

ERNANE RODRIGUES DA SILVA

**OTIMIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE
INFLUÊNCIA DO PROCESSO AJEDM**



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

2012

ERNANE RODRIGUES DA SILVA

**OTIMIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA
DO PROCESSO AJEDM**

Tese apresentada ao programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOCTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e
Processo de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Alberto Arnaldo Raslan

UBERLÂNDIA – MG

2012

Para minha esposa, Vânia Auxiliadora Morais Rodrigues,
minha mãe, Nilza Rodrigues da Silva,
meus irmãos, Luciano Lopes Rodrigues, Geraldo Magela Rodrigues,
Eliane Rodrigues da Silva e Edson Rodrigues da Silva
e sobrinhos, Juliana, Bárbara, Isabella, Francielle, Philippe e João Pedro.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alberto Arnaldo Raslan, pela confiança, boas idéias e sugestões na solução dos problemas, análise dos resultados e, ainda, a amizade.

À Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e à Coordenação do Curso de Pós Graduação (CPGEM) pela oportunidade de realizar este trabalho.

À Professora Dra. Henara Lillian Costa Murray, Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), pelas sugestões para o aperfeiçoamento da pesquisa.

Aos Professores Drs. José Daniel Biasoli de Mello e Washington Martins da Silva Júnior, Coordenadores do LTM, por viabilizarem o acesso ao mesmo.

Aos Professores Drs. Éder Silva Costa (CEFET-MG) e Marcelo Braga dos Santos (FEMEC/UFU), pelas sugestões quando das suas participações na minha banca de exame de qualificação.

Ao grande amigo Rogério Felício dos Santos, pela ajuda incondicional na preparação e realização dos testes, avaliação dos resultados e companheirismo nos momentos difíceis.

A Ângela Maria da Silva Andrade, técnica do LTM, pela amizade e acolhimento, competência com que tratou minhas amostras e o compartilhamento de sua experiência na análise dos resultados.

Ao Professor Dr. Sinésio Domingues Franco, pelo acesso ao Laboratório de Tecnologia em Desgaste e Atrito (LTAD/FEMEC/UFU) e sugestões e, ainda, ao técnico Flávio Alves do Santos pela ajuda.

Ao professor Dr. Francisco Paulo Lépure Neto pela oportunidade de participar das aulas ministradas e aos professores do programa.

Ao Dr. Luciano José Arantes, pela participação na banca de defesa e sugestões.

Ao Prof. Dr. Américo Scotti (LAPROSOLDA/FEMEC/UFU) por viabilizar a utilização da câmera fotográfica de alta velocidade e ao doutorando Marcus Vinicius Ribeiro Machado pela aquisição das imagens.

Ao professor Dr. Enio Pedone Bandarra Filho (LEST/FEMEC), pelos nanotubos de carbono.

Aos Profs. Drs. Wisley Falco Sales (PUC-MG) e Sandro Cardoso Santos (CEFET-MG), pela confiança em mim depositada.

A Kelly Rúbia Costa e Lucimara Esther de Oliveira, secretárias do CPGEM/UFU, pela atenção e esclarecimentos de dúvidas sobre o curso.

À dona Terezinha Rocha Raslan e Luciana Pereira Saldanha Marinho, pelo acolhimento.

Aos amigos Fernando Martins Ferreira, Marcio Ferreira Gontijo, Abraão Salucci Saloto, Luciano de Oliveira Castro Lara e Jakeline Guimarães Parreira, estudantes do programa, pelas valiosas colaborações e disposição durante a obtenção dos créditos.

Aos amigos do LTM, José Lúcio Gonçalves Júnior, André Rezende de Figueiredo Oliveira e Mário Martins de Oliveira Júnior pelo apoio; Lucas Boaventura Fonseca de Sousa, Pedro Henrique Cidreiro e Vinícius Carvalho Teles por ajuda na execução dos testes e a secretária Sra. Eunice Helena Nogueira.

Ao técnico do laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET-MG, Bruno Cordeiro Silva, pelas imagens de MEV e análises de EDS e Fluorescência de raio-X.

Ao amigo Hélio Antônio da Silva, pelo incentivo.

Aos amigos Adilson Batista da Silva e Maria Aparecida de São Geraldo Moraes, pelo apoio.

Aos coordenadores, professores e funcionários do curso técnico de mecânica do CEFET-MG que me ajudaram.

Aos técnicos do laboratório de Engenharia Mecânica e Mecatrônica da Pontifícia Universidade Católica, PUC Minas, Carlos Eduardo do Santos, Marceliny Nardi Torrecília, Klaus Higor dos Santos Silva e Germano Batista de Souza.

À CBMM – Cia. Mineira de Mineração e Metalurgia, pelo nióbio.

Ao CEFET-MG, por viabilizar minha licença para capacitação.

À FAPEMIG, pela liberação de recursos do projeto TEC APQ 01481/09.

À CAPES pela bolsa de estudos.

À minha família.

A Deus, por colocar no meu caminho essas pessoas boas que me ajudaram a transpor os obstáculos que surgiam a cada etapa dessa jornada.

Silva, E. R. **Otimização e Avaliação dos Parâmetros de Influência do Processo AJEDM**. 2012, 106f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

Resumo

A usinagem com o uso de descargas elétricas por penetração caracteriza-se pelo baixo rendimento em comparação com os métodos tradicionais de usinagem. Com o desenvolvimento do processo misto de Usinagem por Descargas Elétricas com Jato Abrasivo (AJEDM), verificou-se que ocorreu um incremento significativo na Taxa de Remoção de Material (TRM). O trabalho tem por objetivo otimizar e avaliar a influência de alguns parâmetros no AJEDM, a saber: pressão do jato erosivo, tipo e granulometria do abrasivo e material do eletrodo. Uma bomba foi adaptada ao equipamento de EDM para permitir a aplicação de pressões de até 240 bar. Como abrasivos, foram usados Al_2O_3 e SiC de granulometrias variadas e B_4C de 320 mesh. Diferentes materiais foram empregados na confecção de eletrodos, além dos tradicionais cobre e grafite. Observou-se que o aumento na pressão do jato erosivo provoca um incremento da TRM. Em contrapartida, há um desgaste mais acentuado dos eletrodos. O tipo de abrasivo não exerce influência. Contudo, o aumento na granulometria provoca aumento da TRM. Pela alta condutividade elétrica do cobre e alto ponto de fusão da grafite, eles foram os materiais que apresentaram um melhor desempenho como eletrodos. Com os resultados obtidos, conclui-se que o processo pode ser empregado em situações em que o desgaste do eletrodo possa ser tolerado.

Palavras chave: Desgaste Erosivo; AJEDM; Usinagem por Descargas Elétricas; Água Deionizada; Abrasivos.

Silva, E. R. **Optimization and Evaluation of Parameters of Influencing of AJEDM Process**. 2012. 106f. Doctoral Thesis. Federal University of Uberlândia. Uberlândia.

ABSTRACT

Die-sinking electrical discharge machining is characterized by low efficiency when compared to traditional methods of machining. There is significant improvement in the Material Removal Rate (MRR) when abrasive particles are added to the process AJEDM (Abrasive Jet Electrical Discharge Machining). This study aims to evaluate the influence of some parameters in the AJEDM process, namely: water pressure, type and abrasive particle size and the electrode material. A pump was adapted to the EDM equipment allowing to apply pressures up to 240 bar. Al_2O_3 and SiC in different particle sizes were used as abrasives and B_4C with size of 320 mesh. Besides copper and graphite, other materials were used to the manufacture of electrodes. It was observed that the increase in water pressure causes an increment of MRR. On the other hand, there is a more pronounced wear of the electrodes, but the type of abrasive does not effect wear. However, particle size increase causes an increase in MRR. Due to high electrical conductivity of copper and high melting point of graphite, they were the best materials for electrodes. With the results obtained, the conclusion is that the AJEDM process may be applied in situations where some electrode wear can be tolerated.

