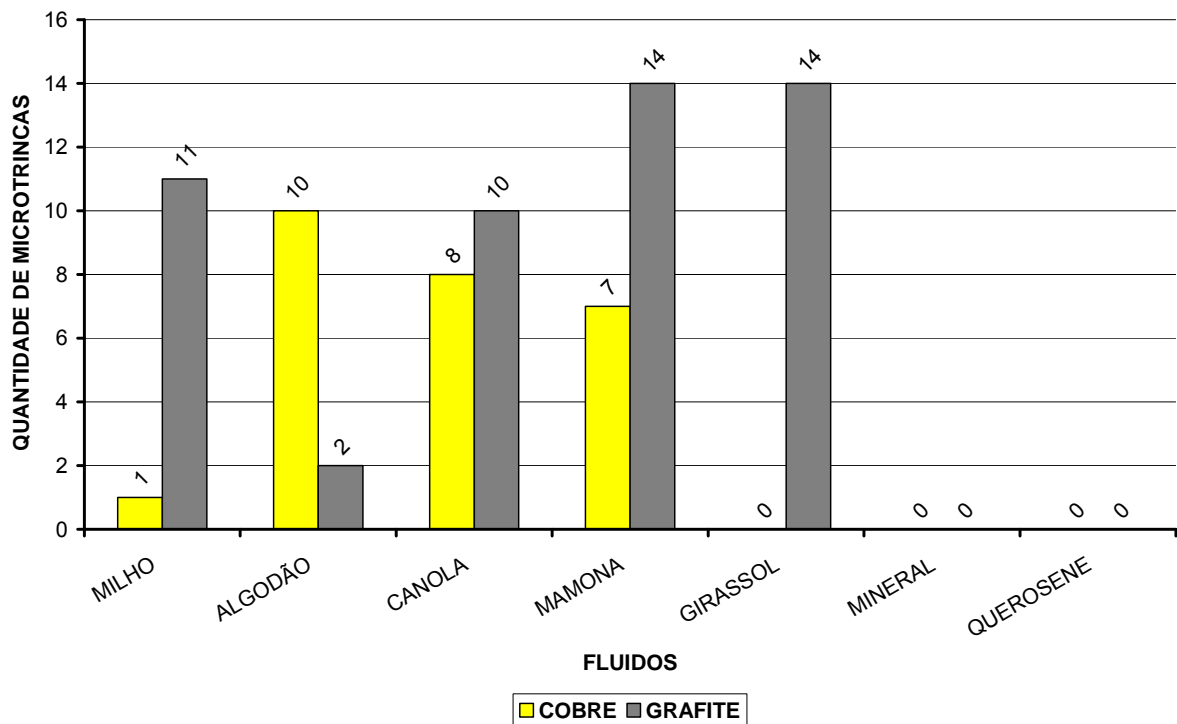


Figura 4.17 - Quantidade de microtrincas geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de acabamento fino utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

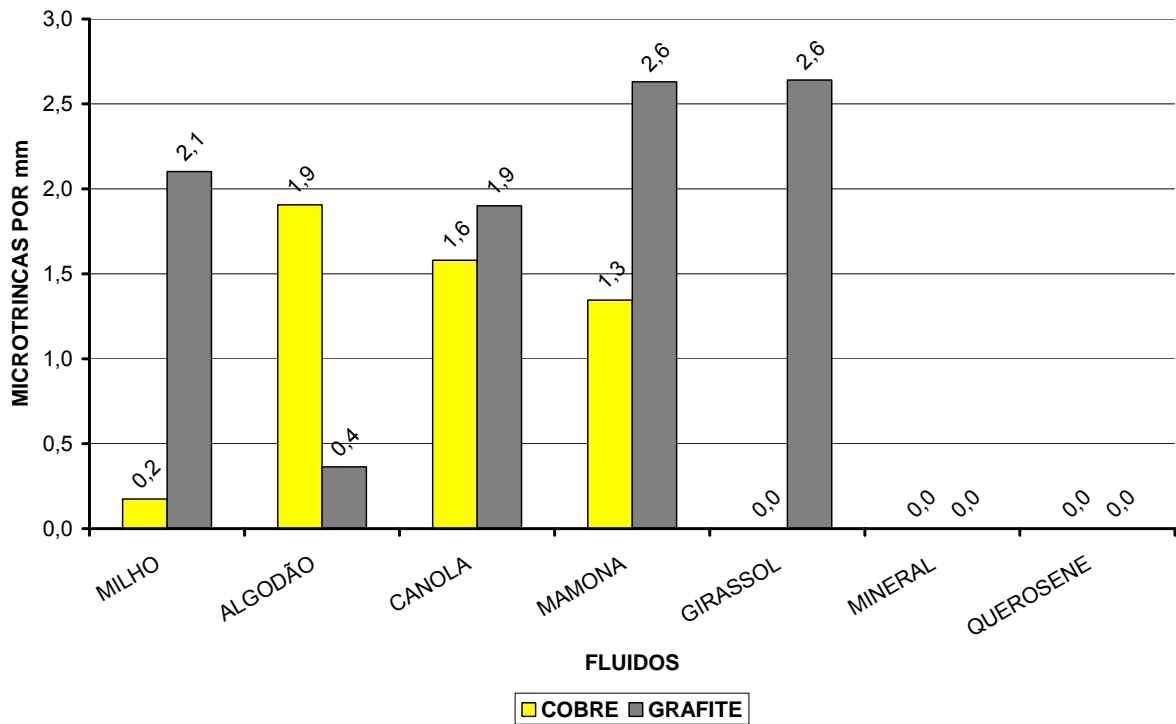


Figura 4.18 - Densidade de microtrincas geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de acabamento fino utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

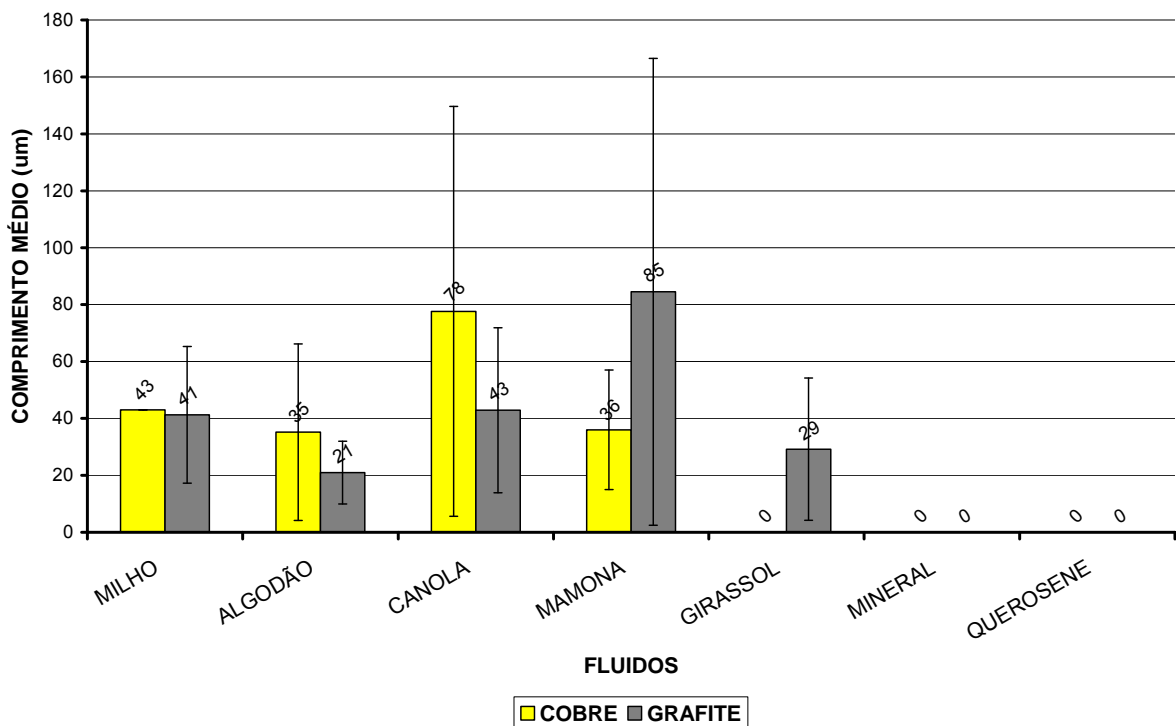


Figura 4.19 - Comprimento médio das microtrincas geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de acabamento fino utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

Observa-se, na Fig. 4.18, que os fluidos derivados do petróleo e o fluido girassol obtiveram melhor desempenho no regime de acabamento fino com eletrodo-ferramenta de cobre. Na usinagem com eletrodo-ferramenta de grafite, apenas os fluidos derivados do petróleo apresentaram bom desempenho. O melhor desempenho destes fluidos pode estar correlacionado com a sua maior capacidade de refrigeração em relação aos outros fluidos. A usinagem com o eletrodo-ferramenta de cobre apresentou menor quantidade de microtrincas por fluidos. Isso pode estar relacionado à maior camada refundida gerada com a usinagem com eletrodo-ferramenta de grafite. Lima (1997), em seus trabalhos concluiu que o número de microtrincas bem como sua extensão média, é maior quando se usina com eletrodo-ferramenta de grafite do que quando se usina com eletrodo-ferramenta de cobre.

4.4.2 Caracterização microestrutural e microdureza

4.4.2.1 Camada refundida

A caracterização das amostras foi realizada analisando a camada refundida, a zona afetada pelo calor e a microdureza.

A Figura 4.20 mostra as imagens obtidas através da microscopia ótica das camadas geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite no regime de desbaste.

Os valores da espessura média da camada refundida geradas no material usinado no regime de desbaste são mostrados na Tab. 4.9 e na Fig. 4.21.

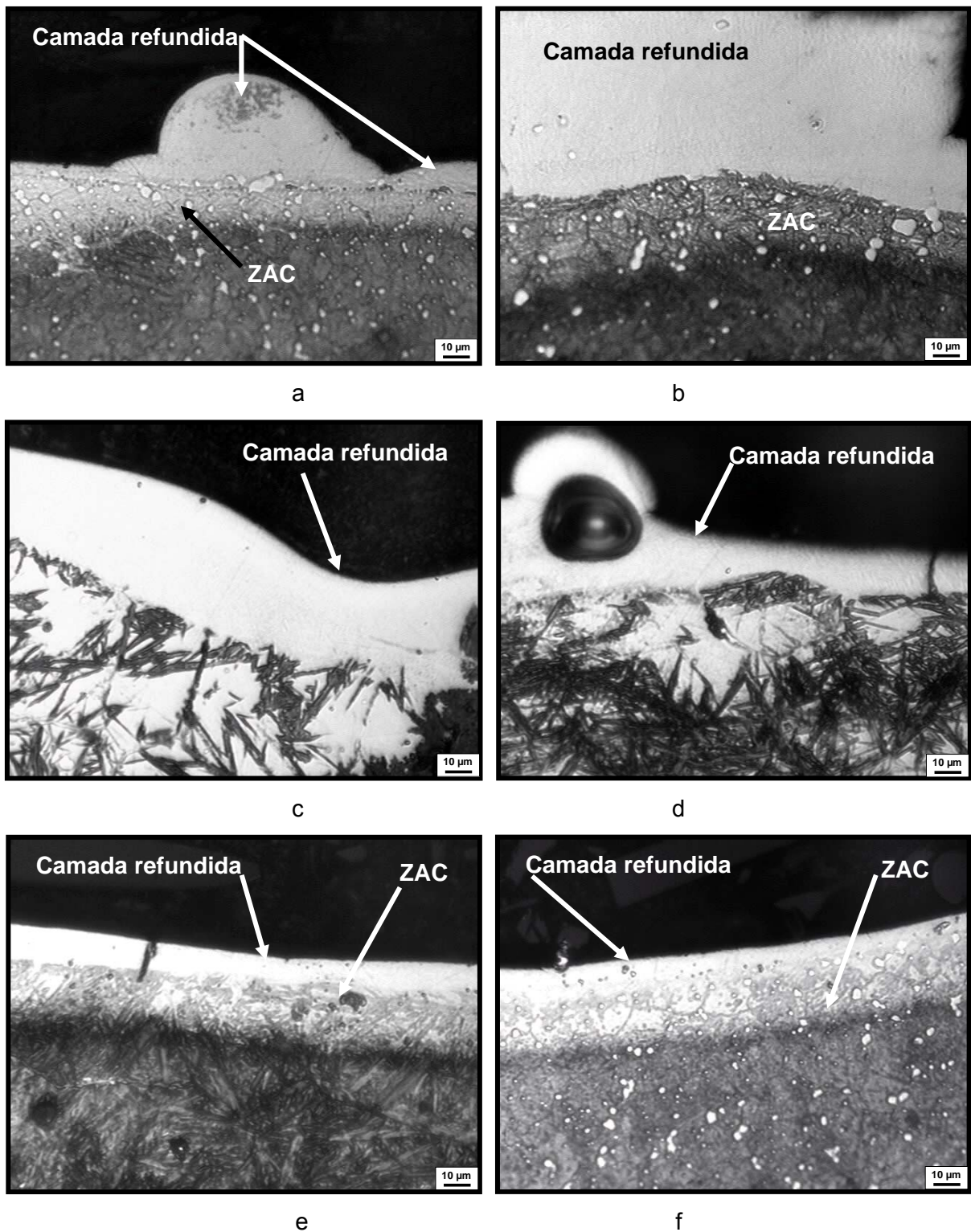


Figura 4.20 - Imagens obtidas através da microscopia ótica da camada refundida e da zona afetada pelo calor (ZAC) com eletrodos-ferramenta de cobre (a, c, e) e grafite (b, d, f) usando fluidos a base de milho (a, b), óleo mineral (c, d) e querosene (e, f) no regime de desbaste.

Tabela 4.9 - Valores da espessura média da camada refundida gerada no regime de desgaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

FLUIDOS	ESPESSURA MÉDIA CAMADA REFUNDIDA (μm)	
	COBRE	GRAFITE
MILHO	41,0 \pm 18,2	38,4 \pm 19,7
ALGODÃO	34,8 \pm 18,6	42,5 \pm 27,4
CANOLA	66,8 \pm 21,0	46,8 \pm 14,0
MAMONA	42,6 \pm 26,4	45,6 \pm 17,1
GIRASSOL	41,4 \pm 17,2	33,6 \pm 13,2
MINERAL	46,6 \pm 24,8	33,2 \pm 22,4
QUEROSENE	47,7 \pm 20,4	24,4 \pm 18,9

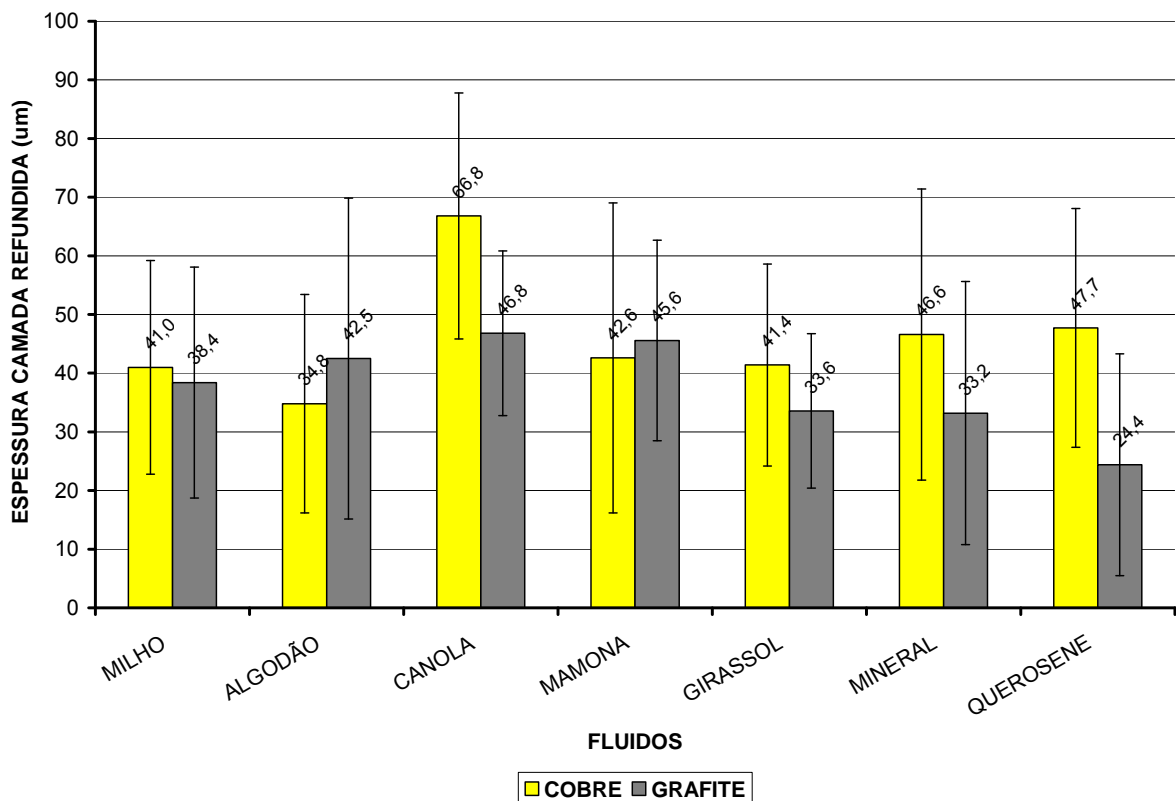


Figura 4.21 - Espessura média da camada refundida gerada no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de desgaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

Observou-se em relação aos resultados obtidos, uma grande dispersão nos dados. Pode-se, no máximo, inferir que existe uma tendência para um melhor comportamento do fluido algodão com eletrodo-ferramenta de cobre e do querosene com o de grafite. Observou-se que a mudança de regime de acabamento fino para desbaste gera maior espessura de camada refundida. Segundo Guu *et al* (2003), a camada refundida fica mais grossa com o aumento da corrente e do tempo de duração da descarga. Os resultados aqui obtidos estão em concordância com estes autores. Já no acabamento fino, o eletrodo-ferramenta de grafite mostra uma tendência a apresentar menores espessuras. Isso também pode estar correlacionado com a maior taxa de remoção de material e, portanto, maior aporte térmico obtido com o eletrodo-ferramenta de cobre do que com o de grafite no regime de desbaste.

A Figura 4.22 mostra as imagens obtidas através da microscopia ótica das camadas geradas no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite no regime de acabamento fino.

Os valores da espessura média da camada refundida geradas no material usinado no regime de acabamento fino são mostrados na Tab. 4.10 e na Fig. 4.23.