Key words: Erosive wear; Abrasive Jet EDM; Electrical Discharge Machining; Deionized Water; Abrasives.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Fase da ignição em (a) e evolução da corrente e da tensão em (b)..... | 07 |
| Figura 2.2 – Formação de elétrons secundários em (a) e evolução da corrente e tensão em (b)..... | 07 |
| Figura 2.3 – Formação do canal de plasma em (a) e evolução da corrente e da tensão em (b)..... | 08 |
| Figura 2.4 – Ruptura do canal de plasma em (a) e evolução da corrente e da tensão em (b)..... | 09 |
| Figura 2.5 – Evolução da tensão e da corrente elétrica durante a descarga, tempos de duração dos mesmos e parâmetros elétricos..... | 11 |
| Figura 2.6 – Representação esquemática dos tempos de erosão, do intervalo e a retração..... | 11 |
| Figura 2.7 – Metodos de limpeza da fenda de trabalho..... | 15 |
| Figura 2.8 – Exemplo de superfície usinada por EDM..... | 17 |
| Figura 2.9 – Seção transversal de uma superfície produzida por EDM..... | 17 |
| Figura 2.10 – Imagem de MEV de micro-partículas formadas na usinagem por EDM..... | 18 |
| Figura 2.11 – Micro-partículas aderidas na superfície produzida pelo processo de EDM. | 18 |
| Figura 2.12 – Imagens da descarga elétrica com óleo mineral obtidas com câmera fotográfica de alta velocidade. Sem adição de pó em (a), com pó de alumínio em (b) e com pó de silício em (c)..... | 20 |
| Figura 2.13 – Erosão pelo impacto de partícula sólida..... | 20 |
| Figura 2.14 – Princípio do processo de Usinagem por Jato Abrasivo..... | 22 |
| Figura 2.15 – Componentes do sistema de Usinagem por Jato Abrasivo..... | 22 |
| Figura 2.16 – Esquema de montagem do processo WJM..... | 23 |
| Figura 2.17 – Mistura das partículas abrasivas com o jato de água na câmara de mistura de um bico <i>venturi</i> usado no AWJM..... | 24 |
| Figura 2.18 – Processo de erosão pelo impacto de partículas sólidas contra a superfície de um material dútil..... | 25 |
| Figura 2.19 – Processo de erosão pelo impacto de partículas sólidas contra a superfície de um material frágil. Formação de fendas em (a) e remoção de material em (b)..... | 25 |
| Figura 2.20 – Efeito do ângulo de incidência (ou de ataque) das partículas contra a superfície do material em relação à taxa de erosão..... | 26 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.21 – TRM do processo EDM convencional e híbrido AJEDM usando como fluidos dielétricos óleo mineral, querosene e água deionizada..... | 28 |
| Figura 2.22 – Princípio do processo de usinagem híbrido AJEDM..... | 29 |
| Figura 3.1 – Cronograma esquemático das etapas para o procedimento experimental. | 30 |
| Figura 3.2 – Cuba auxiliar em aço inoxidável AISI 304 instalada no tanque de trabalho da máquina EDM..... | 31 |
| Figura 3.3 – Alimentador de abrasivo, acessório da máquina hidrojateadora..... | 32 |
| Figura 3.4 – Portas-amostra fixado no fundo da cuba auxiliar e suporte para posicionamento do bico <i>venturi</i> e eletrodo-ferramenta..... | 33 |
| Figura 3.5 – Adaptações no cabeçote da máquina EDM..... | 34 |
| Figura 3.6 – Desenho esquemático do processo de usinagem híbrido AJEDM utilizando o bico <i>venturi</i> | 35 |
| Figura 3.7 – Eletrodos-ferramenta de cobre usados na avaliação da variação da geometria | 37 |
| Figura 3.8 – Montagem do eletrodo-ferramenta com chanfro de ângulo 30° na extremidade..... | 38 |
| Figura 3.9 – Montagem da câmera fotográfica de alta velocidade na frente da máquina de EDM para aquisição de imagens..... | 42 |
| Figura 3.10 – Posicionamento do tubo para auxiliar na coleta das partículas abrasivas e das micro-partículas erodidas..... | 43 |
| Figura 3.11 – Deslocamento da ferramenta contra a superfície da peça durante o processo AJEDM. No início da usinagem (a) e quando a ferramenta começa a penetrar na peça (b)..... | 43 |
| Figura 3.12 – Eletrodo-ferramenta fixado na pinça e peça de ligação..... | 44 |
| Figura 3.13 – Desgaste erosivo provocado pelo jato abrasivo no eletrodo ferramenta..... | 45 |
| Figura 3.14 – Entupimento do orifício da entrada de abrasivo na câmara de mistura do bico <i>venturi</i> provocado pelo excesso de partículas..... | 45 |
| Figura 3.15 – Amostra preparada para análise por meio de microscopia ótica..... | 46 |
| Figura 4.1 – TRM para diferentes materiais usados como eletrodo ferramenta..... | 47 |
| Figura 4.2 – TD para diferentes materiais usados como eletrodo ferramenta..... | 48 |
| Figura 4.3 – DVR para diferentes materiais usados como eletrodo ferramenta..... | 48 |
| Figura 4.4 – TRM para avaliação das condições de aplicação do fluido dielétrico e efeito da variação da pressão..... | 50 |
| Figura 4.5 – TD para avaliação das condições de aplicação do fluido dielétrico e efeito da variação da pressão..... | 52 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.6 – Imagem de MEV da superfície da ferramenta de cobre usada na usinagem com água deionizada na pressão de 240 bar com SiC de 600 mesh. Destaque para região onde uma partícula abrasiva encontra-se incrustada..... | 53 |
| Figura 4.7 – Destaque da partícula abrasiva de SiC (600 mesh) incrustada na superfície da ferramenta de cobre. Usinagem com água deionizada na pressão de 240 bar..... | 54 |
| Figura 4.8 – Gráfico do espectro de EDS da imagem da Figura 4.7..... | 54 |
| Figura 4.9 – Imagem de MEV da superfície usinada com SiC de 600 mesh (a) e imagem do espectro de EDS pontual na partícula de SiC incrustada na superfície (b)..... | 55 |
| Figura 4.10 – Imagem de MEV da superfície usinada com Al_2O_3 de 600 mesh (a) e imagem do espectro de EDS pontual na partícula de Al_2O_3 incrustada na superfície (b)..... | 55 |
| Figura 4.11 – DVR para avaliação das condições de aplicação do fluido dielétrico e efeito da variação da pressão..... | 56 |
| Figura 4.12 – Cavidade usinada produzida no aço AISI M2 pelo processo com SiC de 600 mesh na pressão de 240 bar..... | 57 |
| Figura 4.13 – Imagem de MEV de trecho da periferia externa da cavidade usinada pelo processo com pressão de 240 bar..... | 57 |
| Figura 4.14 – Imagem de MEV de trecho da periferia interna da cavidade usinada pelo processo com pressão de 240 bar..... | 58 |
| Figura 4.15 – Espessura da camada refundida [μm] para avaliação das condições de aplicação do fluido dielétrico e efeito da variação da pressão..... | 59 |
| Figura 4.16 – Imagens de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com água deionizada sem pressão. Camada refundida em destaques..... | 60 |
| Figura 4.17 – Imagens de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com água pressurizada a 240 bar, sem abrasivo. Camada refundida em destaques..... | 60 |
| Figura 4.18 – Imagens de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com pressão de 80 bar com SiC de 600 mesh. Camada refundida em destaques..... | 61 |
| Figura 4.19 – Imagens de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com pressão de 170 bar com SiC de 600 mesh. Camada refundida em destaques..... | 62 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.20 – Imagem de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com pressão de 240 bar com SiC de 600 mesh. Camada refundida em destaques..... | 62 |
| Figura 4.21 – Imagens de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com óleo mineral. Camada refundida em destaques..... | 63 |
| Figura 4.22 – Quantidade de micro-trincas por comprimento em μm , para avaliação das condições de aplicação do fluido dielétrico e efeito da variação da pressão..... | 64 |
| Figura 4.23 – Comprimento de micro-trincas para avaliação das condições de aplicação do fluido dielétrico e efeito da variação da pressão..... | 65 |
| Figura 4.24 – Imagens de MEV das superfícies usinadas com água deionizada sem pressão e sem abrasivo..... | 66 |
| Figura 4.25 – Imagens de MEV das superfícies usinadas com água deionizada pressurizada a 240 bar sem abrasivo..... | 66 |
| Figura 4.26 – Imagens de MEV das superfícies usinadas pelo processo com SiC de 600 mesh na pressão de trabalho de 80 bar..... | 66 |
| Figura 4.27 – Imagens de MEV das superfícies usinadas pelo processo com SiC de 600 mesh na pressão de trabalho de 170 bar..... | 67 |
| Figura 4.28 – Imagens de MEV das superfícies usinadas pelo processo com SiC de 600 mesh na pressão de trabalho de 240 bar..... | 67 |
| Figura 4.29 – Imagens de MEV das superfícies usinadas com óleo mineral sem pressão e sem abrasivo..... | 67 |
| Figura 4.30 – Valores de Micro-dureza Vickers [HV] da camada refundida, zona afetada pelo calor (ZAC) e material base (aço AISI M2) para avaliação das condições de aplicação do fluido dielétrico e efeito da variação da pressão no processo..... | 69 |
| Figura 4.31 – Consumo de abrasivo para avaliação do efeito da variação da pressão de trabalho no processo..... | 69 |
| Figura 4.32 – TRM para diferentes tamanhos da partícula do abrasivo SiC com pressão de trabalho de 240 bar no processo..... | 70 |
| Figura 4.33 – TD para diferentes tamanhos da partícula do abrasivo SiC com pressão de trabalho de 240 bar no processo..... | 71 |
| Figura 4.34 – DVR para diferentes tamanhos da partícula do abrasivo SiC com pressão de trabalho de 240 bar..... | 72 |
| Figura 4.35 – TRM para avaliação de desempenho dos abrasivos SiC e Al_2O_3 de 600 mesh no processo nas pressões de 80, 130, 170 e 240 bars..... | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.36 – TD para avaliação de desempenho dos abrasivos SiC e Al ₂ O ₃ de 600 mesh no processo nas pressões de trabalho de 80, 130, 170 e 240 bars.. | 74 |
| Figura 4.37 – DVR para avaliação de desempenho dos abrasivos SiC e Al ₂ O ₃ de 600 mesh no AJEDM nas pressões de trabalho de 80, 130, 170 e 240 bars..... | 74 |
| Figura 4.38 – Consumo dos abrasivos SiC e Al ₂ O ₃ de 600 mesh [concentração em g/l] para avaliação de desempenho nas pressões de trabalho de 80, 130, 170 e 240 bars..... | 75 |
| Figura 4.39 – Sequência de fotos da descarga elétrica da usinagem com água deionizada sem pressão..... | 76 |
| Figura 4.40 – Sequência de fotos da descarga elétrica da usinagem com óleo mineral sem pressão..... | 76 |
| Figura 4.41 – Sequência de fotos da descarga elétrica da usinagem com água deionizada sem pressão com abrasivo SiC de 600 mesh na concentração de 10 g/l..... | 76 |
| Figura 4.42 – Sequência de fotos da descarga elétrica da usinagem com água deionizada sem pressão com abrasivo Al ₂ O ₃ de 600 mesh na concentração de 10 g/l..... | 77 |
| Figura 4.43 – TRM em relação à variação da geometria da extremidade da ferramenta com jato abrasivo de SiC de 500 mesh com pressão de 240 bar..... | 78 |
| Figura 4.44 – TD em relação à variação da geometria da extremidade da ferramenta com jato abrasivo de SiC de 500 mesh com pressão de 240 bar..... | 79 |
| Figura 4.45 – DVR em relação à variação da geometria da extremidade da ferramenta com jato abrasivo de SiC de 500 mesh com pressão de 240 bar..... | 80 |
| Figura 4.46 – Cavidade usinada obtida da extremidade com ângulo de 30° e respectivo eletrodo-ferramenta utilizado no processo com SiC de 500 mesh na pressão de 240 bar..... | 80 |
| Figura 4.47 – TRM dos abrasivos SiC, Al ₂ O ₃ e B ₄ C com granulometria de 320 mesh na pressão de 240 bar..... | 81 |
| Figura 4.48 – TD dos abrasivos SiC, Al ₂ O ₃ e B ₄ C de granulometria 320 mesh na pressão de 240 bar..... | 82 |
| Figura 4.49 – DVR dos abrasivos SiC, Al ₂ O ₃ e B ₄ C de 320 mesh para pressão de trabalho de 240 bar..... | 82 |
| Figura 4.50 – Imagens de MEV do abrasivo SiC de granulometria 320 mesh..... | 83 |
| Figura 4.51 – Imagens de MEV do abrasivo Al ₂ O ₃ de granulometria 320 mesh..... | 84 |
| Figura 4.52 – Imagens de MEV do abrasivo B ₄ C de granulometria 320 mesh..... | 85 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.53 – Partículas abrasivas de SiC depositadas na cavidade usinada e no topo do suporte de fixação das amostras após a usinagem do aço AISI M2 ... | 87 |
| Figura 4.54 – Imagem de MEV das micro-partículas erodidas obtidas da usinagem do aço AISI M2 pelo processo misturadas ao abrasivo B ₄ C de 320 mesh..... | 87 |
| Figura 4.55 – Imagem de MEV de partículas abrasivas de SiC de 320 mesh aglutinadas ao material removido da peça de aço AISI M2..... | 88 |
| Figura 4.56 – Imagem de MEV das partículas abrasivas de SiC de 320 mesh, junto às micro-partículas erodidas obtidas da usinagem do aço AISI M2 pelo AJEDM..... | 89 |
| Figura 4.57 – Gráfico do espectro de EDS da imagem da Figura 4.56..... | 89 |
| Figura 4.58 – Imagem de MEV de micro-partícula erodida do aço AISI M2 com abrasivo SiC de 320 mesh aderido à mesma..... | 90 |
| Figura 4.59 – Imagem de MEV de micro-partícula erodida do titânio com abrasivo SiC de 320 mesh aderido à mesma..... | 90 |
| Figura 4.60 – TRM para avaliação da degradação dos abrasivos SiC e Al ₂ O ₃ de 400 mesh com pressão de 240 bar no processo..... | 91 |
| Figura 4.61 – TD para avaliação da degradação dos abrasivos SiC e Al ₂ O ₃ de 400 mesh com pressão de 240 bar no processo..... | 92 |
| Figura 4.62 – DVR para avaliação da degradação dos abrasivos SiC e Al ₂ O ₃ de 400 mesh com pressão de 240 bar no processo..... | 92 |
| Figura 4.63 – Imagem de MEV do abrasivo SiC de granulometria 400 mesh, novo..... | 93 |
| Figura 4.64 – Imagem de MEV do abrasivo SiC de granulometria 400 mesh, após 7º teste..... | 93 |
| Figura 4.65 – Imagem de MEV do abrasivo Al ₂ O ₃ de granulometria 400 mesh, novo..... | 94 |
| Figura 4.66 – Imagem de MEV do abrasivo Al ₂ O ₃ de granulometria 400 mesh, após 7º teste..... | 94 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Características do aparelho deionizador..... | 32 |
| Tabela 3.2 – Testes para avaliação dos abrasivos SiC e Al ₂ O ₃ | 37 |
| Tabela 3.3 – Regime de trabalho usado nas séries de testes..... | 39 |
| Tabela 3.4 – Parâmetros de EDM usados nas séries de testes..... | 39 |
| Tabela 4.1 – Condutividade elétrica e propriedades mecânicas dos materiais dos eletrodos-ferramenta..... | 49 |
| Tabela 4.2 – Características dos fluidos dielétricos usados nos testes..... | 51 |
| Tabela 4.3 – Propriedades dos abrasivos SiC, Al ₂ O ₃ | 73 |
| Tabela 4.4 – Preço dos abrasivos SiC, Al ₂ O ₃ e B ₄ C de granulometria 320 mesh..... | 86 |

LISTA DE SÍMBOLOS

ALFABETO LATINO

| | |
|-------------------------|---|
| A | : Ampere |
| Al_2O_3 | : óxido de alumínio ou alumina |
| B_4C | : carboneto, carbeto ou carbureto de boro |
| $^{\circ}\text{C}$ | : grau centígrado |
| g | : grama |
| H_V | : dureza Vickers [kgf/mm^2] |
| i_e | : corrente da descarga média [A] |
| i_m | : corrente da descarga máxima [A] |
| Kgf | : kilograma força |
| K_{Ic} | : fragilidade [$\text{MPa.m}^{1/2}$] |
| m | : metro |
| m_f | : massa final da peça e/ou ferramenta [g] |
| m_i | : massa inicial da peça e/ou ferramenta [g] |
| min | : minuto |
| mm | : milímetro |
| MPa | : mega Pascal |
| SiC | : carboneto, carbureto ou carbeto de silício |
| s | : segundo |
| t | : tempo de usinagem [min] |
| t_d | : tempo de atraso da ignição [μs] |
| t_e | : duração da descarga [μs] |
| T_f | : ponto de fusão [$^{\circ}\text{C}$] |
| t_{off} | : tempo de intervalo do pulso [μs] |
| t_{on} | : tempo de duração do pulso [μs] |
| t_p | : tempo do ciclo [μs] |
| U | : tensão do circuito aberto [V] |
| u_e | : tensão de trabalho média [V] |
| u_i | : tensão da descarga [V] |
| V | : volt |

ALFABETO GREGO

α : ângulo de ataque da partícula abrasiva [°]

σ : condutividade elétrica [S.m/mm²]

ρ : peso específico do material do eletrodo-ferramenta [g/mm³]

Δ_m : variação de massa da peça e/ou ferramenta [g]

μ : micra

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|-------|---|
| AISI | : <i>American Iron and Steel Institute</i> |
| AJEDM | : <i>Abrasive Jet Electrical Discharge Machining</i> (Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo) |
| AJM | : <i>Abrasive Jet Machining</i> (Usinagem por Jato Abrasivo) |
| AWJM | : <i>Abrasive Water Jet Machining</i> (Usinagem por Jato de Água Abrasivo) |
| DT | : <i>Duty time</i> (tempo de trabalho - relaciona o tempo de duração do pulso com o tempo do ciclo entre duas descargas consecutivas) [%] |
| DVR | : Desgaste Volumétrico Relativo [%] |
| ECM | : <i>Electrical Chemical Machining</i> (Usinagem Eletroquímica) |
| ECDM | : <i>Electrical Chemical Discharge Machining</i> (Usinagem Eletroquímica com Descargas Elétricas) |
| EDM | : <i>Electrical Discharge Machining</i> (Usinagem por Descargas Elétricas) |
| EDS | : <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (Espectroscopia de Energia Dispersiva) |
| EDX | : <i>Energy Dispersive X-Ray</i> (Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio-X) |
| LBM | : <i>Laser Beam Machining</i> (Usinagem com Raio Laser) |
| MEV | : Microscopia Eletrônica de Varredura |
| NDE | : Nitretação por Descargas Elétricas |
| TD | : Taxa de Desgaste [mm^3/min] |
| TRM | : Taxas de Remoção de Material [mm^3/min] |
| TS | : <i>Transistor Standard</i> – define a quantidade de corrente |
| ZAC | : Zona termicamente afetada pelo calor |
| WEDM | : EDM a fio ou <i>Wire EDM</i> |
| WJM | : <i>Water Jet Machining</i> (Usinagem com Jato de Água) |

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

| | |
|------------------------|-----------|
| Introdução..... | 01 |
|------------------------|-----------|

CAPÍTULO II

| | |
|--|-----------|
| Revisão Bibliográfica..... | 04 |
| 2.1. Processos Híbridos de Usinagem..... | 04 |
| 2.2. Processo de Usinagem por Descargas Elétricas..... | 05 |
| 2.2.1 <i>Os princípios do processo.....</i> | 06 |
| 2.2.2 <i>Parâmetros da EDM.....</i> | 10 |
| 2.2.3 <i>Principais aspectos avaliados após o processo.....</i> | 12 |
| 2.2.4 <i>Componentes da máquina de EDM</i> | 13 |
| 2.2.5 <i>Fluido dielétrico.....</i> | 13 |
| 2.2.6 <i>Limpeza da fenda de trabalho.....</i> | 14 |
| 2.2.7 <i>Material do eletrodo-ferramenta.....</i> | 15 |
| 2.2.8 <i>Integridade da superfície.....</i> | 16 |
| 2.2.9 <i>Usinagem por Descargas Elétricas com pós.....</i> | 19 |
| 2.3. Usinagem com abrasivos..... | 20 |
| 2.3.1 <i>Processo de Usinagem por Jato Abrasivo (AJM)</i> | 21 |
| 2.3.2 <i>Processo de Usinagem com Jato de Água (WJM)</i> | 23 |
| 2.3.3 <i>Processo de Usinagem por Jato de Água Abrasivo (AWJM)</i> | 23 |
| 2.3.4 <i>Processo de usinagem híbrido AJEDM.....</i> | 27 |
| 2.4. Propostas do trabalho de pesquisa..... | 29 |

CAPÍTULO III

| | |
|--|-----------|
| Procedimento Experimental..... | 30 |
| 3.1. Adaptações na máquina EDM..... | 31 |
| 3.2. Seleção dos testes..... | 35 |
| 3.2.1 <i>Avaliação de materiais para eletrodo-ferramenta.....</i> | 36 |
| 3.2.2 <i>Avaliação da pressão de trabalho, tipo e tamanho dos abrasivos SiC e Al₂O₃.....</i> | 36 |
| 3.2.3 <i>Avaliação da influência da variação da geometria do eletrodo- ferramenta.....</i> | 37 |

| | |
|---|------------|
| 3.2.4. Avaliação dos abrasivos SiC; Al ₂ O ₃ e B ₄ C de 320 mesh no AJEDM..... | 38 |
| 3.3. Determinação dos parâmetros de EDM..... | 38 |
| 3.4. Parâmetros ou aspectos avaliados | 40 |
| 3.5. Coleta das micro-partículas erodidas misturadas ao pó abrasivo..... | 42 |
| 3.6. Problemas nos ensaios e na preparação metalográfica das amostras..... | 43 |
| CAPÍTULO IV | |
| Resultados e Discussão..... | 47 |
| 4.1. Avaliação de materiais para eletrodo-ferramenta..... | 47 |
| 4.2. Avaliação da variação da pressão do fluido dielétrico..... | 50 |
| 4.3. Influência do tamanho da partícula de SiC no AJEDM..... | 69 |
| 4.4. Desempenho dos abrasivos SiC e Al ₂ O ₃ no AJEDM..... | 72 |
| 4.5. Efeito do espalhamento das descargas..... | 76 |
| 4.6. Proposta do enriquecimento superficial..... | 77 |
| 4.7. Influência da variação da geometria da extremidade do eletrodo-ferramenta..... | 78 |
| 4.8. Influência dos abrasivos SiC, Al ₂ O ₃ e B ₄ C de 320 mesh no AJEDM..... | 81 |
| 4.9. Mecanismo de desgaste..... | 86 |
| 4.10. Avaliação da degradação dos abrasivos SiC e Al ₂ O ₃ no AJEDM..... | 91 |
| 4.11. Reciclagem da água deionizada e dos abrasivos..... | 95 |
| 4.12. Análise de custos das implementações do sistema <i>venturi</i> | 96 |
| CAPÍTULO V | |
| 5.1. Conclusões..... | 97 |
| 5.2. Sugestões para trabalhos futuros..... | 99 |
| Referências Bibliográficas..... | 100 |
| Anexo..... | 106 |

CAPÍTULO I

1. Introdução

O processo não convencional de Usinagem por Descargas Elétricas (*Electrical Discharge Machining* – EDM), trabalha com baixas taxas de remoção de material (TRM), em comparação com os processos de usinagem convencionais. Ele é extensamente utilizado pelas indústrias na confecção de moldes e ferramentas, devido à vantagem de usinar materiais de dureza elevada.