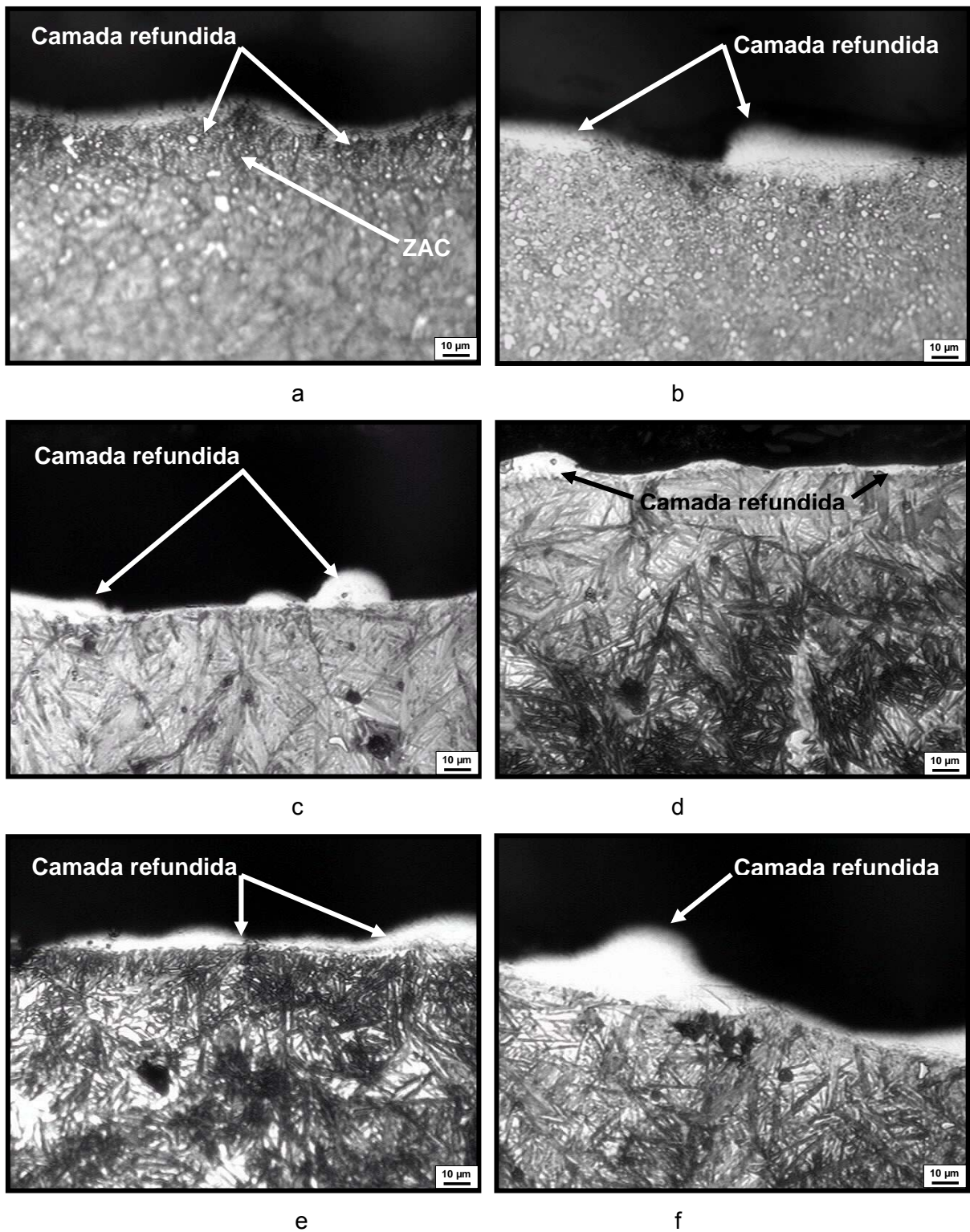


Figura 4.22 - Imagens obtidas através da microscopia ótica da camada refundida e da zona afetada pelo calor (ZAC) com eletrodos-ferramenta de cobre (a, c, e) e grafite (b, d, f) usando fluidos a base de milho (a, b), óleo mineral (c, d) e querosene (e, f) no regime de acabamento fino.

Tabela 4.10 - Valores da espessura média da camada refundida gerada no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

FLUIDOS	ESPESSURA MÉDIA CAMADA REFUNDIDA (μm)	
	COBRE	GRAFITE
MILHO	$5,3 \pm 2,5$	$7,4 \pm 3,0$
ALGODÃO	$24,0 \pm 13,9$	$10,3 \pm 3,1$
CANOLA	$9,4 \pm 4,3$	$13,2 \pm 8,8$
MAMONA	$13,2 \pm 10,0$	$27,2 \pm 25,3$
GIRASSOL	$7,2 \pm 1,2$	$17,4 \pm 10,0$
MINERAL	$9,0 \pm 4,2$	$9,3 \pm 6,5$
QUEROSENE	$7,8 \pm 2,4$	$10,7 \pm 5,6$

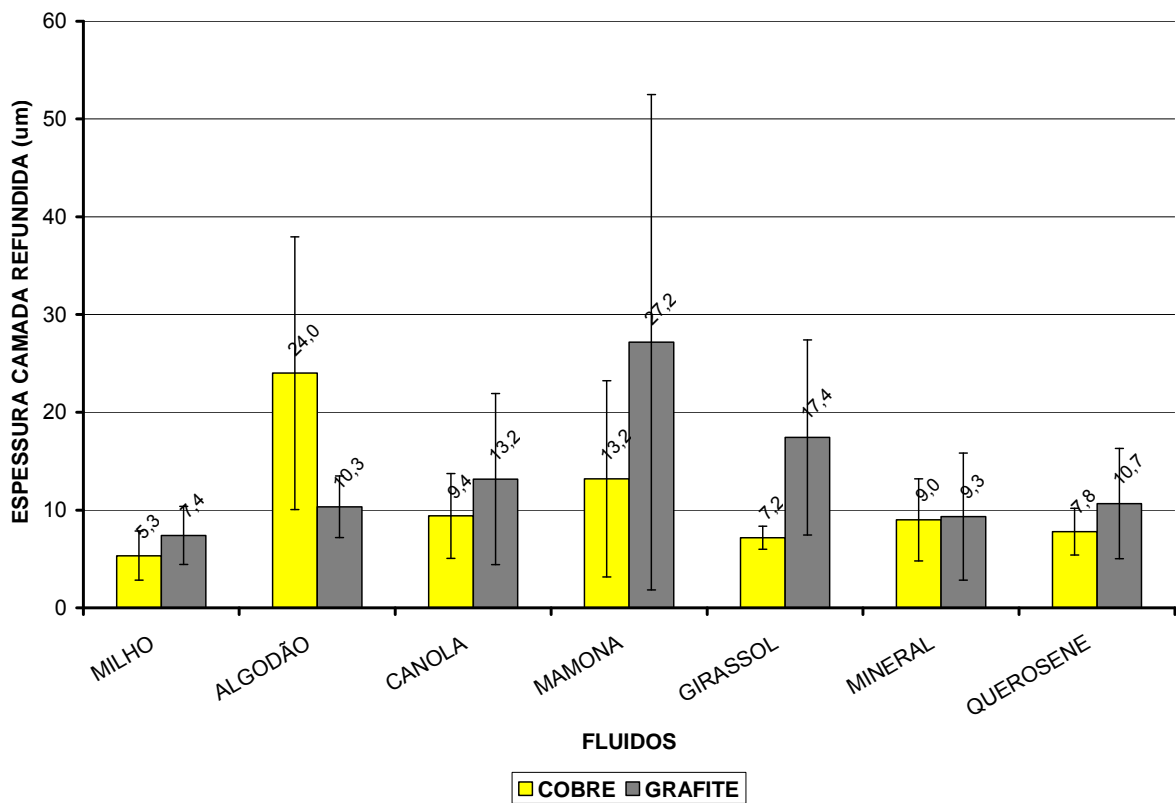


Figura 4.23 - Espessura média da camada refundida gerada no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

Em decorrência da elevada dispersão nos resultados, torna-se difícil estabelecer uma diferença clara de comportamento entre os fluidos. Nota-se apenas uma ligeira tendência para um melhor desempenho do fluido milho.

Verificou-se que, no geral, a usinagem com eletrodo-ferramenta de cobre obteve menores espessuras de camada refundida do que com o de grafite. Isso pode estar relacionado à maior taxa de remoção de material obtida com eletrodo-ferramenta de grafite do que com o de cobre.

Não foi realizada uma avaliação sobre a microestrutura da camada refundida, pois, de acordo com Kruth *et al* (1995), o uso de eletrodos-ferramenta de cobre e grafite tem pouca influência na estrutura da camada refundida. Isso se deve ao fato de que poucas quantidades de material do eletrodo-ferramenta migram para a camada refundida.

A mudança na microestrutura das amostras usinadas com os fluidos derivados de petróleo pode estar correlacionada, provavelmente, com a melhor capacidade de refrigeração destes fluidos.

4.4.2.2 Zona afetada pelo calor (ZAC)

Na Tabela 4.11 e na Fig. 4.24, são mostrados os resultados obtidos para a zona afetada pelo calor (ZAC) gerados no material usinado com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite no regime de desbaste.

Tabela 4.11 - Valores da espessura média da zona afetada pelo calor (ZAC) no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

FLUIDOS	ESPESSURA MÉDIA ZAC (μm)	
	COBRE	GRAFITE
MILHO	$26,0 \pm 10,5$	$27,5 \pm 7,9$
ALGODÃO	$39,0 \pm 12,7$	$41,0 \pm 5,6$
CANOLA	$36,6 \pm 12,0$	$40,4 \pm 9,1$
MAMONA	$42,6 \pm 13,2$	$48,9 \pm 11,0$
GIRASSOL	$35,6 \pm 11,3$	$45,6 \pm 21,5$
MINERAL	$29,5 \pm 3,5$	$16,0 \pm 3,5$
QUEROSENE	$24,6 \pm 4,9$	$19,2 \pm 3,8$

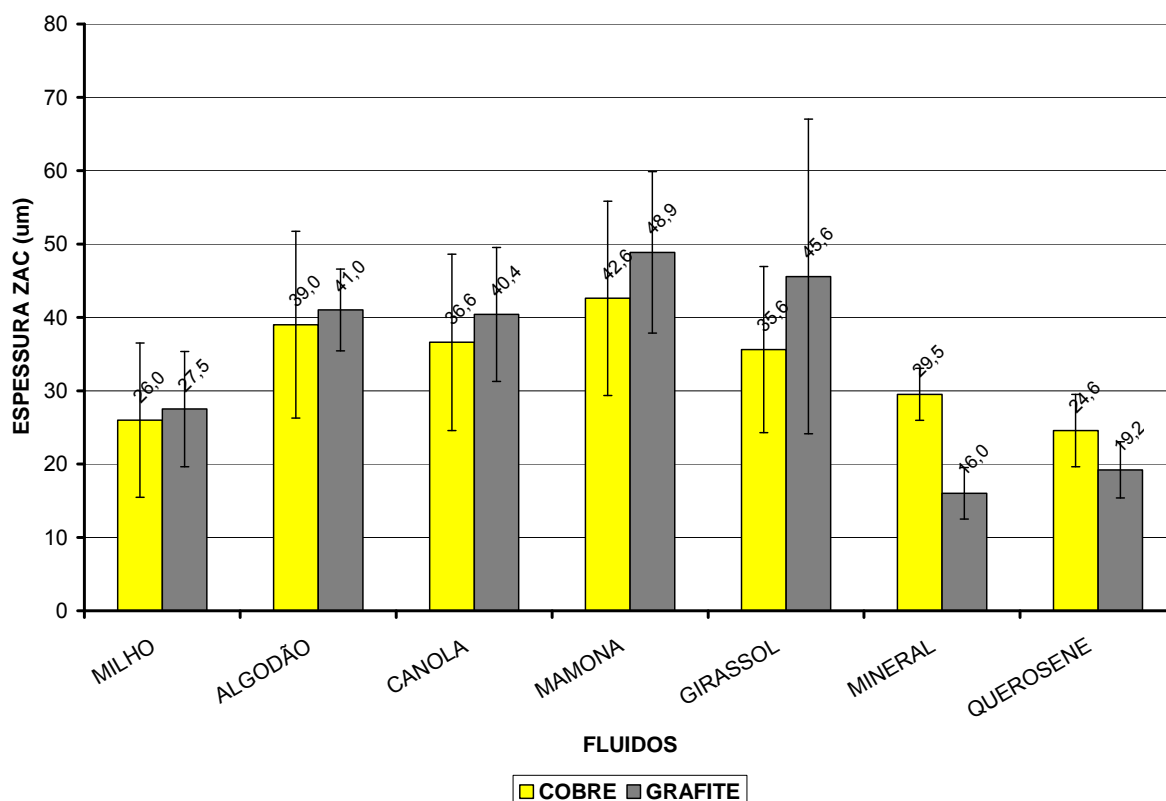


Figura 4.24 - Espessura média da zona afetada pelo calor (ZAC) gerada no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

Observa-se que, na usinagem com o eletrodo-ferramenta de cobre, os resultados da espessura da ZAC apresentam pouca variação. O querosene apresenta tendência de gerar menores espessuras, seguidas pelos fluidos milho e mineral. Na usinagem com o eletrodo-ferramenta de grafite, os fluidos derivados do petróleo apresentaram melhores resultados. Segundo Lima (1997), a ZAC apresenta-se mais espessa quando se usa em regime de desbaste. Guitrau (1997) afirma que a maior duração da descarga gera quantidades de calor suficientes para penetrar na peça, gerando maior espessura de camada refundida e ZAC. Pode-se observar que o eletrodo-ferramenta de cobre proporcionou menor espessura de ZAC do que o de grafite.

Lima (1997) também afirma que na usinagem com eletrodo-ferramenta de grafite no regime de desbaste, a ZAC aparece mais bem definida. No presente trabalho, a ZAC também se mostrou mais bem definida com regime de desbaste, tanto com eletrodo-ferramenta de cobre quanto de grafite conforme a Fig. 4.20.

Na Tabela 4.12 e na Fig. 4.25, são mostrados os resultados obtidos para a zona afetada pelo calor (ZAC) gerados no material usinado com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite no regime de acabamento fino.

Tabela 4.12 - Valores da espessura média da zona afetada pelo calor (ZAC) no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

FLUIDOS	ESPESSURA MÉDIA ZAC (μm)	
	COBRE	GRAFITE
MILHO	$4,7 \pm 2,5$	$7,8 \pm 3,2$
ALGODÃO	$40,6 \pm 12,7$	$7,0 \pm 3,3$
CANOLA	$23,3 \pm 22,5$	$40,7 \pm 11,9$
MAMONA	$12,0 \pm 3,5$	$38,2 \pm 37,0$
GIRASSOL	$9,3 \pm 4,7$	$19,2 \pm 19,0$
MINERAL	$5,8 \pm 2,6$	$8,0 \pm 5,6$
QUEROSENE	$9,4 \pm 2,8$	$5,7 \pm 1,5$

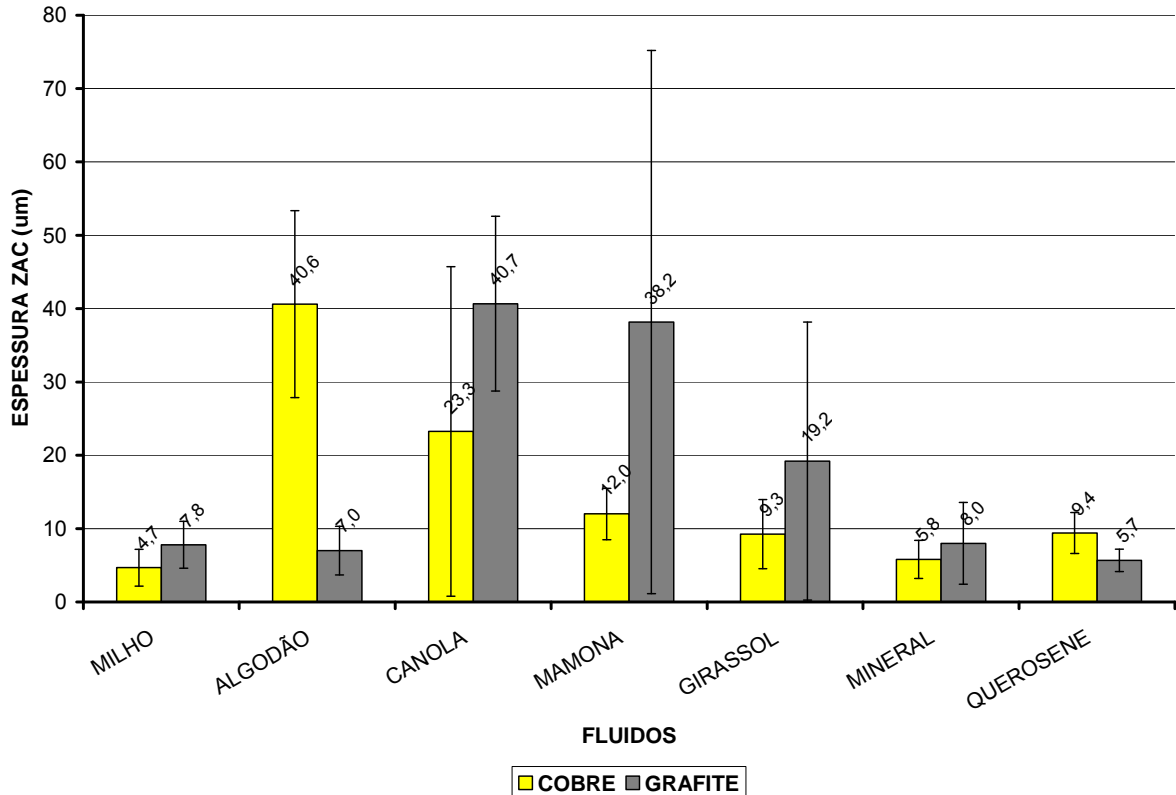


Figura 4.25 - Espessura média da zona afetada pelo calor (ZAC) gerada no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

Observa-se um melhor desempenho do milho e dos fluidos derivados do petróleo na usinagem com eletrodo-ferramenta de cobre. Na usinagem com eletrodo-ferramenta de grafite, o querosene obteve o melhor desempenho, seguido pelos os fluidos milho e algodão. Segundo Arantes (2006), provavelmente a elevada geração de bolhas na usinagem com querosene proporcionou uma melhor refrigeração da superfície usinada e menor ataque químico. Nota-se que o eletrodo-ferramenta de cobre apresenta uma tendência de gerar menores espessuras.