Segundo Erden e Kaftanoglu (1981), estima-se que apenas 10 a 15% do material fundido por descargas elétricas durante o processo é removido da superfície, enquanto o restante re-solidifica, o que é responsável pelo baixo rendimento do processo.

Além da baixa velocidade de usinagem, o processo EDM produz alguns inconvenientes na superfície usinada como a formação da camada refundida, trincas e poros (bolhas). Uma possibilidade de melhorar o desempenho do processo EDM e amenizar os defeitos superficiais é a combinação do mesmo com outros processos de fabricação.

O processo híbrido de usinagem, denominado Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo (AJEDM), consiste na aplicação simultânea dos processos de EDM e Usinagem por Jato de Água Abrasivo (AWJM) (RASLAN e ARANTES, 2009). Esse processo utiliza a interação térmica da EDM, cuja remoção de material ocorre por fusão e evaporação, com a interação da ação mecânica de erosão por jato de água com partículas abrasivas. Essa mistura é submetida a pressões muito superiores às pressões nominais da máquina de EDM. As partículas de pó formam uma ponte para a corrente ao reduzirem a rigidez dielétrica do fluido dielétrico, entre a ferramenta e a peça, aumentando a fenda de trabalho, e consequentemente, uma melhora na TRM. O jato de fluido sob pressão promove uma melhora no processo de lavagem, o que acarreta em melhora na TRM. Um ganho adicional na TRM é obtido com a ação das partículas abrasivas diluídas no fluido, que provocam desgaste erosivo e aumentam a eficácia na remoção de material (RASLAN e ARANTES, 2009).

Os resultados obtidos por Arantes (2007) mostraram que a utilização do processo de usinagem híbrido AJEDM usando SiC (carboneto de silício) com jato de água deionizada na pressão de 100 bar, é viável. O mesmo promoveu uma TRM 75% maior que a usinagem com óleo mineral sem pressão.

Apesar de ter sido demonstrada a viabilidade técnica do processo AJEDM por Raslan e Arantes (2009), muitas questões relacionadas ao processo ficaram pendentes.

Portanto, o objetivo geral do presente trabalho é o de otimizar e avaliar os parâmetros de influência no processo AJEDM. Como objetivos específicos, podem-se especificar, na otimização:

- implementar adaptações na máquina de EDM com a introdução de um sistema de alimentação de abrasivo por meio de bico *venturi*;
- aplicar jato de água abrasivo com pressões variáveis e superiores a 100 bar;
- utilizar abrasivos alternativos ao SiC, com granulometria variada e estudo de reciclagem/degradação;
- avaliar e selecionar diferentes materiais para confecção de eletrodo-ferramenta e modificar a geometria do eletrodo de melhor desempenho;
- prevenir oxidação por parte da água de componentes da máquina EDM;
- estudar a viabilidade do enriquecimento por liga da superfície usinada;
- explicar os mecanismos de desgaste atuantes e
- efetuar o levantamento de custos da otimização proposta.

Na avaliação dos parâmetros da usinagem, determinou-se a TRM, taxa de desgaste (TD) da ferramenta e desgaste volumétrico relativo (DVR). As modificações superficiais foram acompanhadas por microscopia ótica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), fluorescência de raios-x e dureza Vickers.

Para alcançar estes objetivos foi utilizada, principalmente, a estrutura do LTM – Laboratório de Tribologia e Materiais/FEMEC/UFU. Alguns auxílios foram obtidos de outros laboratórios da FEMEC/UFU, como o LAPROSOLDA e LTAD. As estruturas de outras instituições, como o CEFET-MG e PUC-MG também foram utilizadas. Os recursos financeiros foram fornecidos por Projeto FAMEMIG TEC - APQ 01481/09.

O texto deste trabalho foi estruturado em capítulos. Neste primeiro, faz-se uma “Introdução” ao trabalho, enfocando o processo AJEDM, justificativa e os objetivos gerais e específicos.

O Capítulo II tem como finalidade proporcionar uma compreensão básica dos processos EDM por penetração e AJEDM por meio da “Revisão Bibliográfica”, na qual foram abordados os temas relevantes ao trabalho.

O Capítulo III reporta ao “Procedimento Experimental”, onde são apresentados metodologias, materiais, equipamentos, adaptações implementadas na máquina de EDM e parâmetros para a realização dos experimentos.

No Capítulo IV, “Resultados”, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com os ensaios experimentais realizados com as implementações feitas para otimização do processo AJEDM.

No Capítulo V, são apresentadas as “Conclusões”, com uma síntese dos resultados obtidos.

As “Referências Bibliográficas” são apresentadas após o Capítulo V.

As páginas finais deste trabalho são reservadas para os anexos, como: tabelas com o custo estimado das máquinas, dos equipamentos e dos acessórios para utilização do bico *venturi* no processo de usinagem híbrido AJEDM e das adaptações implementadas na máquina de EDM.

CAPÍTULO II

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Processos Híbridos de Usinagem

Segundo Kozak e Rajurkar (2008), atualmente a indústria enfrenta grandes desafios quando é necessário usinar materiais modernos, como superligas duras, cerâmicos e compósitos. Isso exige rigorosos requisitos de concepção, tais como alta precisão, complexidade de moldagem e alta qualidade superficial, que elevam os custos de usinagem. Esses materiais desempenham um papel cada vez mais importante nas indústrias de transformação, especialmente na fabricação de aviões, automóveis, ferramentas, entre outras. As melhorias alcançadas nas propriedades mecânicas desses materiais, como resistência mecânica, resistência ao calor, ao desgaste e à corrosão, rendem benefícios tecnológicos e econômicos para a indústria por meio da melhoria do desempenho e concepção dos produtos. Porém, a aplicação dos processos de usinagem convencionais, como furação, fresamento e torneamento, nem sempre são economicamente ou tecnicamente viáveis na fabricação dos mesmos. A usinagem convencional é, muitas vezes, ineficaz na fabricação de peças com esses materiais. Para responder a esses desafios, novos processos precisam ser desenvolvidos.

A melhoria tecnológica dos processos de usinagem pode ser atingida pela combinação de diferentes fenômenos físicos, em especial a ação mecânica, que é utilizada pelos processos convencionais para remoção de material, combinada com as interações não convencionais aplicadas em processos de fabricação, como a Usinagem por Descarga Elétrica (EDM), Usinagem Eletroquímica (ECM) e Usinagem com Raio Laser (LBM) (KOZAK; RAJURKAR, 2008).

O desempenho dos processos híbridos de usinagem é substancialmente maior que o desempenho dos processos separados. Por exemplo, a produtividade do processo que utiliza a usinagem por descargas elétricas (EDM) combinado com a usinagem eletroquímica (ECM), é até 5 vezes maior que a produtividade utilizando esses processos individualmente (KOZAK; RAJURKAR, 2008).

2.2. Processo de Usinagem por Descargas Elétricas

De acordo com McGeough (1988), o processo EDM ocorre entre dois materiais condutores de eletricidade, um o eletrodo-ferramenta e o outro eletrodo-peça, por meio das faíscas produzidas por descargas elétricas na presença de um fluido dielétrico. Durante o processo, a ferramenta não entra em contato com a peça. A ferramenta trabalha sempre afastada da peça mantendo uma fenda de trabalho (*gap*), de 0,01 a 0,50 mm de distância. As primeiras descargas elétricas ocorrem nos pontos mais próximos das superfícies do eletrodo e da peça provocando um aumento na distância entre ambos, que é compensado pelo deslocamento de aproximação da ferramenta, através do sistema de servo mecanismo.

Segundo Fuller (1989), o processo é extensamente utilizado na fabricação de matrizes para estampagem e moldes para injeção, conjuntos que têm a elevada dureza como característica imprescindível para seu funcionamento. Para usinar peças de geometrias variadas, a ferramenta deve ter o formato do negativo da cavidade que se deseja obter na peça.

A EDM é um processo térmico. O material é removido devido ao calor promovido pelo fluxo de eletricidade entre os eletrodos ferramenta e peça. O material presente no caminho percorrido pelas descargas elétricas aquece-se a ponto de vaporizar-se. Com isso, uma quantidade de material é arrancada das superfícies e arrastada para fora da fenda de trabalho pelo fluido dielétrico. A área aquecida por cada faísca é rapidamente refrigerada pelo dielétrico, bem como a pequena quantidade de material arrancada. Algumas mudanças metalúrgicas ocorrem na superfície da peça devido ao processo de aquecimento e posterior resfriamento brusco (MCGEOUGH, 1988).

Os eletrodos ferramenta e peça não podem entrar em contato, pois provocaria um curto circuito, não permitindo o funcionamento do processo. Por esse motivo, eles ficam afastados e a fenda de trabalho necessita ser mantida durante todo o processo. Na fenda de trabalho ocorrem as descargas elétricas, formando as centelhas que promovem a remoção de material através do calor produzido pelo choque de elétrons e íons. Os eletrodos sofrem o efeito da erosão provocada pelas descargas elétricas, o pólo positivo devido ao choque de elétrons e o pólo negativo devido ao choque de íons positivos. Porém, menos metal é retirado do pólo positivo, geralmente o eletrodo-ferramenta, no processo de EDM por penetração (FULLER, 1989).

Para um perfeito funcionamento do sistema, o eletrodo-ferramenta deve se aproximar da peça. Para isso, um servo mecanismo de avanço é necessário. Ele assegura que a ferramenta se mova com uma taxa própria, mantendo a fenda de trabalho apropriada

para a centelha. Além disso, promove o afastamento entre os eletrodos após cada seqüência de descargas elétricas. O afastamento oportuniza a retirada, por meio do fluido dielétrico, das micro-partículas fundidas da superfície. Geralmente, o sistema do servo mecanismo de avanço compara a voltagem da fenda de trabalho com um valor de referência da máquina de EDM. Isso assegura ao mesmo a capacidade de avançar ou afastar a ferramenta, conforme a necessidade (FULLER, 1989).

2.2.1 Os princípios do processo

Segundo Stevens (1998), não existe, atualmente, nenhum modelo completo da EDM que esclareça, detalhadamente, todos os diferentes fenômenos que ocorrem durante o processo. Algumas explicações, no entanto, são aceitas pela maioria dos pesquisadores.

De acordo com Klocke e König (2007), a teoria termo-elétrica é a que melhor explica o processo. Nela, assume-se que o calor gerado pela descarga elétrica na região da superfície próxima ao canal de plasma funde o material, que é removido e ejetado da poça fundida devido à evaporação. A descarga elétrica entre eletrodos ferramenta e peça ocorre entre quatro etapas sucessivas:

- fase de ignição;
- formação do canal de plasma;
- fusão e evaporação de pequena quantidade do material e
- ejeção do material líquido.

Na fase de ignição, uma diferença de potencial é aplicada entre os eletrodos ferramenta e peça. Um campo elétrico é criado, sendo caracterizado pela amplitude do gradiente de tensão entre outros fatores, como o perfil de rugosidade dos eletrodos, e de detritos na região da fenda de trabalho. Nos locais onde o gradiente é máximo, normalmente nos pontos mais altos da superfície (picos), os elétrons primários são emitidos pelo cátodo. A Figura 2.1 ilustra essa fase, bem como a variação de tensão e corrente durante a mesma. Esses elétrons primários são atraídos pelo ânodo e começam a se mover em sua direção. Em seu caminho através do fluido dielétrico, os elétrons primários colidem com átomos neutros do dielétrico. Como consequência, os átomos do dielétrico separam-se em íons positivos e negativos ou elétrons secundários. A Figura 2.2 ilustra esse movimento (STEVENS, 1998).

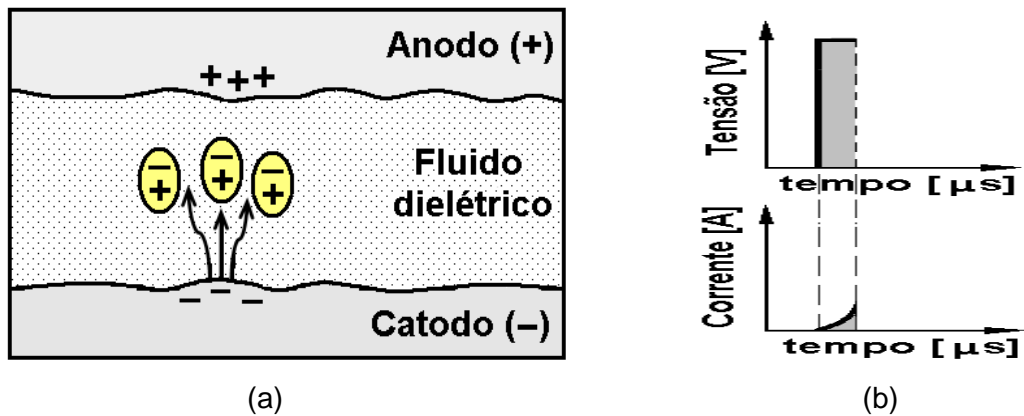


Figura 2.1 – Fase da inginição em (a) e evolução da corrente e da tensão em (b) (STEVENSON, 1998).

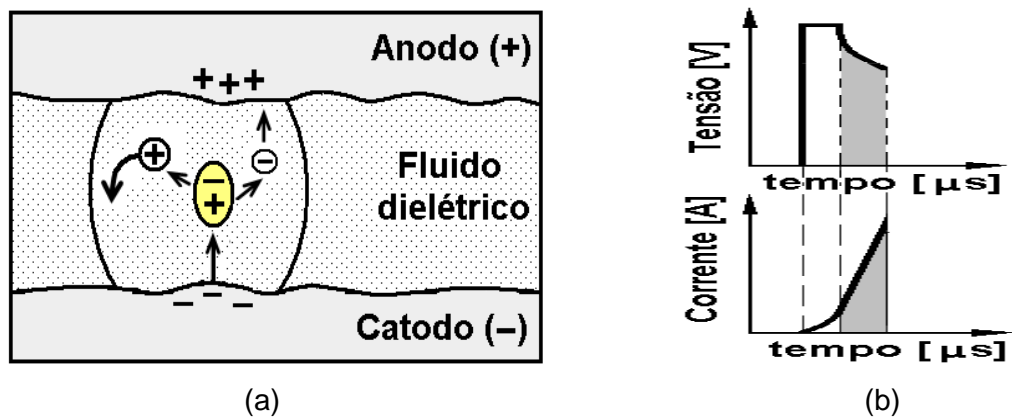


Figura 2.2 – Formação de eletrons secundários em (a) e evolução da corrente e da tensão em (b) (STEVENSON, 1998).

Na fase de formação do canal de plasma os íons positivos, provenientes do fluido dielétrico, são atraídos pelo cátodo e, ao colidirem contra o mesmo, liberam mais elétrons. Esse processo é denominado de emissão secundária. Os elétrons provenientes dessa emissão também avançam para o ânodo e, no caminho, dividem átomos do fluido dielétrico, liberando mais elétrons e íons. Neste momento, o fluido dielétrico começa se aquecer. Isso diminui a resistência elétrica e a corrente aumenta. O aquecimento do dielétrico forma uma bolha de vapor e o canal de plasma é, então, criado. A Figura 2.3 ilustra essa fase (STEVENSON, 1998).

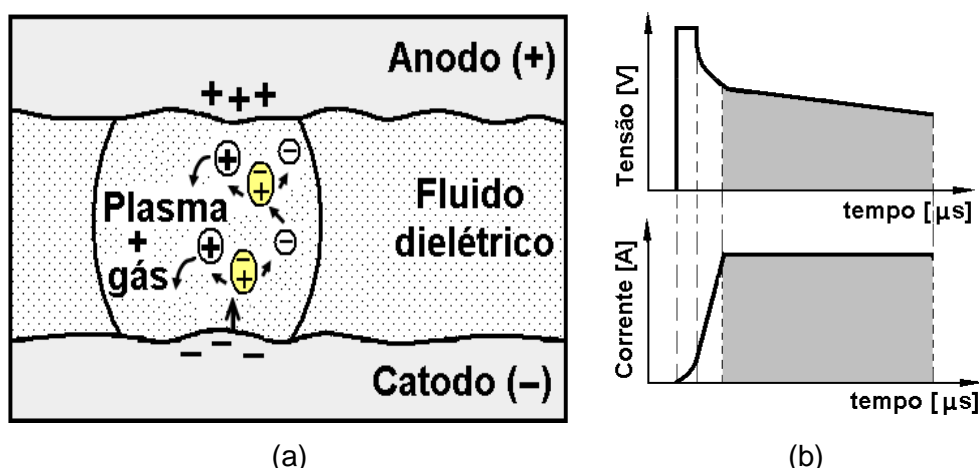


Figura 2.3 – Formação do canal de plasma em (a) e evolução da corrente e da tensão em (b) (STEVENSON, 1998).

A formação do canal de plasma também é chamada de ruptura da resistência dielétrica pois, quando ele é criado, a tensão cai drasticamente. O tempo que decorre entre a aplicação da tensão e o início da descarga denomina-se tempo de atraso da ignição. Quando a distância entre os eletrodos é maior, tem-se um aumento no tempo de atraso de ignição. Assim, o valor do tempo de atraso de ignição pode ser usado para controlar o movimento de aproximação do eletrodo-ferramenta (STEVENSON, 1998).

Essa descrição é válida para fluidos dielétricos não contaminados. Durante a usinagem, no entanto, partículas metálicas removidas dos eletrodos, bem como outras geradas pela decomposição do fluido dielétrico, são incorporadas ao fluido dielétrico. Em alguns processos, partículas de pó podem ser artificialmente adicionadas no fluido. Nesses casos, as partículas reduzem a rigidez dielétrica. Consequentemente, as descargas ocorrem mais facilmente (STEVENSON, 1998).

Nas fases de fusão e evaporação, o canal de plasma é mantido pelo tempo ajustado na máquina de EDM. Durante esse tempo, as superfícies do ânodo (eletrodo-ferramenta) e do cátodo (eletrodo-peça) são bombardeadas por elétrons e íons, respectivamente. Caso a polaridade seja invertida, como na EDM a fio (WEDM), a condição dos eletrodos também é invertida. Quando um elétron ou um íon colide com uma superfície, sua energia cinética é transformada em calor (Figura 2.4). Este calor induz a fusão e a evaporação parcial do material da superfície, pois são geradas temperaturas superiores a 12.000°C, segundo McGeough (1988). A quantidade de material que é fundido depende, entre outros fatores, do número de elétrons ou íons que colidem contra a superfície. O número de elétrons e íons gerados pela descarga elétrica depende da corrente e do tempo de duração da descarga (STEVENSON, 1998).

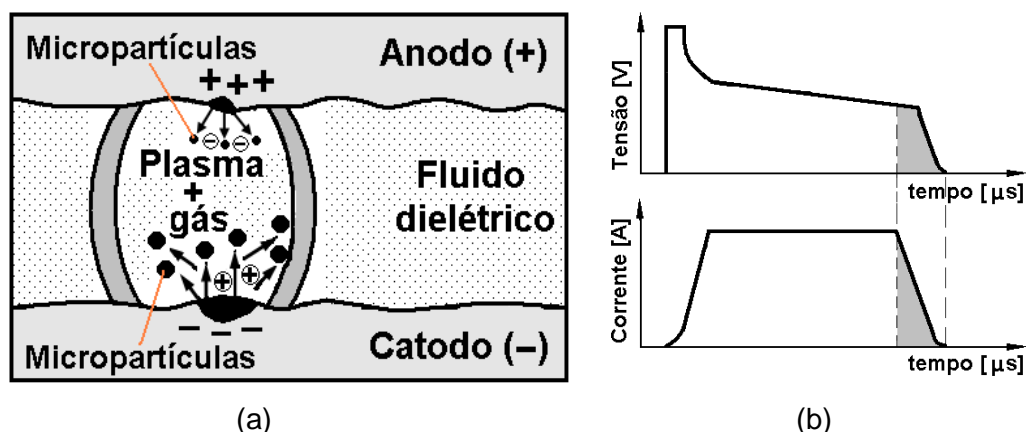


Figura 2.4 – Ruptura do canal de plasma em (a) e evolução da corrente e da tensão em (b) (STEVENS, 1998).

A diferença de massa entre elétrons e íons exerce influência no processo. Os íons metálicos são mais pesados que os elétrons e, sendo assim, sua energia cinética é muito maior, quando têm a mesma velocidade do elétron. Mas, devido a inércia maior, os íons levam mais tempo para alcançarem uma velocidade suficiente para aquecer e provocar fusão do material. Portanto, quando são aplicadas descargas curtas, com menos de 1 μs , os elétrons geram mais calor na superfície, já que apenas uma quantidade limitada de íons colidem contra o cátodo. Devido à velocidade inicial baixa dos íons, em relação aos elétrons, eles precisam de mais tempo para percorrer a mesma distância. É necessário um tempo maior do que 10 μs para que os íons possam atingir a superfície do cátodo em alta velocidade. Com isso, sua energia cinética pode gerar calor suficiente para provocar a fusão da superfície do cátodo (STEVENS, 1998).

Na fase de ejeção do material líquido, após atingir o tempo de descarga ajustado na máquina de EDM para o regime de trabalho, a corrente é interrompida bruscamente. Como consequência, o canal de plasma se desfaz e a pressão, da ordem de 200 bar, segundo McGeough (1988), cai bruscamente. Isso faz com que o material fundido nos eletrodos peça e ferramenta evaporem intensamente e pequenas gotas líquidas são ejetadas da poça fundida. O material é removido pela circulação do fluido dielétrico (STEVENS, 1998).

Erden e Kaftanoglu (1981) relatam que apenas entre 10 a 15% do material superaquecido pelo canal de plasma é ejetado da poça de fusão devido à queda de pressão no final da descarga. Assim, entre 85 a 90% do material fundido é depositado e resolidificado na superfície da peça, produzindo a camada refundida.

2.2.2. Parâmetros da EDM

A seleção dos parâmetros EDM é importante para determinar a precisão e o acabamento da superfície usinada, bem como, minimizar o desgaste da ferramenta. Os parâmetros de funcionamento como polaridade, material do eletrodo-ferramenta, tensão e corrente elétrica, duração do pulso, tempo entre pulsos e regimes de trabalho são selecionados para aplicações específicas (BENEDICT, 1987).

Dois períodos de tempos são de fundamental importância para o funcionamento adequado do processo, o tempo de descarga ou de pulso, chamado de t_{on} e o tempo de pausa ou intervalo, t_{off} . A duração desses períodos é da ordem de μs . No tempo t_{on} , a voltagem entre peça e ferramenta forma o canal de plasma. No instante em que a voltagem é ligada, automaticamente, pelo sistema de funcionamento da máquina, o canal de plasma desfaz-se e, neste instante, a corrente passa através do fluido dielétrico entre a peça e ferramenta e os elétrons e íons se chocam contra as superfícies. Logo, em seguida, começa o tempo t_{off} , durante o qual as micro-partículas do material que foram arrancadas pela descarga elétrica são arrastadas pelo fluido dielétrico para fora da fenda de trabalho (BENEDICT, 1987).

A evolução de tensão e corrente, durante uma descarga, é mostrada na Figura 2.5, bem como alguns outros parâmetros elétricos. Os parâmetros elétricos principais são resumidos a seguir:

- U = tensão do circuito aberto;
- u_i = tensão da descarga;
- u_e = tensão de trabalho média.
- i_e = corrente da descarga média;
- i_m = corrente da descarga máxima;
- t_d = tempo de atraso da ignição;
- t_e = tempo de duração da descarga;
- t_{on} = tempo de duração do pulso;
- t_{off} = tempo de intervalo do pulso e
- t_p = tempo do ciclo completo.

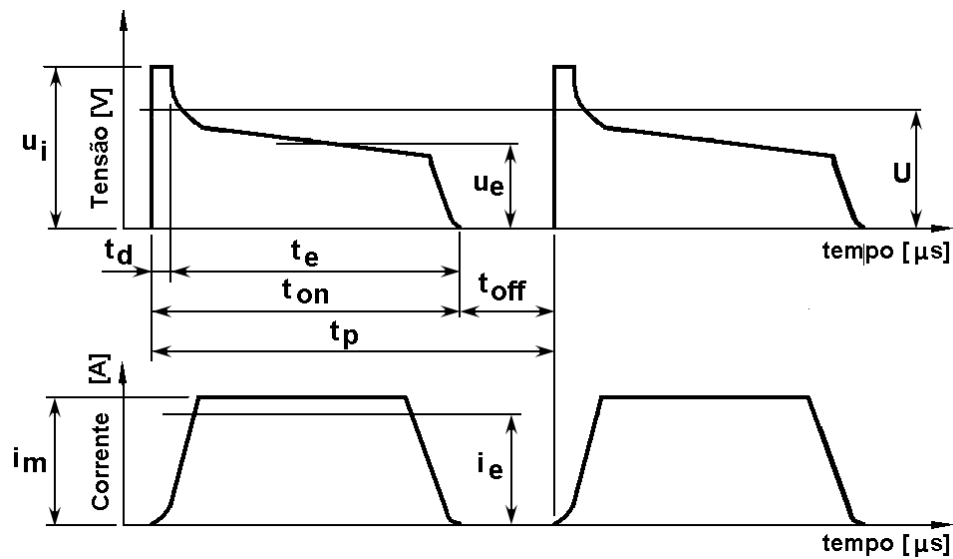


Figura 2.5 – Evolução da tensão e corrente elétrica durante a descarga, tempos de duração dos mesmos e parâmetros elétricos (STEVENS, 1998).

Para melhorar a remoção de resíduos da fenda de trabalho e evitar a formação de arco, o eletrodo-ferramenta é retraído por um instante, a fim de ocorrer a lavagem. Durante esse tempo de retração, não ocorrem descargas elétricas.

A retração é a distância que a ferramenta afasta da superfície da peça após o fim do ciclo da seqüência das descargas. O afastamento periódico é o tempo que a ferramenta permanece afastada da superfície da peça após a retração, antes de reiniciar a seqüência de descargas do tempo de erosão. Esses parâmetros são ajustados diretamente na máquina de EDM. A Figura 2.6 representa, esquematicamente, os tempos de erosão, afastamento periódico e a retração.

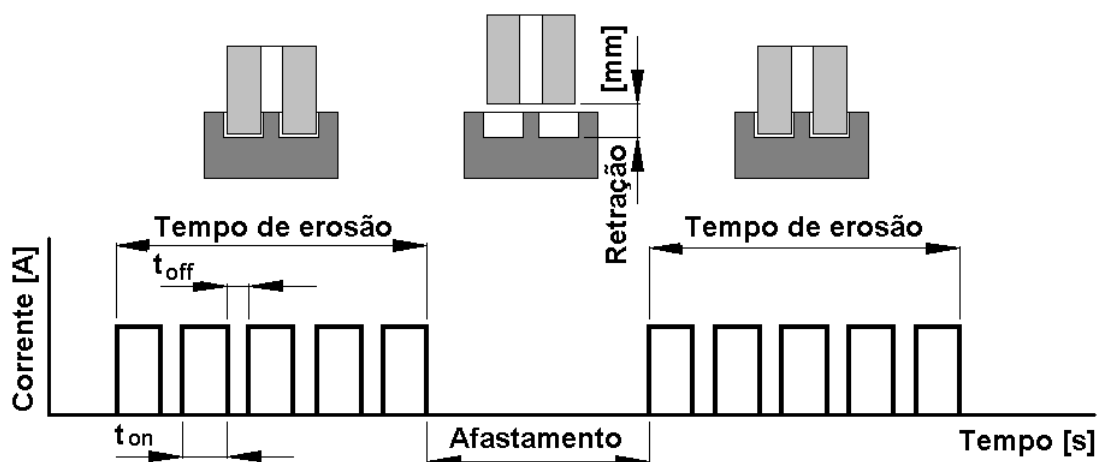


Figura 2.6 – Representação esquemática dos tempos de erosão, do intervalo e a retração.

A polaridade é um parâmetro importante do processo de EDM. Ela indica se o pólo do eletrodo ferramenta é positivo e se o do eletrodo peça é negativo e vice-versa. Quando são aplicados pulsos curtos, somente os elétrons são responsáveis pela usinagem. Na EDM por penetração, geralmente são usados pulsos mais longos. Portanto, a ferramenta é normalmente positiva e a peça é negativa e os íons são responsáveis pela usinagem.

As correntes de valores superiores criam maior queda de pressão no final da descarga e, portanto, mais material é removido. Uma maior duração de pulso eleva o diâmetro do canal de plasma no ânodo. Ambas as situações resultam na formação de crateras mais profundas e maior valor de rugosidade. Em relação ao cátodo, o diâmetro do canal de plasma não aumenta. Mas, devido ao pulso mais longo, mais calor é fornecido à superfície. Logo, mais material é fundido.

O regime de trabalho permite a remoção de material com velocidade de usinagem maior, como no caso do regime de desbaste. Porém, o regime de desbaste tem a desvantagem de induzir má qualidade superficial na peça. A superfície fica mais áspera, além da camada refundida e da zona termicamente afetada pelo calor ficarem mais espessas.

O tamanho da fenda de trabalho tem influência direta na realização do processo de EDM, pois interfere na largura e densidade do canal de plasma. Com folgas maiores aumenta-se o poder de destruição da descarga elétrica na superfície da peça (MCGEOUGH, 1988).