4.4.2.3 Microdureza

Os ensaios foram realizados em um microdurômetro da marca Shimadzu, com carga de 25 g. A matriz de todas as amostras usinadas apresentou uma microdureza média de 992,1 HV25 com um desvio padrão de 97,7.

Os resultados obtidos para a microdureza da camada refundida no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite são mostrados na Tab. 4.13 e na Fig. 4.26.

Tabela 4.13 - Valores da microdureza Vickers da camada refundida do aço rápido usinado no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

FLUIDOS	MICRODUREZA CAMADA REFUNDIDA (HV)	
	COBRE	GRAFITE
MILHO	713,5 ± 21,2	957,1 ± 28,6
ALGODÃO	746,2 ± 50,4	1102,0 ± 79,9
CANOLA	1261,8 ± 63,6	1256,2 ± 35,3
MAMONA	755,2 ± 75,9	952,1 ± 75,6
GIRASSOL	756,4 ± 50,5	831,0 ± 12,1
MINERAL	1114,6 ± 107	1098,4 ± 86,2
QUEROSENE	939,7 ± 73,9	1091,3 ± 145,9

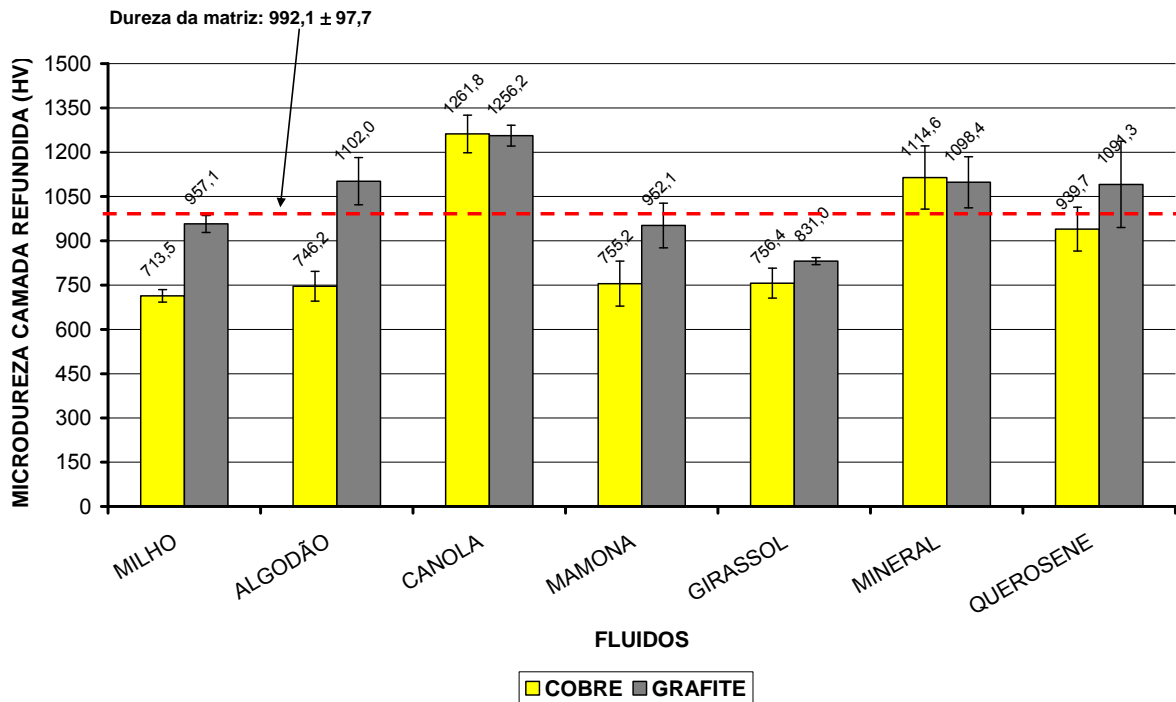


Figura 4.26 - Microdureza Vickers da camada refundida do aço rápido após processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime desbaste utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

Observa-se que na usinagem com eletrodo-ferramenta de cobre, somente o fluido canola e o mineral apresentaram microdurezas acima da matriz. Na usinagem com os outros fluidos a microdureza das peças apresentaram microdureza abaixo da matriz. Isso pode estar relacionado a fatores como à falta de circulação do fluido que pode ter promovido um resfriamento lento ou pode ter ocorrido descarbonetação por processo de difusão, devido às altas temperaturas.

Na usinagem com o eletrodo-ferramenta de grafite houve um comportamento com valores de microdureza acima da matriz na usinagem com os fluidos algodão, canola, mineral e querosene. Há exceção para os fluidos mamona e girassol que apresentaram valores de microdureza abaixo da matriz.

Os resultados obtidos para a microdureza da zona afetada pelo calor (ZAC) no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite são mostrados na Tab. 4.14 e na Fig. 4.27.

Tabela 4.14 - Valores da microdureza Vickers da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço rápido usinado no regime de desbaste com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

FLUIDOS	MICRODUREZA ZAC (HV)	
	COBRE	GRAFITE
MILHO	1152,2 ± 51,7	1158,4 ± 28,8
ALGODÃO	1133,6 ± 75,2	998,4 ± 31,1
CANOLA	1049,6 ± 34	1120,8 ± 73,3
MAMONA	1037,2 ± 48,1	1060,8 ± 58,9
GIRASSOL	1052,5 ± 31,2	1127,7 ± 80,1
MINERAL	862,5 ± 63,1	980,4 ± 57,7
QUEROSENE	1010,4 ± 53,9	1220,8 ± 57,7

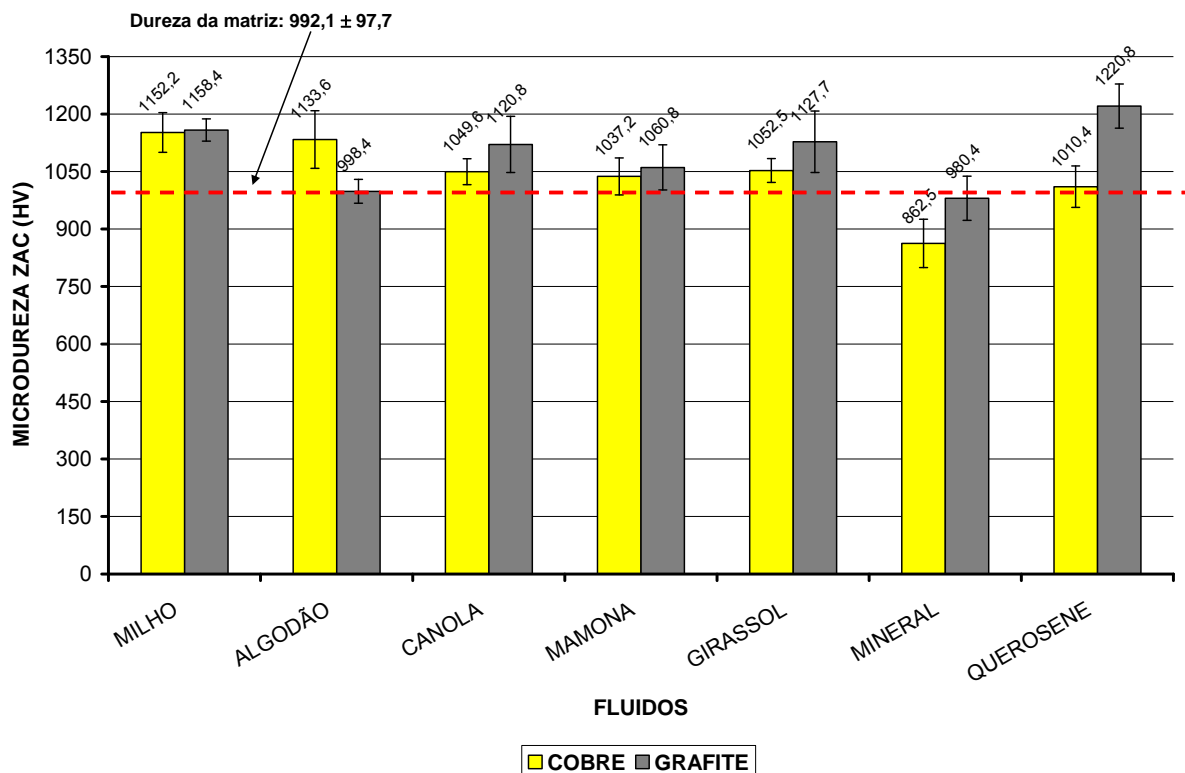


Figura 4.27 - Microdureza Vickers da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço rápido após processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de desbaste utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

Nota-se que os valores de microdureza para os eletrodos-ferramenta de cobre e grafite são maiores do que os da matriz, com exceção do fluido mineral. Na usinagem com o

eletrodo-ferramenta de cobre, observa-se que as durezas são ligeiramente menores do que o de grafite. O aumento da microdureza na ZAC com o eletrodo-ferramenta de grafite pode estar relacionado à difusão de carbono. O fluido mineral nesta situação comportou-se como melhor dissipador e refrigerou melhor evitando o resfriamento brusco.

Os resultados obtidos para a microdureza da camada refundida no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite são mostrados na Tab. 4.15 e na Fig. 4.28.