2.2.3. Principais aspectos avaliados após o processo

Segundo Amorim (2002), para avaliar o rendimento tecnológico do processo são usualmente quantificados os seguintes aspectos:

- Taxa de Remoção de Material (TRM);
- Taxa de Desgaste (TD);
- Desgaste Volumétrico Relativo (DVR) e
- Qualificação da textura superficial.

A TRM caracteriza o volume de material removido da peça em determinado tempo [mm^3/min]. Ela mede a quantidade de material retirada da peça durante o processo. Taxas maiores são obtidas em etapas de desbaste severo, no qual não se tem preocupação com a integridade superficial da peça e menores taxas, quando se trata de acabamento final.

A TD representa o volume de material desgastado da ferramenta em determinado tempo [mm^3/min]. Ela mede a quantidade de material desgastado da ferramenta. O ideal

seria um desgaste zero, porém não é possível, já que a superfície da mesma também é bombardeada no momento em que o canal de plasma é desfeito.

O DVR representa o desgaste volumétrico relativo entre os eletrodos ferramenta e peça, dado pela razão entre TD e TRM, normalmente expresso em valores percentuais. Considerando-se o desgaste volumétrico relativo, quanto menor seu valor, melhor para o processo.

2.2.4. Componentes da máquina de EDM

A máquina de EDM por penetração possui três sistemas: mecânico, elétrico e dielétrico.

O sistema mecânico, responsável pelo movimento relativo entre os eletrodos ferramenta e peça, é composto por três elementos. O primeiro, a mesa de trabalho, que posiciona a peça em relação aos eixos X e Y. O segundo, o servo mecanismo de avanço e posicionamento da ferramenta, responsável por manter a distância adequada da fenda de trabalho. E, por último, a própria estrutura da máquina.

O sistema elétrico é composto pelo gerador de pulsos, sistemas de controle do servo mecanismo de avanço da ferramenta e pelos cabos de alimentação de energia elétrica.

O sistema dielétrico é constituído pelo reservatório para armazenagem do fluido dielétrico, tanque de trabalho e moto bomba. A moto bomba é responsável pela alimentação do fluido durante o processo de usinagem. Ainda são incorporados os filtros, responsáveis pela limpeza do fluido dielétrico.

2.2.5. Fluido dielétrico

O fluido dielétrico tem um papel fundamental na EDM, pois controla a potência de abertura da descarga. Ele pode ser querosene, óleos minerais, água deionizada ou soluções aquosas (FULLER, 1989; ARANTES, 2001), além de óleos vegetais (LIMA e RASLAN, 2009).

De acordo com Singh e Bhardwaj (2011), a água utilizada como fluido dielétrico no processo EDM tem algumas vantagens em relação aos hidrocarbonetos como baixa viscosidade e a não emissão de gases produzidos pela queima do carbono. Entretanto, produz TRMs muito baixas, oxidação de componentes da máquina e resfriamento excessivo do eletrodo peça. Pela baixa viscosidade, é o fluido empregado em WEDM.

O fluido dielétrico deve possuir alta rigidez dielétrica para permanecer não condutor de eletricidade até que a tensão máxima ajustada seja alcançada. Deve se deionizar rapidamente, depois que a descarga acontece. E ainda, possuir uma boa capacidade de refrigeração com baixa viscosidade, o que permite a retirada dos resíduos produzidos pelo processo de usinagem para fora da fenda de trabalho (MCGEOUGH, 1988).

Para que o fluido dielétrico possa cumprir bem suas funções, ele deve ser avaliado em relação às seguintes propriedades ou fatores:

- Rigidez dielétrica. Uma maior rigidez implica em uma menor distância entre os eletrodos, com consequente aumento da precisão de usinagem;
- Tempo de deionização. Quanto menor o tempo de deionização, menor é o tempo T_{off} necessário entre os pulsos. Essa característica evita a formação de curtos circuitos;
- Viscosidade. Para uma menor viscosidade, melhor o escoamento. Ela é relevante em cavidades profundas;
- Calor específico. Quanto maior o calor específico, mais energia térmica pode acumular sem grande aumento na temperatura. A elevação da temperatura aumenta a difusão de átomos da peça para o fluido, o que pode causar alterações significativas na estrutura do material usinado, além do aparecimento de uma maior quantidade de micro-trincas e
- Condutividade térmica. Quanto maior a condutividade térmica menor a possibilidade de partículas se aderirem na ferramenta ou re-depositarem na superfície da peça.

2.2.6. Limpeza da fenda de trabalho

Nos processos EDM a limpeza da fenda de trabalho é fundamental para o bom desempenho do processo. Segundo Sommer et al. (2007), no início da usinagem, o fluido dielétrico encontra-se limpo. Se ocorrer um acúmulo de partículas em certos pontos da fenda de trabalho, ocorre uma diminuição da resistência elétrica, o que facilita a formação de descargas anormais, prejudicando o processo.

De acordo com Wong et al. (1995), o sistema de lavagem inadequado pode resultar em desgaste desigual da ferramenta, afetar a precisão e o acabamento superficial, além de reduzir a TRM. Isso se deve à promoção de arcos instáveis nas regiões de maior concentração de resíduos.

A Figura 2.7 ilustra os vários métodos de circulação do fluido dielétrico para limpeza da fenda de trabalho. Pressão ou sucção podem ser usadas com resultados semelhantes. O

fluxo do fluido por meio de um furo central na ferramenta é, geralmente, o método mais fácil. Porém, ele gera um ressalto na superfície usinada. Para evitar esse problema, pode-se usar um eletrodo-ferramenta maciço com o furo de alimentação do fluido por dentro do eletrodo-peça. Como alternativa, pode-se usar um bico para lavagem por jato (BENEDICT, 1987).

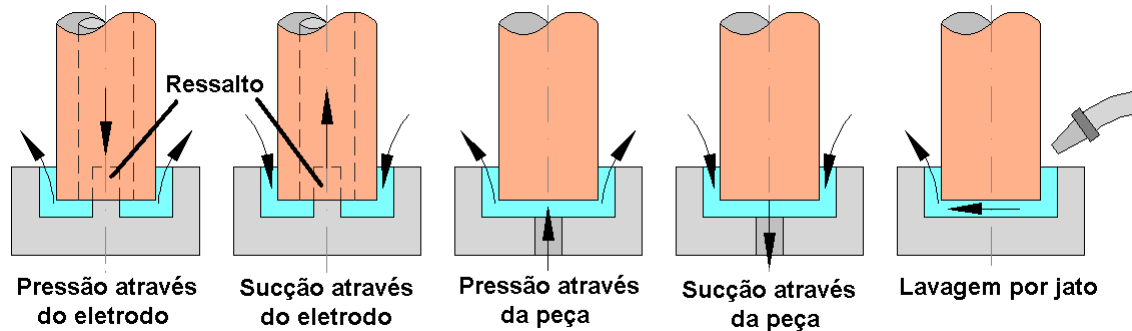


Figura 2.7 – Métodos de limpeza da fenda de trabalho (BENEDICT, 1987).

Segundo Saha (2008), para evitar a formação desse ressalto na usinagem com eletrodo vazado, deve-se utilizar ferramenta com movimento rotativo e furo excêntrico.

A aplicação de bicos dirigidos para a fenda de trabalho ou a lavagem por jato é o método de irrigação menos desejável. Pode-se ter a formação de arcos irregulares, curto-circuito, deficiência na retirada de partículas, desgaste desigual do eletrodo-ferramenta, além de baixa TRM. Usa-se lavagem por jato somente se todos os outros métodos de irrigação são indevidos para a configuração dos eletrodos ferramenta e peça (BENEDICT, 1987).

2.2.7. Material do eletrodo-ferramenta

Os materiais com alto ponto de fusão e boa condutividade elétrica são, normalmente, escolhidos para confecção da ferramenta para EDM. Eles devem ser de baixo custo e de fácil fabricação pelos processos de usinagem convencionais (MCGEOUGH, 1988).

A grafite é o material mais utilizado como eletrodo ferramenta, devido à boa usinabilidade e baixo desgaste. Ela está disponível comercialmente para EDM em grande variedade de tamanhos e formatos. Os grãos têm tamanhos que variam entre 0,001 a 0,1 mm. Eletrodos confeccionados com grão menores têm maior resistência à flexão e dureza, com redução do desgaste, além de produzir um melhor acabamento superficial. Contudo, o preço se eleva (FULLER, 1989; BENEDICT, 1987).

O cobre também possui bom desempenho no regime de desgaste, boa condutibilidade e é econômico. Por esses motivos, é quase tão usado quanto a grafite (FULLER, 1989).

Na prática, qualquer operação de EDM realizada com grafite também é executada com cobre. O resultado final pode ser o mesmo, porém o custo para obtê-lo é diferente. A escolha do material da ferramenta dependerá principalmente de suas dimensões, dos requisitos da peça, do tipo de máquina de EDM e dos métodos de fabricação da ferramenta (MCGEOUGH, 1988).

Muitos outros materiais têm sido investigados para utilização como eletrodo-ferramenta na EDM. Eletrodos de alumínio fundido usados em EDM promoveram resultados semelhantes ao cobre e a grafite. Porém, eles promovem um desgaste 15% superior quando usado na usinagem grosseira de aço (MCGEOUGH, 1988).

O latão, embora seja um material altamente estável quando sujeito às descargas elétricas, tem um desgaste relativamente alto, restringindo sua utilização (MCGEOUGH, 1988).

A liga cobre e tungstênio também pode ser empregada como eletrodo-ferramenta. Ela produz altas TRMs com baixo desgaste. Porém, é uma liga de custo elevado e apresenta dificuldades de usinagem. O seu uso é, geralmente, limitado a usinagem de alta precisão (MCGEOUGH, 1988).

Todos os tipos de materiais usados como eletrodo-ferramenta produzem um sobre-corte na peça. A quantidade de sobre-corte é previsível e pode ser determinada por meio de pré-testes, modificando-se os parâmetros de funcionamento da máquina de EDM. Uma compensação para esse sobre-corte deve ser considerada ao selecionar ou projetar os eletrodos-ferramenta (BENEDICT, 1987).

Os custos gerados na confecção dos eletrodos-ferramenta são, frequentemente, a parte mais cara da operação de EDM. O tipo de material, o processo de fabricação e o desgaste devem ser cuidadosamente estudados, para selecionar o melhor material a ser usado como eletrodo para um fim específico (FULLER, 1989).

2.2.8. Integridade da superfície

Em cada descarga elétrica promovida pelo processo de EDM remove-se material fundido e evaporado. São formadas pequenas crateras de tamanhos diferentes nos eletrodos peça e ferramenta, como mostra a Figura 2.8. A formação dessas crateras depende da energia da descarga elétrica. A presença delas produz um acabamento

superficial de baixa qualidade. Isso ocorre, principalmente, quando se usam altas energias de descarga que, em contrapartida, fornecem altas TRMs (FULLER, 1989). Segundo McGeough (1988), o fluido dielétrico usado pode ter influência na formação das crateras.

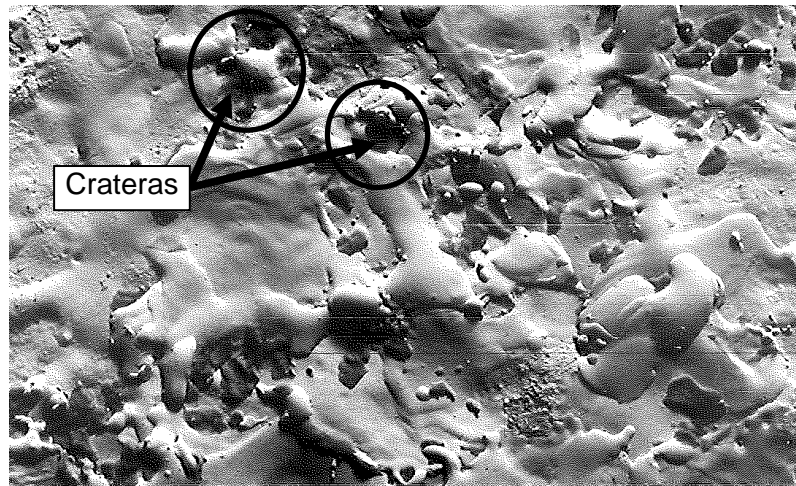


Figura 2.8 – Exemplo de superfície usinada por EDM (STEVENS, 1998).

Como a superfície da peça é aquecida pela descarga elétrica e resfriada rapidamente pela ação do fluido dielétrico, uma camada refundida forma-se nesta região. Isso induz o surgimento de tensões térmicas. Essas, por sua vez, provocam o aparecimento de poros e micro-trincas, como ilustra a Figura 2.9. As micro-trincas reduzem a resistência do material à fadiga. Com isso, a remoção da camada refundida é imprescindível para a integridade da peça usinada (FULLER, 1989).

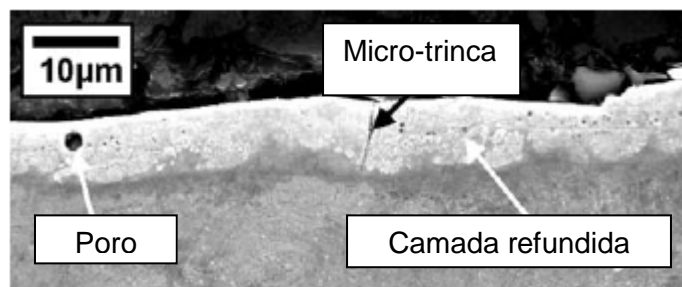


Figura 2.9 – Seção transversal de uma superfície produzida por EDM (FULLER, 1989).

De acordo com Pandey e Singh (2010), imediatamente abaixo da camada refundida surge uma região denominada zona termicamente afetada pelo calor (ZAC). O aumento da temperatura nessa região não é suficiente para derreter o material. Porém, essa temperatura é capaz de temperar o eletrodo-peça. Caso ele seja de aço de médio ou alto carbono, a dureza pode aumentar.

Segundo Khanra et al. (2007), a circulação do fluido dielétrico na fenda de trabalho, durante o resfriamento da superfície, produz vapores que tornam o fluxo turbulento. A presença do vapor reduz a taxa de resfriamento das gotas de metal líquido arrancadas da superfície, que solidificam no formato esférico. A Figura 2.10 ilustra uma imagem de MEV dessas micro-partículas.



Figura 2.10 – Imagem de MEV de micro-partículas esféricas formadas na usinagem por EDM (KHANRA et al, 2007).

De acordo com Norasetthekul et al. (1999), as micro-partículas que se formam durante o processo de EDM têm tamanhos diferentes, e esses ainda variam em função da corrente empregada no processo. A deposição dessas micro-partículas na superfície da peça reduz a taxa de remoção do material.

A Figura 2.11 ilustra as micro-partículas aderidas na superfície da peça, bem como micro-trincas e poros que se formam na cavidade usinada.



Figura 2.11 – Micro-partículas aderidas na superfície produzida pelo processo de EDM (SIDHOM et al., 2012).

2.2.9. Usinagem por Descargas Elétricas com pós

De acordo com Kansal (2006), dentre todos os métodos de usinagem não convencionais, a EDM é um dos mais populares para a fabricação de ferramentas como matrizes. Esse processo permite a usinagem de qualquer material condutor de eletricidade, independentemente, da dureza ou forma. Desde sua invenção, muitos esforços foram feitos para melhorar o desempenho e a estabilidade do processo. Estabilidade do processo é o fator chave para tornar o mesmo controlável. As demandas por usinagens de alta precisão, com boa qualidade superficial e taxas de remoção de material elevadas são fatores importantes para o setor de ferramentaria das indústrias. Uma das tentativas de cumprir esses requisitos foi introduzir a adição de pó, misturado ao fluido dielétrico.

Segundo Uno et al. (2001), a superfície usinada pelo processo que utiliza pó abrasivo misturado ao fluido dielétrico tem uma menor rugosidade. Isso se deve à circulação das partículas que atuam sobre a superfície usinada. Além disso, tem-se o aumento da fenda de trabalho, que proporciona melhor dispersão das descargas elétricas.

Conforme Singh e Bhardwaj (2011), as partículas de pó formam uma ponte entre os eletrodos ferramenta e peça, aumentando a fenda de trabalho. O aumento na distância da fenda de trabalho promove uma lavagem uniforme do material arrancado da peça (KANSAL, 2006).

Segundo Kumar et al. (2010), as partículas reduzem a força de isolamento do fluido dielétrico. A contaminação da fenda de trabalho pelas partículas melhora a estabilidade do processo. No entanto, a contaminação excessiva pode aumentar a concentração de centelhas, provocando instabilidade e ineficiência do processo. A adição de 4 g/l de grafite em querosene foi a que promoveu uma melhor TRM.

A adição de pós como grafite, silício e sulfeto de molibdênio no fluido dielétrico melhora o acabamento superficial em comparação com o processo de EDM (KUMAR et al., 2010).

Os resultados da usinagem por EDM, com pós misturados ao fluido dielétrico, mostram que o processo melhora o acabamento e a qualidade superficial da peça, com relativa elevação no valor da TRM. Além disto, produz uma superfície com alta resistência à corrosão e a abrasão (KANSAL, 2006).

Os estudos realizados por Klocke et al. (2004), por meio de fotografia da descarga elétrica usando câmera de alta velocidade, demonstraram que a adição de partículas abrasivas no fluido dielétrico mineral altera a intensidade e concentração da descarga.

A adição de partículas de silício no fluido dielétrico altera o canal de plasma e aumenta a intensidade da descarga elétrica ao liberar maior quantidade de energia. Por

consequente a adição de partículas de alumínio provoca uma maior expansão do canal de plasma, distribuindo a energia da descarga elétrica sobre uma área maior da superfície da peça. Logo, a adição de pós ao fluido dielétrico altera o mecanismo de remoção de material (KLOCKE et al., 2004).

A Figura 2.12 ilustra imagens obtidas com câmera fotográfica de alta velocidade da descarga elétrica com óleo mineral, sem adição de pó (a), com pó de alumínio (b) e com pó de silício (c).

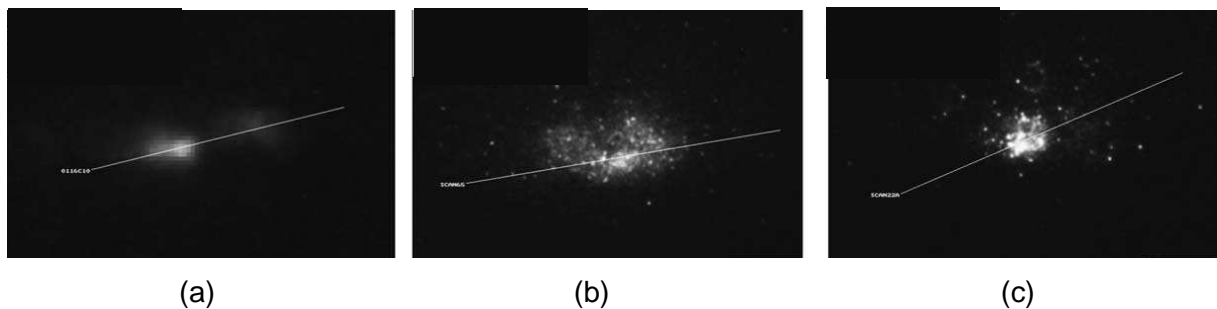


Figura 2.12 – Imagens da descarga elétrica com óleo mineral obtidas com câmera fotográfica de alta velocidade. Sem adição de pó em (a), com pó de alumínio em (b) e com pó de silício em (c) (KLOCKE et al., 2004).

2.3. Usinagem com abrasivos

Segundo Hutchings (1992), em algumas situações, o impacto de partículas sólidas transportadas por uma corrente de gás ou líquido causa desgaste quando atinge uma superfície (Figura 2.13). Esse tipo de desgaste é denominado erosão por partículas sólidas. A erosão também pode ser empregada em lixamento e polimento ou, ainda, em processos de corte ou modelagem de materiais.

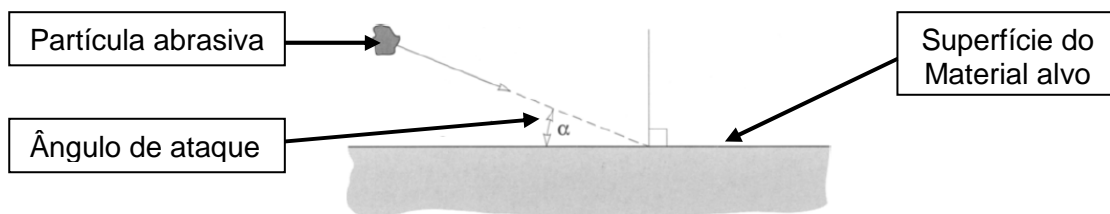


Figura 2.13 – Erosão pelo impacto de partícula sólida (HUTCHINGS, 1992).

De acordo com Ali e Wang (2011), o impacto da mistura de partículas abrasivas com líquidos contra a superfície de um material alvo pode causar deformações permanentes ou

remoção de material. Essa remoção de material pode ser desfavorável, no caso do desgaste de componentes mecânicos, ou favorável, quando utilizada nos processos de usinagem.

No caso da usinagem, quando partículas sólidas diluídas em um fluido, geralmente a água, elas são arrastadas pelo fluxo. Uma quantidade da energia cinética do fluido é fornecida às mesmas. Essas partículas, irregulares, com cantos afiados, com alta velocidade de impacto, atingem a superfície, e formam uma cratera permanente. O efeito final, o corte, é obtido com a superposição das crateras produzidas por várias partículas. O aumento da pressão aumenta a velocidade das partículas. Geralmente, a resposta do material ao impacto das partículas abrasivas pode ser erosão dúctil ou frágil (ALI e WANG, 2011).

Os materiais com comportamento dúctil sofrem deformação plástica. O material é removido em decorrência do deslocamento provocado pela ação das partículas sólidas. Já no regime frágil, o material é removido devido à interação de fissuras que irradiam a partir do ponto de impacto da partícula (FINNIE, 1960).

De acordo com Hutchings (1992), algumas propriedades da partícula abrasiva como a dureza, tamanho e forma devem ser observadas. A dureza da partícula envolvida na erosão influencia a taxa de desgaste. Uma partícula de menor dureza que a superfície do material alvo causa menor desgaste. Partículas menores promovem taxas de desgaste inferiores àsquelas provocadas por partículas maiores. As taxas de desgaste dependem fortemente das formas das partículas. Partículas angulares causam maior desgaste que as partículas arredondadas.

2.3.1. Processo de Usinagem por Jato Abrasivo (AJM)

O processo de Usinagem por Jato Abrasivo (*Abrasive Jet Machining* – AJM) remove-se material da superfície de um material alvo por meio da ação de partículas abrasivas misturadas a um fluxo de gás em alta velocidade.

As partículas abrasivas são transportadas por gás inerte. Quando dirigidas contra uma peça e a colisão das mesmas resulta na remoção de material (Figura 2.14). Esse efeito pode ser utilizado para corte, decapagem, limpeza, rebarbação, polimento e perfuração. A remoção de material ocorre devido ao mecanismo de erosão (BENEDICT, 1987).

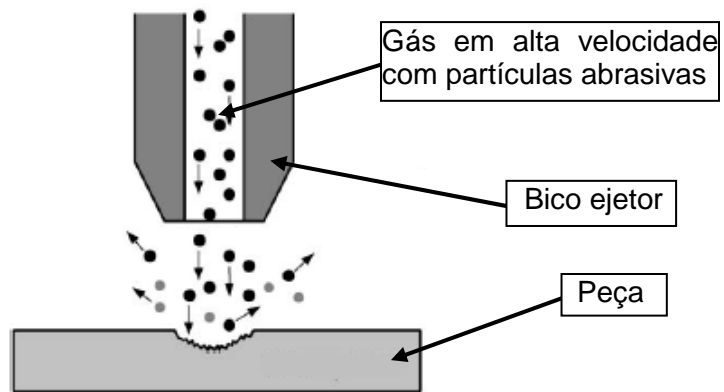


Figura 2.14 – Princípio do processo de Usinagem por Jato Abrasivo (BENEDICT, 1987).

O abrasivo pode ser a alumina, mais utilizado para corte. O carboneto de silício, abrasivo mais duro que o óxido de alumínio, é eficaz para as mesmas aplicações. Mas, normalmente, é aplicado somente quando a peça é de material muito duro. Os abrasivos estão disponíveis em vários tamanhos. Os abrasivos com maiores granulometrias removem maiores quantidades de material e são mais indicados para operações de corte. Os abrasivos de menor tamanho são mais úteis para polimento e limpeza. O reaproveitamento dos abrasivos não é recomendável, pois as partículas arrancadas da peça podem obstruir o bico ejetor (BENEDICT, 1987).

A Figura 2.15 ilustra os principais componentes de um sistema AJM. O abastecimento de gás é necessário para pressurizar o sistema. O gás pode ser ar comprimido industrial ou gás inerte (FULLER, 1989).

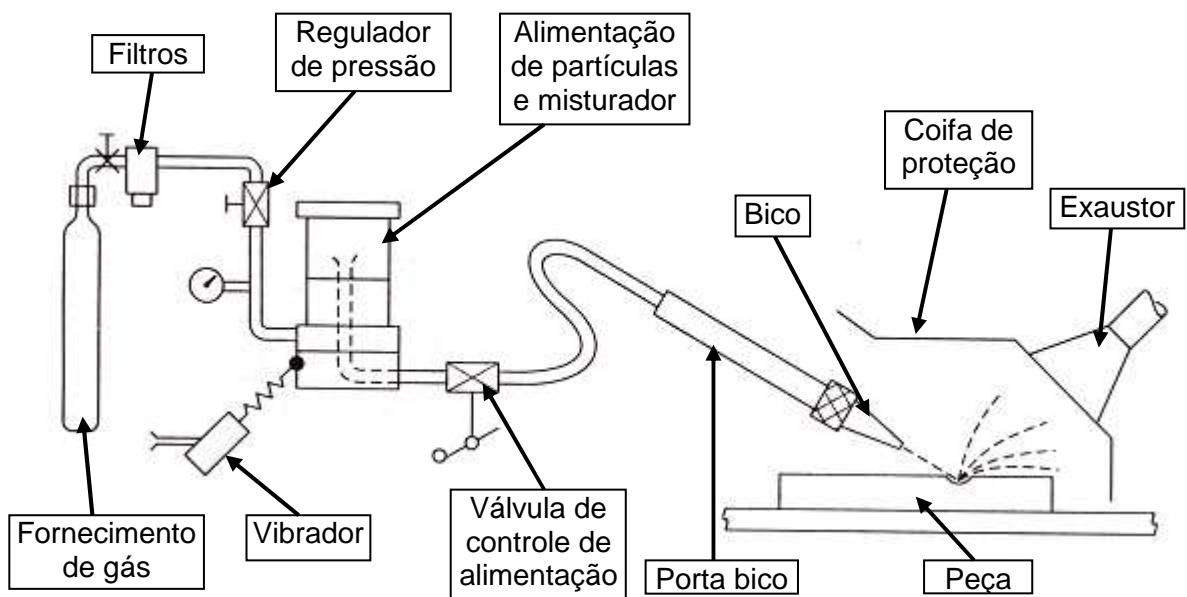


Figura 2.15 – Componentes do sistema de Usinagem por Jato Abrasivo (FULLER, 1989).

2.3.2. Processo de Usinagem com Jato de Água (WJM)

Segundo Benedict (1987), o processo de Usinagem com Jato de Água (*Water Jet Machining* – WJM) utiliza um jato de água fino de alta velocidade que remove material por meio do efeito de erosão. O princípio desse método de corte foi observado pela primeira vez no início do século XX. Vazamentos em linhas de vapor de alta pressão, observados por trabalhadores, resultavam em jatos que tinham potência suficiente para cortar, de forma rápida e limpa, objetos de madeira. Porém, nenhum esforço significativo foi feito para aplicação dessa tecnologia até a década de 60 do século XX, quando a técnica foi patenteada.

A confiabilidade e a eficiência da técnica atingiram níveis satisfatórios apenas na década de 80 do século passado. O elemento chave do processo é um jato de água sob pressão extremamente alta, produzida por intensificador e acumulador (Figura 2.16), com velocidade, aproximadamente, 900 m/s. Quando o fluxo atinge a superfície do alvo, o material é rapidamente removido pela ação da água.

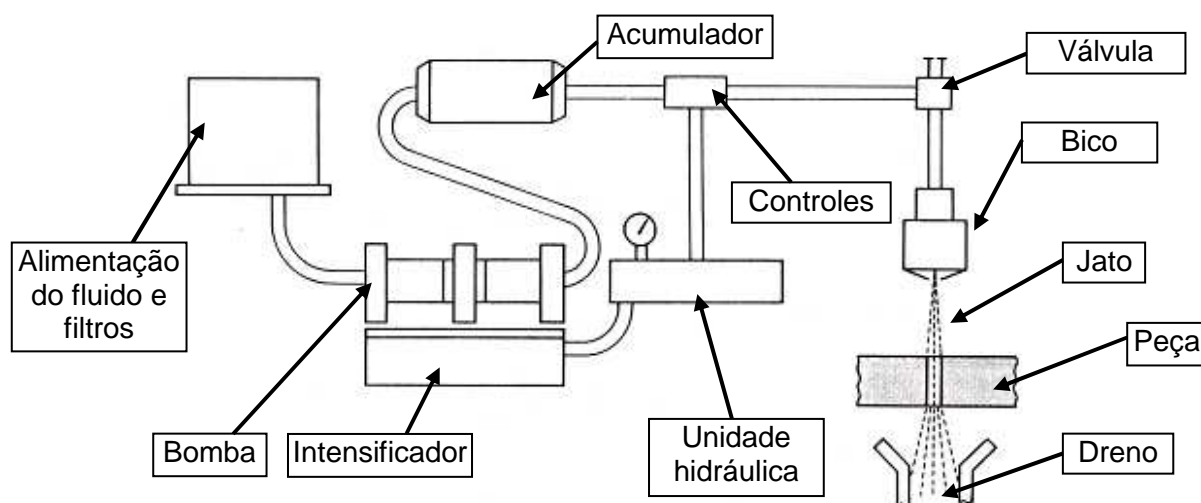


Figura 2.16 – Esquema de montagem do processo WJM (FULLER, 1989).