Tabela 4.15 - Valores da microdureza Vickers da camada refundida do aço rápido usinado no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

FLUIDOS	MICRODUREZA CAMADA REFUNDIDA (HV)	
	COBRE	GRAFITE
MILHO	666,2 ± 40,4	1073,4 ± 32,2
ALGODÃO	669,85 ± 20,2	838,6 ± 15,2
CANOLA	776,8 ± 47,8	944,0 ± 23,8
MAMONA	869,4 ± 59,2	731,0 ± 21,0
GIRASSOL	884,7 ± 67,5	933,1 ± 28,1
MINERAL	894,6 ± 53,9	894,0 ± 16,1
QUEROSENE	650,0 ± 39,2	886,8 ± 57,9

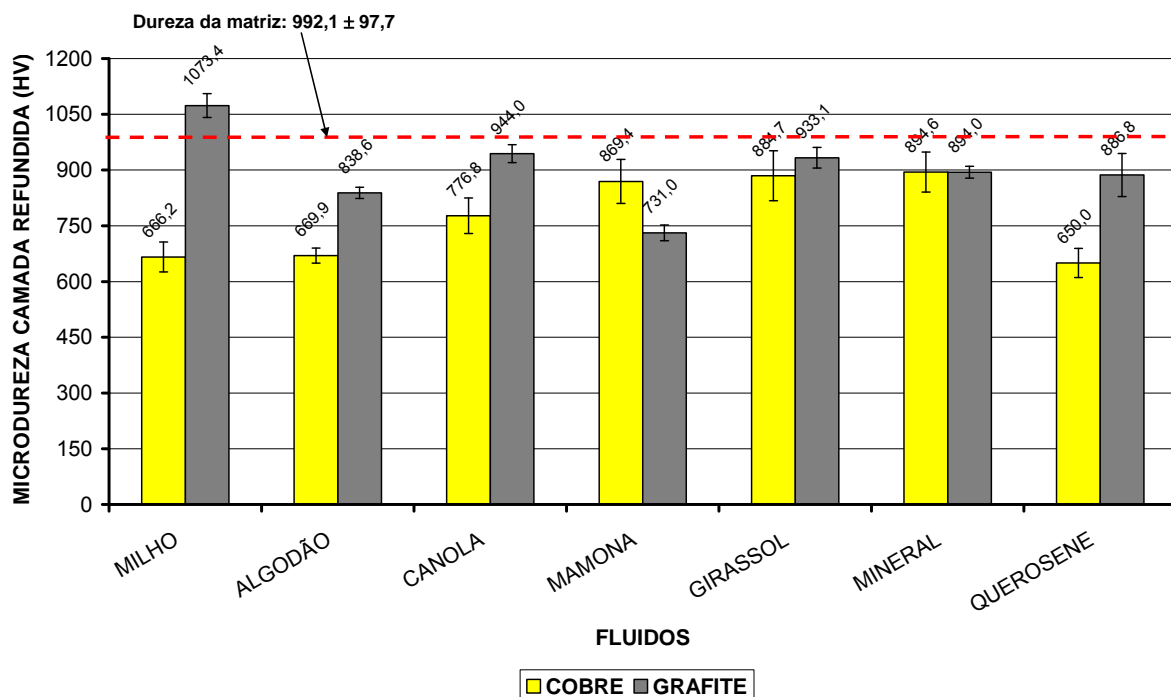


Figura 4.28 - Microdureza Vickers da camada refundida do aço rápido após processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de acabamento fino utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

O processo EDM induz, sistematicamente, a um aumento da dureza das camadas exteriores das superfícies usinadas (GHANEM *et al*, 2003). Cusanelli *et al* (2004) mostram que a camada refundida é duas vezes mais dura do que a matriz na usinagem do aço ferrítico W300 (aço ferramenta para trabalho a quente) com o eletrodo-ferramenta de cobre. Neste trabalho, observou-se que a usinagem com os eletrodos-ferramenta de cobre e grafite proporcionaram durezas menores do que a matriz, exceção para o fluido milho na usinagem com grafite. A explicação para esse fato pode estar relacionada à baixa taxa de refrigeração neste regime de usinagem, uma vez que os fluidos utilizados não estavam em circulação, o que causou um aquecimento do dielétrico, não havendo resfriamento brusco e sim um resfriamento mais lento da peça usinada. Segundo Lima (1997), na usinagem com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite de um aço rápido, em regime de superacabamento, não houve variação da dureza das camadas superiores com relação à matriz.

Os resultados obtidos para a microdureza da zona afetada pelo calor (ZAC) no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite são mostrados na Tab. 4.16 e na Fig. 4.29.

Tabela 4.16 - Valores da microdureza Vickers da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço rápido usinado no regime de acabamento fino com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

FLUIDOS	MICRODUREZA ZAC (HV)	
	COBRE	GRAFITE
MILHO	993,2 ± 70,6	1015,4 ± 45,9
ALGODÃO	1068,4 ± 48,2	1092,8 ± 42,5
CANOLA	941,5 ± 59,6	1067,8 ± 38,4
MAMONA	1093,8 ± 65,2	1076,8 ± 53,5
GIRASSOL	1088,6 ± 70,3	979,8 ± 35,7
MINERAL	1037,8 ± 29,0	1092,8 ± 41,0
QUEROSENE	1138,6 ± 42,6	1100,2 ± 61,1

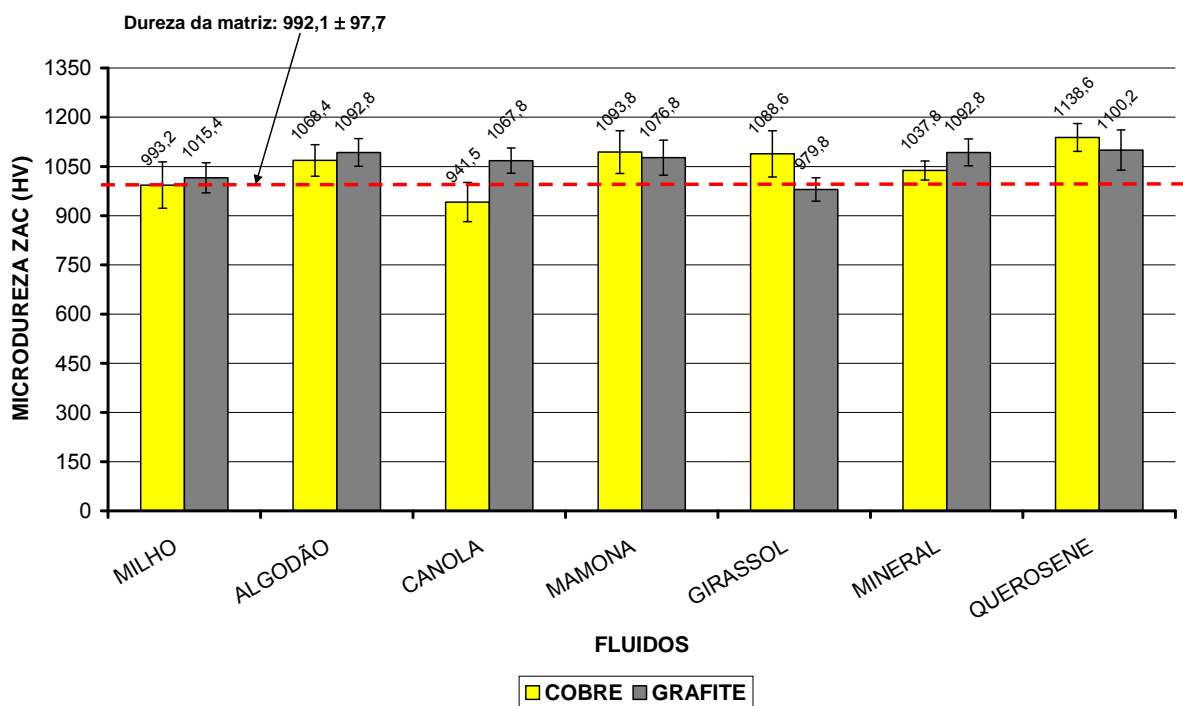


Figura 4.29 - Microdureza Vickers da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço rápido após processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) no regime de acabamento fino utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

Na ZAC não se observa diferença entre os eletrodos-ferramenta, mas as durezas são ligeiramente maiores do que a da matriz. Ekmekçi *et al* (2002) mostraram, em seu trabalho na usinagem por EDM, com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite de um aço microligado que a dureza obtida através do processo diminui da superfície até a matriz. Isso também é confirmado na literatura, o processo de usinagem por descargas elétricas (EDM)

gera camadas distintas com dureza maiores do que a dureza da matriz. Percebe-se que na usinagem com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite o mesmo não ocorreu para todos os fluidos. Na usinagem com o eletrodo-ferramenta de cobre, com a exceção na usinagem com o fluido algodão, todos os materiais usinados com os outros fluidos apresentaram maior dureza na ZAC do que na camada refundida. Esse fato se repetiu para os fluidos algodão, canola e os fluidos derivado do petróleo na usinagem com eletrodo-ferramenta de grafite. Com relação ao aumento da dureza na usinagem com eletrodo-ferramenta de grafite, pode ter havido difusão de carbono do eletrodo-ferramenta para a peça usinada.

CAPÍTULO V

Conclusão

A partir dos resultados obtidos com a usinagem por descargas elétricas por penetração em regime de acabamento fino e desbaste de um aço rápido usando eletrodos-ferramenta de cobre e grafite, além de diferentes fluidos dielétricos vegetais e dois fluidos derivados de petróleo, pode concluir que existe uma diferença significativa para o desempenho dos fluidos em relação aos regimes de usinagem empregados.

Nesse trabalho pode-se verificar que os fluidos dielétricos à base de óleos vegetais precisam ser mais investigados para que possam substituir com vantagens os derivados de petróleo. Estes fluidos vegetais utilizados neste trabalho não foram produzidos com a finalidade de uso para no processo de usinagem por descargas elétricas (EDM) e mesmo assim obtiveram bom desempenho no regime de desbaste. No regime de acabamento fino, a viscosidade é uma das características físico-químicas que precisam ser melhor analisadas.

No regime de desbaste, pode-se concluir que:

- em termos de TRM, os fluidos vegetais são vantajosos em relação aos derivados de petróleo, tanto na usinagem com ferramentas de cobre quanto de grafite. Destaque especial para a mamona na usinagem com o eletrodo-ferramenta de cobre.
- em termos de desgaste dos eletrodos-ferramenta de cobre e grafite, os fluidos vegetais apresentaram bons resultados mesmo com valores de TRM acima dos obtidos com os derivados de petróleo. Novamente o destaque para a mamona que apresentou baixo desgaste.

- a morfologia das superfícies geradas na usinagem com os fluidos vegetais apresentou grande semelhança com a das superfícies usinadas pelos derivados de petróleo.
- a rugosidade e a topografia das superfícies geradas na usinagem com os fluidos vegetais são similares às obtidas com os derivados de petróleo. Fica evidenciado que em regime de desbaste as características físico-químicas dos diferentes fluidos não têm influência sobre a rugosidade.
- o milho apresentou melhor resultado na densidade de microtrincas com o eletrodo-ferramenta de cobre e o girassol com o de grafite. O mesmo não acontece no comprimento de microtrincas, sendo o girassol o que apresentou as menores microtrincas com o eletrodo-ferramenta de cobre e o querosene, as menores microtrincas com o de grafite.
- os fluidos vegetais apresentaram bons resultados na espessura da camada refundida na usinagem com o eletrodo-ferramenta de cobre, enquanto que os derivados do petróleo, com o de grafite.
- os fluidos derivados de petróleo apresentaram os melhores resultados na espessura da ZAC, tanto com o eletrodo-ferramenta de cobre quanto o de grafite.
- em termos de microdureza, os fluidos vegetais apresentaram comportamento próximo dos derivados de petróleo.
- A tabela 4.17 apresenta um resumo dos resultados no regime de desbaste.

Tabela 4.17 - Resultados obtidos no regime de desgaste

FLUIDOS	TRM (mm ³ /min)		DESGASTE VOLUMÉTRICO (%)		RUGOSIDADE Sa (μm)		QUANTIDADE DE TRINCAS		TRINCAS POR mm		COMPRIMENTO		ESPESSURA		ESPESSURA		MICRODUREZA (HV)			
											TRINCAS (μm)		CAMADA REF (μm)		ZAC (μm)		CAMADA REFUNDIDA		ZAC	
	Cu	C	Cu	C	Cu	C	Cu	C	Cu	C	Cu	C	Cu	C	Cu	C	Cu	C	Cu	C
MILHO	158,5 ± 1,4	131,9 ± 1,6	1,8	1,7	19,7	16,9	5	10	0,9	1,8	27 ± 11	38 ± 18	41,0 ± 18,2	38,4 ± 19,7	26 ± 10,5	27,5 ± 7,9	713,5 ± 21,2	957,1 ± 28,6	1152,2 ± 51,7	1158,4 ± 28,8
ALGODÃO	139,0 ± 1,0	108,3 ± 0,9	0,3	0,7	16,6	24,1	14	11	2,4	1,9	43 ± 39	32 ± 19	34,8 ± 18,6	42,5 ± 27,4	39 ± 12,7	41 ± 5,6	746,2 ± 50,4	1102 ± 79,9	1133,6 ± 75,2	998,4 ± 31,1
CANOLA	132,7 ± 3,0	117,8 ± 1,1	0,3	0,3	22,4	22,2	7	20	1,2	3,5	46 ± 20	47 ± 45	66,8 ± 21,0	46,8 ± 14,0	36,6 ± 12,0	40,4 ± 9,1	1261,8 ± 63,6	1256,2 ± 35,3	1049,6 ± 34	1120,8 ± 73,3
MAMONA	180,9 ± 2,7	128,4 ± 1,9	0,3	0,7	20,2	20,5	13	11	2,3	1,9	29 ± 24	24 ± 26	42,6 ± 26,4	45,6 ± 17,1	42,6 ± 13,2	48,9 ± 11	755,2 ± 75,9	952,1 ± 75,6	1037,2 ± 48,1	1060,8 ± 58,9
GIRASSOL	158,8 ± 1,4	138,3 ± 3,0	1,3	1,3	19,7	20,3	9	7	1,6	1,2	28 ± 17	22 ± 16	41,4 ± 17,2	33,6 ± 13,2	35,6 ± 11,3	45,6 ± 21,5	756,4 ± 50,5	831 ± 12,1	1052,5 ± 31,2	1127,7 ± 80,1
MINERAL	152,9 ± 2,6	96,1 ± 1,7	0,3	0,7	18,4	19,3	13	18	2,3	2,7	34 ± 37	35 ± 28	46,6 ± 24,8	33,2 ± 22,4	29,5 ± 3,5	16 ± 3,5	1114,6 ± 107	1098,4 ± 86,2	862,5 ± 63,1	980,4 ± 57,7
QUE	164,9 ± 0,8	108,9 ± 2,0	1,3	0,7	11,5	13,7	11	9	2,0	1,7	24 ± 12	22 ± 11	47,7 ± 20,4	24,4 ± 18,9	24,6 ± 4,9	19,2 ± 3,8	939,7 ± 73,9	1091,3 ± 145,9	1010,4 ± 53,9	1220,8 ± 57,7

No regime de acabamento fino, pode-se concluir que:

- em termos de TRM, os fluidos vegetais são desvantajosos em relação aos derivados de petróleo, tanto na usinagem com o eletrodo-ferramenta de cobre quanto de grafite.
- em termos de desgaste dos eletrodos-ferramenta de cobre e grafite, não se pode afirmar que os fluidos vegetais são melhores do que os derivados de petróleo, uma vez que estes apresentaram baixo desempenho em termos de TRM.
- a morfologia das superfícies geradas na usinagem com os fluidos vegetais apresentaram grande semelhança com as usinadas pelos derivados de petróleo.
- a rugosidade e a topografia das superfícies geradas na usinagem com os fluidos vegetais são similares às obtidas com os derivados de petróleo.
- os fluidos derivados de petróleo apresentaram desempenho superior aos vegetais no quesito densidade e comprimento de microtrincas, tanto com o eletrodo-ferramenta de cobre quanto com o de grafite. A única exceção foi para o girassol, na usinagem com o eletrodo-ferramenta de cobre que não obteve microtrincas.
- o milho apresentou uma pequena vantagem dos derivados de petróleo em relação à camada refundida tanto na usinagem com o eletrodo-ferramenta de cobre quanto na usinagem com eletrodo-ferramenta de grafite.
- a ZAC gerada na usinagem com milho, apresentou menores valores utilizando o eletrodo-ferramenta de cobre, enquanto o querosene apresentou o melhor resultado na usinagem com o de grafite.
- em termos de microdureza, os fluidos vegetais apresentam comportamentos muito próximos dos derivados de petróleo.
- A tabela 4.18 apresenta um resumo dos resultados no regime de acabamento fino.

Tabela 4.18 - Resultados obtidos no regime de acabamento fino

FLUIDOS	TRM (mm ³ /min)		DESGASTE VOLUMÉTRICO (%)		RUGOSIDADE Sa (μm)		QUANTIDADE DE TRINCAS		TRINCAS POR mm		COMPRIMENTO		ESPESSURA		ESPESSURA		MICRODUREZA (HV)			
											TRINCAS (μm)		CAMADA REF (μm)		ZAC (μm)		CAMADA REFUNDIDA		ZAC	
	Cu	C	Cu	C	Cu	C	Cu	C	Cu	C	Cu	C	Cu	C	Cu	C	Cu	C	Cu	C
MILHO	2,6	3,1	4,5	15,4	2,5	4,5	1	11	0,2	2,1	43	41	5,3	7,4	4,7	7,8	666,2	1073,4	993,2	1015,4
	± 0,1	± 0,0									0	± 24	± 2,5	± 3,0	± 2,5	± 3,2	± 40,4	± 32,2	± 32,2	± 45,9
ALGODÃO	1,6	4,1	5,9	15,0	3,1	3,2	10	2	1,9	0,4	35	21	24	10,3	40,6	7	669,85	838,6	1068,4	1092,8
	± 0,0	± 0,1									± 31	± 11	± 13,9	± 3,1	± 12,7	± 3,3	± 20,2	± 15,2	± 48,2	± 42,5
CANOLA	2,3	4,2	11,9	19,0	2,6	3,2	8	10	1,6	1,9	78	43	9,4	13,2	23,3	40,7	776,8	944	941,5	1067,8
	± 0,1	± 0,1									± 81	± 29	± 4,3	± 8,8	± 22,5	± 11,9	± 47,8	± 23,8	± 59,6	± 38,4
MAMONA	2,7	2,5	7,0	9,5	3,1	3,4	7	14	1,3	2,6	36	85	13,2	27,2	12	38,2	869,4	731	1093,8	1076,8
	± 0,1	± 0,1									± 21	± 82	± 10	± 25,3	± 3,5	± 37	± 59,2	± 21	± 65,2	± 53,5
GIRASSOL	2,5	4	15,1	19,6	2,7	2,9	0	14	0	2,6	0	29	7,2	17,4	9,3	19,2	884,7	933,1	1088,6	979,8
	± 0,1	± 0,2										± 25	± 1,2	± 10	± 4,7	± 19	± 67,5	± 28,1	± 70,3	± 35,7
MINERAL	9,7	9,5	18,0	18,8	2,8	3,3	0	0	0	0	0	0	9	9,3	5,8	8	894,6	894	1037,8	1092,8
	± 0,4	± 0,1											± 4,2	± 6,5	± 2,6	± 5,6	± 53,9	± 16,1	± 29	± 41
QUE	11,1	14,6	18,2	18,7	2,9	3,5	0	0	0	0	0	0	7,8	10,7	9,4	5,7	650	886,8	1138,6	1100,2
	± 0,2	± 0,3											± 2,4	± 5,6	± 2,8	± 1,5	± 39,2	± 57,9	± 42,6	± 61,1

Pode-se concluir que os fluidos vegetais podem ser utilizados como fluidos dielétricos, principalmente no regime de desbaste. Existe a necessidade de que se realizem mais pesquisas a fim de se caracterizar esses fluidos para aplicações em regime de acabamento fino.