2.3.3. Processo de Usinagem por Jato de Água Abrasivo (AWJM)

De acordo com Benedict (1987), o processo de Usinagem por Jato de Água Abrasivo (*Abrasive Water Jet Machining* – AWJM) é uma combinação dos processos AJM e WJM. Eles unem a ação erosiva da água com o efeito abrasivo das partículas carregadas por um jato de água sob pressão. Ele é indicado para corte e perfuração de materiais duros.

Segundo Fuller (1989), a utilização do fluxo de jato composto apenas por água com alta velocidade como ferramenta de corte, limita o processo. No entanto, quando partículas abrasivas finas são injetadas no fluxo de água, o processo pode ser utilizado para cortar materiais de elevada dureza. A adição de partículas abrasivas na água aumenta a gama de trabalhos que podem ser realizados pelo jato.

O processo AWJM usa jato de alta velocidade que trabalha com pressões de até 400 MPa (4000 bar) para produzir um fluxo de água que se desloca a uma velocidade de 900 m/s, aproximadamente. Uma corrente de pequenas partículas abrasivas é introduzida e arrastada pelo jato de tal maneira que as partículas misturam-se com fluxo de água, a Figura 2.17 ilustra esse movimento. O fluxo da mistura de água com partículas abrasivas, que saem de um bico *venturi*, possibilita o corte de diversos materiais, tais como metais, vidro, cerâmica e compósitos (BENEDICT, 1987).

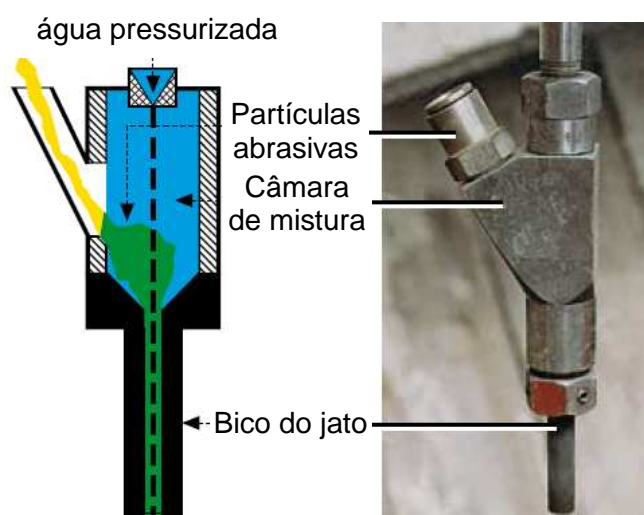


Figura 2.17 – Mistura das partículas abrasivas com o jato de água na câmara de mistura de um bico *venturi* usado no AWJM (WOMA, 2010).

A diferença nos mecanismos de desgaste pode ser observada por meio de uma análise das superfícies danificadas pelo impacto das partículas abrasivas. Com o impacto inicial de partículas em uma superfície metálica dúctil, o material tende a fluir ao redor da partícula. Com um alto ângulo de impacto, ocorre a formação de uma cratera. Ao atingir a mesma, novas partículas deslocam o material para sua redondeza, material, que não é arrancado da superfície. Em alguns casos, a velocidade de impacto pode ser suficiente para quebrar pequenos pedaços, romper e arrastar os mesmos para fora do ponto de contacto. O material será arrancado somente se o deslocamento e movimento das partículas for significativo. O material dúctil é removido por meio de um processo que une fluxo de material e corte, depois de uma transição para um estado plástico (SUMMERS, 1995).

O processo de corte pode ser atribuído às partículas que atingem a superfície riscando o material. O impacto da partícula forma uma cratera e rebarbas ao redor de sua borda, como ilustra a posição da partícula 1 na Figura 2.18. Essas rebarbas são removidas quando atingida por outra partícula, posição da partícula 2 na Figura 2.18 (ZUM GAHR, 1987).

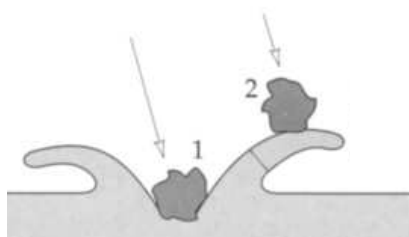


Figura 2.18 – Processo de erosão pelo impacto de partículas sólidas contra a superfície de um material dúctil (SUMMERS, 1995).

Segundo Summers (1995), o mecanismo de falha de um material frágil, quando sujeito ao impacto, pode ser equiparado ao que ocorre quando um indentador pressiona uma superfície. Primeiramente, uma marca é produzida pela pressão do indentador sobre a superfície do material. Ao mesmo tempo, a superfície em torno do contato deforma-se. Com o aumento da carga, devido ao impacto das partículas, a depressão cresce, fissuras radiais são geradas na região deformada em torno do perímetro do material de contacto. O contínuo aumento na pressão irá conduzir à formação de fissuras, que se desenvolvem no material e criam fendas laterais. As fissuras deslocam-se quase paralelamente à superfície, mas dentro dos limites das fissuras radiais (Figura 2.19 (a)). A força sobre a superfície continua a produzir as fissuras. As trincas laterais continuam a alargar-se e se juntam, o que promove a remoção do material (Figura 2.19 (b)). Deste modo, danos mais intensos em materiais frágeis, ocorrem quando as partículas de impacto atuam perpendicularmente à superfície.

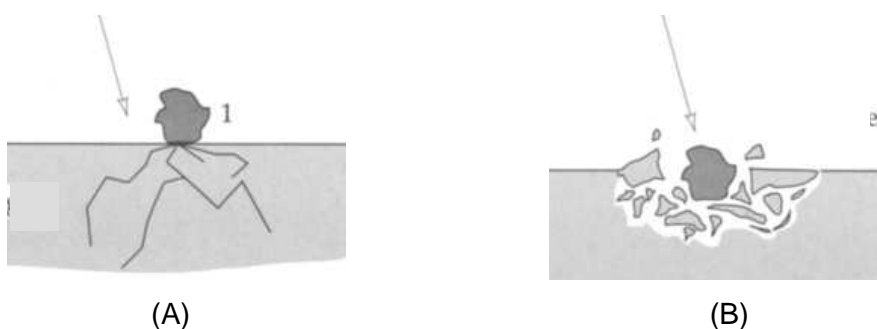


Figura 2.19 – Processo de erosão pelo impacto de partículas sólidas contra a superfície de um material frágil (SUMMERS, 1995). Formação de fendas em (a) e remoção de material em (b).

O ângulo de incidência da partícula influencia o desgaste substancialmente e pode alterar o mecanismo de desgaste. A Figura 2.20 ilustra a relação do ângulo de incidência (ou de ataque) de um fluxo abrasivo em relação ao desgaste. Em materiais frágeis, como os cerâmicos, a resposta à falha vai crescendo com o aumento do ângulo de ataque até atingir o ângulo crítico, nesse caso 90° . Em contraste, os materiais dúcteis, como a maioria dos metais, a taxa de erosão aumenta até atingir um ângulo de aproximadamente 20° , porém, para valores de ângulos maiores que esse a taxa de desgaste diminui, o que mostra a redução do efeito do impacto das partículas abrasivas (SUMMERS, 1995).

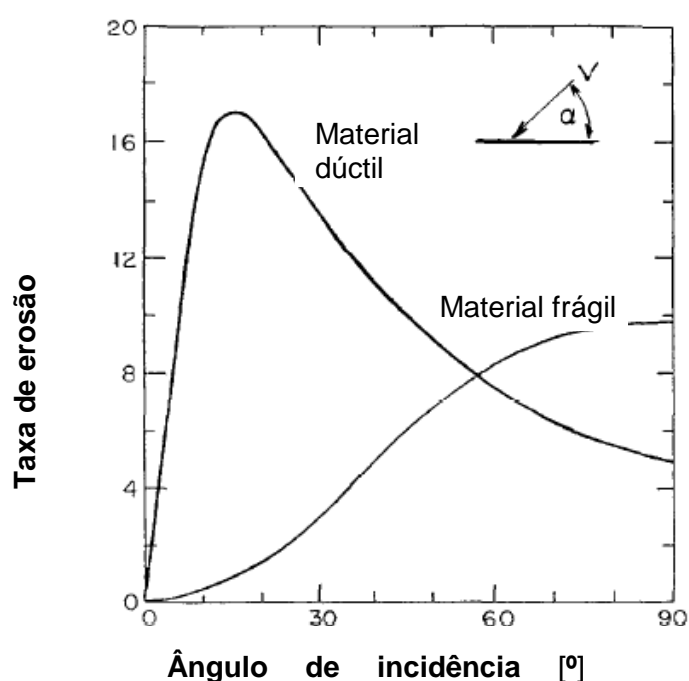


Figura 2.20 – Efeito do ângulo de incidência (ou de ataque) das partículas contra a superfície do material em relação à taxa de erosão (FINNIE, 1995).

Segundo Finnie et al. (1992), nos materiais dúcteis em baixo ângulo de incidência, a partícula forma uma cratera e deixa a superfície. Em ângulos maiores, ocorre o choque e a partícula continua o deslocamento até que sua velocidade se torne nula. No caso do ângulo de 90° , ocorre o deslocamento do material que ficará sujeito ao impacto das partículas posteriores.

De acordo com Shewmon e Sundararajan (1983), a taxa de desgaste de materiais dúcteis se aproxima de zero em ângulos de impacto baixos, sobe para um máximo quando a trajetória da partícula incidente faz um ângulo agudo entre 20° e 30° com a superfície e cai a medida que se aproxima do ângulo normal (90°).

Segundo Junkar et al. (2003), o processo de aceleração das partículas abrasivas começa com a alimentação delas para o interior da câmara de mistura do bico *venturi*, através do orifício de entrada do abrasivo. Durante o processo de aceleração ocorre uma transferência de movimento que proporciona à partícula um ganho de velocidade.

A velocidade de impacto da partícula pode influenciar a taxa de desgaste devido à maior energia de impacto desprendida (ZUM GAHR, 1987). O aumento da pressão do jato produz efeito positivo em termos de acabamento superficial com diminuição da rugosidade. Isto ocorre devido à fragmentação das partículas abrasivas em tamanhos menores (JUNKAR et al., 2003).

A alimentação do abrasivo na câmara de mistura aumenta o desempenho do jato até o ponto em que a entrada de abrasivo, em excesso na câmara de mistura, começa a prejudicar o funcionamento do processo. No entanto, não existe um valor ótimo fixado para a taxa de alimentação do abrasivo. Ela é uma função da capacidade da água transportar e alimentar a câmara de mistura. Assim, o aumento na pressão do jato aumenta também o volume de água que entra na câmara de mistura atingindo a capacidade máxima de carga e, em consequência, a potência do jato (SUMMERS, 1995).

As partículas abrasivas devem garantir que o sistema trabalhe com o máximo benefício. Isso diz respeito não apenas à dimensão e densidade das partículas, mas também à sua forma (SUMMERS, 1995). Com o aumento do tamanho do grão abrasivo, ocorre um aumento na taxa da mistura, incrementando a remoção de material, com efeito prejudicial para o acabamento superficial (MOHAMED, 1983).

A concepção de um sistema de reciclagem de abrasivo dependerá do processo de fragmentação das partículas. O reaproveitamento do carboneto de silício apresentou pouca fragmentação em caso de corte do aço, promovendo resultados semelhantes ao do abrasivo novo (MOHAMED, 1983).

De acordo com Babu e Chetty (2003), algumas partículas abrasivas sofrem degradação durante o processo AWJM. Isso se deve ao impacto que elas recebem quando são arrastadas pelo fluxo do jato de água pressurizado, ao choque de umas com as outras dentro da câmara de mistura do bico *venturi* e ao atingirem o material alvo.

2.3.4. Processo usinagem híbrido AJEDM

De acordo com Pandey e Singh (2010), a aplicação de usinagem híbrida em EDM combina suas vantagens com as de outros processos e reduz alguns dos seus efeitos negativos.

Segundo Arantes (2007), a interação térmica da EDM com a assistência mecânica do processo AWJM, possibilitam a utilização do processo híbrido AJEDM. Este processo promove uma melhor dispersão das descargas elétricas, além da ação erosiva de partículas. Em consequência, tem-se uma maior TRM.

Arantes (2007) realizou testes de AJEDM com três tipos de fluidos dielétricos, óleo mineral, querosene e água deionizada, variando três condições de aplicação do fluido, estático (sem pressão), baixa pressão (25 bar) e alta pressão (100 bar) como abrasivo SiC na granulometria de 600 mesh com concentração de 30 g/l. Os resultados são apresentados na Figura 2.21 (ARANTES, 2007).

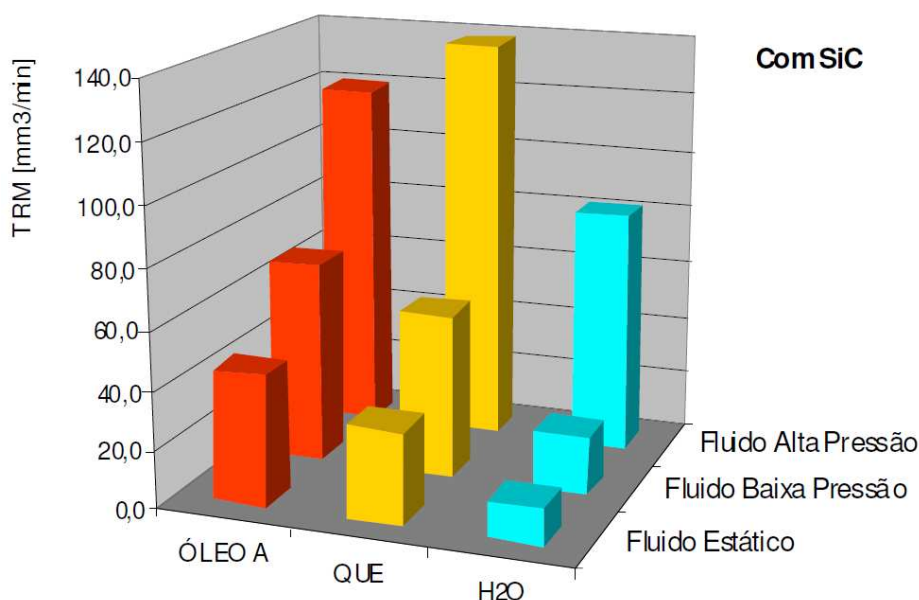


Figura 2.21 – TRM do processo AJEDM usando como fluidos dielétricos óleo mineral, querosene e água deionizada.

Observa-se na Figura 2.21 que com a melhoria no sistema de lavagem, os valores de TRM crescem consideravelmente para os três fluidos. O aumento da pressão torna mais efetiva a ação da lavagem das micro-partículas fundidas e re-solidificadas. Com 100 bar, a água deionizada teve um desempenho aumentado de 8 vezes, enquanto o querosene e o óleo tiveram um ganho de 5 e 3 vezes, respectivamente. Porém, o ganho de TRM da água deionizada (80 mm³/min) ainda é inferior àquela obtida com o querosene (140 mm³/min) e óleo (120 mm³/min). A água e o querosene possuem maior fluidez, o que melhora a capacidade de penetração em pequenas frestas. Por outro lado, sua menor densidade gera menor pressão no canal de plasma. Isso diminui a capacidade térmica das descargas, o que leva a menores valores de TRM.

Na aplicação do jato abrasivo simultaneamente ao processo de EDM, mesmo que ocorra deposição de material na superfície usinada formando a camada refundida, esse material será significativamente removido pela ação do abrasivo, como mostrado na Figura 2.22 (ARANTES, 2009).