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se para futuros trabalhos mais pesquisas nos seguintes tópicos:

- a análise de durabilidade dos fluidos dielétricos à base de óleos vegetais e dos derivados de petróleo;
- a análise do desgaste e contaminação na usinagem com eletrodo-ferramenta de grafite;
- a utilização dos fluidos dielétricos à base de óleos vegetais em regimes de acabamento;
- a análise de microtrincas com o uso de fluidos dielétricos à base de óleos vegetais em regime de desbaste;
- a análise de transformações metalúrgicas com o uso de fluidos vegetais.
- repetir os ensaios com os fluidos em circulação.

REFERÊNCIAS

AMORIM, F.L.; WEINGAERTNER, W.L. The influence of generator actuation mode and process parameters on the performance of finish EDM of a tool steel, **Journal of Materials Processing Technology**, n.166, p. 411-416, 2005.

AMORIM, F. L. **Tecnologia de eletroerosão por penetração da liga de alumínio AMP 8000 e da liga de cobre CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos**, 2002. 1 v. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ARANTES, L. J. **Avaliação do desempenho de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas**, 2001. 1 v. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ARANTES, L. J. Estudo da influência da geometria e material da ferramenta na taxa de remoção de material no processo de usinagem por descargas elétricas, **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, v. 448, n. 5, p. 52-57, 2003.

ARANTES, L. J.; RASLAN, A.A. Case study for conventional and vegetal dielectric fluids influence on EDM processes, CIRP, **Journal of Manufacturing Systems**, V. 35, n. 5, 2006.

ASM Handbook, Properties and Selection: iron steels and high performance alloys. ASM International, **The Materials Information Company**, V. 1, p. 1765 - 1827, 1990.

ASM Handbook, Properties and Selection: nonferrous alloys and special-purpose materials. ASM International, **The Materials Information Company**, V. 2, p. 759 - 926, 1990.

BENEDICT, G. F. **Nontraditional Manufacturing Processes**. New York: Marcel Dekker, p. 207-246, 1987.

CHE HARON, C. H. *et al*, Copper and graphite electrodes performance in electrical-discharge machining of XW42 tool steel, **Journal of Materials Processing Technology**, p. 1-6, 2007.

CHEN, Y.; MAHDAVIAN S. M., Parametric study into erosion wear in a computer numerical controlled electro-discharge machining process, **Wear**, V.236, p.350–354,1999.

CIMM, CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. Informações: Material Didático: Materiais: Aços Ferramenta: Aços rápidos, identificados pelas letras T e M. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/cimm/iframe/?pagina=/cimm/construtordepaginas/htm/3_24_10247.htm >. Acesso em: 15 dez 2007.

COSTA BRASIL, J. F.; ARANTES, L. J.; RASLAN, A. A. Uso de fluidos dielétricos à base de óleos vegetais na usinagem por descargas elétricas. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 480, p. 122-131, 2006.

CUSANELLI G. *et al*, Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique. **Journal of Materials Processing Technology**, n.149, p. 289–295, 2004.

EKMEKÇI B. *et al*, Metallurgical properties of electric discharge machined surfaces In: **Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis**, 6, 2002, Istanbul. Proceedings of ESDA2002, Istanbul: ASME, 2002, p. 1-7.

EVERTZ S.; DOTT W.; EISENTRAEGER, A. Electrical discharge machining: Occupational hygienic characterization using emission-based monitoring. **International Journal Hygiene Environmental Health** v.209, p. 423–434, 2006.

FERNANDES, L. A. **Efeito da adição de pó de carboneto de silício nos fluidos dielétricos sobre o desempenho da usinagem por descargas elétricas do aço-rápido ABNT M2**. 1999. 1 v. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FIELD, M.; KAHLES, J. F.; KOSTER, W. P. **Surface Finish and Surface Integrity**. 1989. Metcut Research Associates Inc., Metals handbook – 9 ed: Machining, v.16, p. 19-36.

GHANEM, F.; BRAHAM, C.; SIDHOM, H. Influence of steel type on electrical discharge machined surface integrity. **Journal of Materials Processing Technology**. n. 142, p.163–173.

GOH, C. L.; HO, S. F. Contact dermatitis from dielectric fluids in electrodischarge machining. **Contact Dermatitis**. v.28, p. 134-138, 1993.

GUITRAU, E.B., **The EDM Handbook**, Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 1997, 306 p.

GUU, Y.H.; HOCHENG, H.; CHOU, C.Y.;DENG, C.S. Effect of electrical discharge machining on surface characteristics and machining damage of AISI D2 tool steel. **Material Science and Engineering A358**, p. 37 – 43, 2003.

HO K.H., NEWMAN S.T. State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM). **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 43, p. 1287–1300, 2003.

INFOMET. Handbook: Aços e ligas: Aços-ferramenta: Definição. Disponível em:<<http://www.infomet.com.br/index.php>>, Acesso em: 05 abr 2007.

INTECH EDM. A guide to understanding and selecting edm dielectric fluids. Disponível em: <<http://www.intech-edm.com/newsroom/references.asp>>, Acesso em: 01 abr 2007.

JESWANI M.L., Roughness and wear characteristics of spark-eroded surfaces, **Wear**, v.51, p. 227-236, 1978.

KRUTH, J.P. *et al.* Study of the white layer of a surface machined by die-sinking electro-discharge machining. **Annals of the CIRP**. v. 44, n. 1, 1995.

LEÃO, F. N.; PASHBY I. R. A review on the use environmentally-friendly dielectric fluids in electrical discharge machining. **Journal of Materials Processing Technology**. v.149, p. 341-346, 2004.

LEE, H. T.; TAI, T. Y. Relationship between EDM parameters and surface crack formation. **Journal of Materials Processing Technology**. v.142, p. 676–683, 2003.

LEGGAT, P.; SMITH, D. R. Dermatitis and aircrew. **Contact Dermatitis**. v. 54, p.1–4, 2006.

LIM, L. C. *et al.* Solidification microstructure of eletrodischarge machined surfaces of tool steels. **Materials Science and Technology**. v. 7, p. 239-248, 1991.

LIMA, F. E. **Rugosidade e integridade superficial do aço-rápido ABNT M2 após usinagem por descargas elétricas**. 1997. 1 v. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MACHINING DATA HANDBOOK, MACHINABILITY DATA CENTER. Disponível em: <www.unl.edu/nmrc/Diesinking/surfaceint/surface.htm>, Acesso em: 10 Nov 2006.

McGEOUGH, J. A. **Advanced Methods of Machining**. London: Chapman and Hall, 1988. p.128-152.

McGEOUGH, J. A.; RASMUSSEN, H. A theoretical model of electrodischarge texturing. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 68, p. 172-178, 1997.

MUNOZ, A. A.; SHENG, P. An analytical approach for determining the environmental impact of machining processes, **Journal of Materials Processing Technology**. v. 53, p. 736-758, 1995.

RAMASAWMY, H.; BLUNT, L.; RAJURKAR, K.P. Investigation of the relationship between the white layer thickness and 3D surface texture parameters in the die sinking EDM process. **Precision Engineering**. v. 29, p. 479–490, 2005.

REHBEIN, W.; SCHULZE, H.-P. ; MECKE, K.; WOLLENBERG, G.; STORR, M. Influence of selected groups of additives on breakdown in EDM sinking. **Journal of Materials Processing Technology**, v.149, p. 58–64, 2004.

RIBÓ, J. A certificação do sistema de gerenciamento ambiental na comunidade europeia. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 2, 1998, PUCRS, Porto Alegre

RODRIGUES, J. R. P. **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**. 1999. 1 v. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PIRES, M.S.T.; RASLAN, A. A. Modificações Superficiais em Aços Usinados por Eletroerosão na presença de Carbetos, 2002, Universidade Federal de Uberlândia, 2002.

SINGH, S.; MAHESHWARI, S.; PANDEY, P.C. Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials. **Journal of Materials Processing Technology**. v.149, p. 272–277, 2004.

TAN, X. C.; LIU, F.; CAO, H. J.; ZHANG, H. A decision-making framework model of cutting selection for green manufacturing and a case study. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 129, p. 467-470, 2002.

WONG, Y. S.; LIM, L. C.; LEE, L. C. Effects of flushing on electro-discharge machined surfaces. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 48, p. 299-305, 1995.