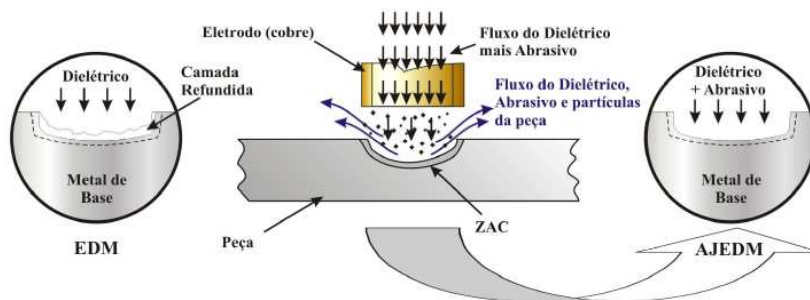


Figura 2.22 – Princípio do processo de usinagem híbrido AJEDM (ARANTES, 2009).

2.4. Propostas do trabalho de pesquisa

Esse trabalho de pesquisa tem como proposta avaliar: a viabilidade da aplicação do sistema *venturi* por meio de uma máquina hidrojetadora, no processo híbrido de usinagem AJEDM (SILVA et al., 2011); o desempenho dos materiais cobre eletrolítico, grafite, aço AISI 52100, aço inoxidável AISI 304, bronze e latão usados como eletrodo-ferramenta no AJEDM na usinagem do aço AISI M2 (CIDREIRO et al., 2010); a influência da variação da pressão do jato de água no processo, usando carboneto de silício com granulometria de 600 mesh (SANTOS et al., 2011); a influência da aplicação de diferentes granulometrias (400, 600 e 1000 mesh) do abrasivo carboneto de silício no AJEDM (SILVA et al., 2011); o desempenho e a degradação dos abrasivos carboneto de silício (SiC) e óxido de alumínio (Al_2O_3), no processo (SILVA et al., 2011). Além de avaliar o desempenho dos abrasivos SiC, Al_2O_3 e B_4C (carboneto de boro) de 320 mesh no AJEDM; a influência na variação da geometria do eletrodo-ferramenta como: chanfro na extremidade. Foram avaliados os parâmetros quantitativos de usinagem: Taxa de Remoção de Material, Taxa de Desgaste da ferramenta e Desgaste Volumétrico Relativo. Foram realizadas análises de microscopia ótica na seção transversal da camada refundida, observando espessura da camada ao longo da cavidade usinada, quantidade e comprimento da micro-trincas, além de ensaios de microdureza Vickers. Foi analisada a morfologia da superfície usinada por meio de microscopia eletrônica de varredura e via análise de energia dispersiva. A água deionizada utilizada no processo foi analisada por meio de fluorescência de raio-x.

CAPÍTULO III

3. Procedimento Experimental

Algumas adaptações na máquina de EDM foram implementadas para viabilizar seu trabalho em conjunto com uma hidrojateadora. Estas adaptações possibilitaram utilizar água deionizada como fluido dielétrico, na forma de jato pressurizado com fluxo de partículas abrasivas alimentadas e misturadas por bico *venturi*. A Figura 3.1 apresenta um cronograma esquemático com as quatro etapas para execução deste trabalho.

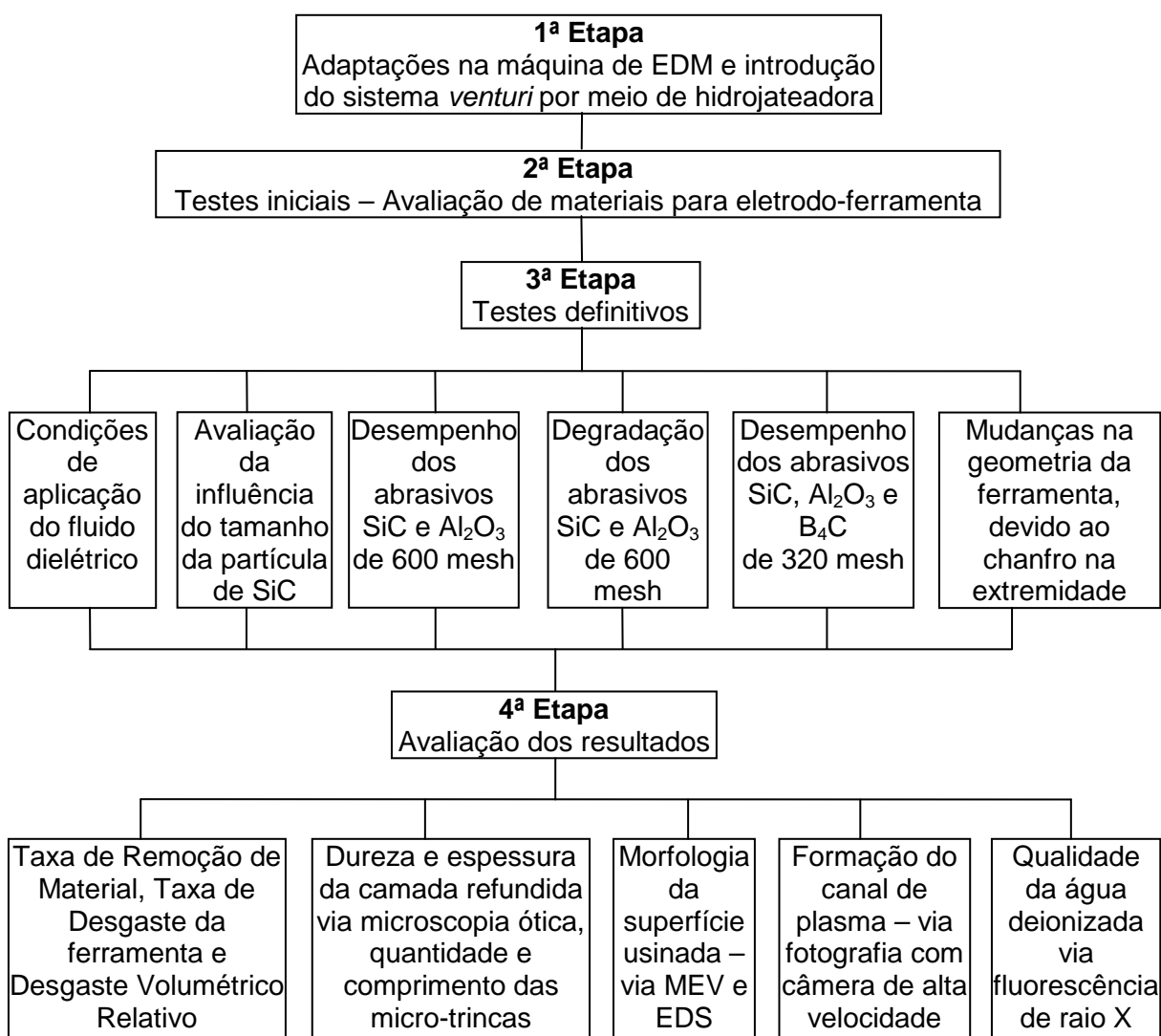


Figura 3.1 – Cronograma esquemático das etapas para o procedimento experimental.

3.1. Adaptações na máquina EDM

O trabalho de pesquisa foi realizado em uma máquina de EDM por penetração, em conjunto com hidrojateadora de pressão nominal 250 bar. A máquina EDM possui um gerador de controle de pulso e opera automaticamente após seleção das funções disponíveis no painel de controle do gerador.

Foi necessário montar uma cuba auxiliar no tanque de trabalho, para que não ocorresse contaminação do fluido dielétrico (óleo mineral) da máquina EDM. O material selecionado foi o aço inoxidável AISI 304 para resistir ao ataque corrosivo da água. A cuba foi fabricada de chapa 18 (1,25 mm de espessura) nas dimensões internas de 350x400x750 mm. A cuba auxiliar possui abas laterais que se estendem por toda periferia de sua abertura para proteção do tanque de trabalho. Foram instaladas também, tampas em aço inoxidável de chapa 18, que evitam os respingos provocados pelo jato de alta pressão. A Figura 3.2 ilustra a cuba auxiliar posicionada no interior do tanque de trabalho da máquina EDM.



Figura 3.2 – Cuba auxiliar em aço inoxidável AISI 304, instalada no tanque de trabalho da máquina EDM.

Juntou-se ao conjunto formado pela máquina EDM mais hidrojateadora, um sistema de alimentação de água deionizada, composto por um aparelho deionizador, tambores para armazenamento de água, manômetro, pistola de alimentação, mangueiras e conexões. A Tabela 3.1 relaciona as características do aparelho deionizador utilizado para produção da água deionizada usada nos testes. O aparelho pode ser regenerado por meio de troca da

resina armazenada na coluna central do deionizador. Cada carga (troca) de resina produz aproximadamente 2000 litros de água deionizada com condutividade elétrica inferior a 3 μS , conforme informações do fabricante. O monitoramento da rigidez dielétrica pode ser acompanhado por meio de uma lâmpada instalada no aparelho, que acende quando a condutividade elétrica ultrapassa o valor de 3 μS .

Foi necessário o armazenamento de água deionizada em tambores de plástico de 200 litros, antes de cada série de testes. A pressão de trabalho da água foi monitorada por meio de um manômetro instalado na mangueira de saída da máquina hidrojetadora.

Tabela 3.1 – Características do aparelho deionizador.

| Característica | Valor | Unidade |
|--|--------|---------------|
| Produção de água deionizada | 50 | l/h |
| Produção de água deionizada por carga de resina | 2000 | l |
| Quantidade de resina na coluna a cada troca | 5 | kg |
| Custo de resina a cada troca | 160,00 | R\$ |
| Condutividade dielétrica da água produzida a cada troca (regulada) | < 3 | μS |

Adaptou-se ao conjunto formado pela máquina EDM mais hidrojetadora um sistema de alimentação do abrasivo, composto por alimentador (acessório que faz parte dos equipamentos adquiridos junto com a máquina hidrojetadora, ilustrado na Figura 3.3), barrica de abrasivo, mangueira e conexões.



Figura 3.3 – Alimentador de abrasivo, acessório da máquina hidrojetadora.

Um suporte para fixação das amostras foi instalado no fundo da cuba auxiliar para posicionamento das amostras. Outro suporte para adaptação do bico *venturi* e posicionamento do eletrodo-ferramenta foi fabricado e fixado no cabeçote da EDM, conforme ilustrado na Figura 3.4.

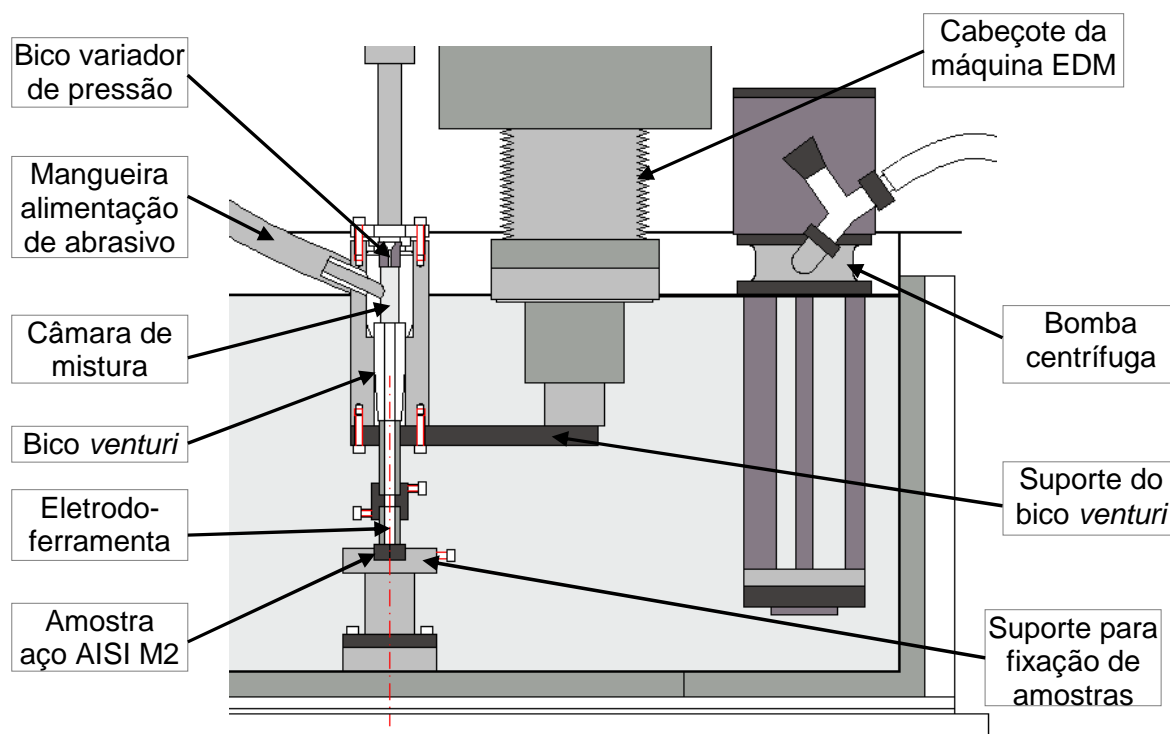


Figura 3.4 – Portas amostra fixado no fundo da cuba auxiliar e suporte para posicionamento do bico *venturi* e eletrodo-ferramenta.

As pressões de trabalho aplicadas foram de 80, 130, 170 e 240 bars. Essas pressões são alcançadas mediante a troca do bico variador de pressão fornecido pelo fabricante da hidrojateadora, instalado na entrada de água na região superior do bico *venturi*. A Figura 3.3 ilustra ainda, o posicionamento do bico variador de pressão. Existe um bico para cada uma das pressões de trabalho.

Uma bomba centrífuga, instalada na tampa, foi utilizada para esvaziar a cuba auxiliar. A mistura de água com abrasivo foi armazenada em tambores de plástico para decantação das partículas abrasivas. Este procedimento teve como objetivo, auxiliar na reciclagem das partículas abrasivas utilizadas no processo AJEDM. Após aplicação do processo de usinagem, o abrasivo decantado foi colocado em uma bandeja para secagem ao ar livre.

A Figura 3.5 ilustra uma foto das adaptações realizadas no cabeçote da máquina EDM. Pode-se observar a bomba centrífuga para esvaziar a cuba auxiliar fixada na tampa. E ainda, a pistola de alta pressão da hidrojateadora para alimentação de água deionizada conectada ao suporte, onde foram posicionados o bico *venturi* e a mangueira de alimentação do abrasivo. A bomba centrífuga era acionada 3 minutos após o início de cada teste, para evitar o transbordamento de água.



Figura 3.5 – Adaptações no cabeçote da máquina EDM.

Uma bomba submersa, posicionada dentro do tambor com a mistura de água mais abrasivo, foi utilizada na filtragem da água para eliminar as partículas abrasivas não decantadas no fundo do tambor. A filtragem da água deionizada após o processo AJEDM foi realizada por meio de dois filtros que contém elemento filtrante de carvão ativado. O primeiro retém partículas de até 25 μm e o segundo até 5 μm . As partículas maiores foram separadas da mistura, manualmente, depois de um tempo para repouso das mesmas no fundo do tambor.

A Figura 3.6 ilustra um desenho esquemático do conjunto formado pelas máquinas, equipamentos e os acessórios necessários para realização do processo de usinagem AJEDM com o bico *venturi*.

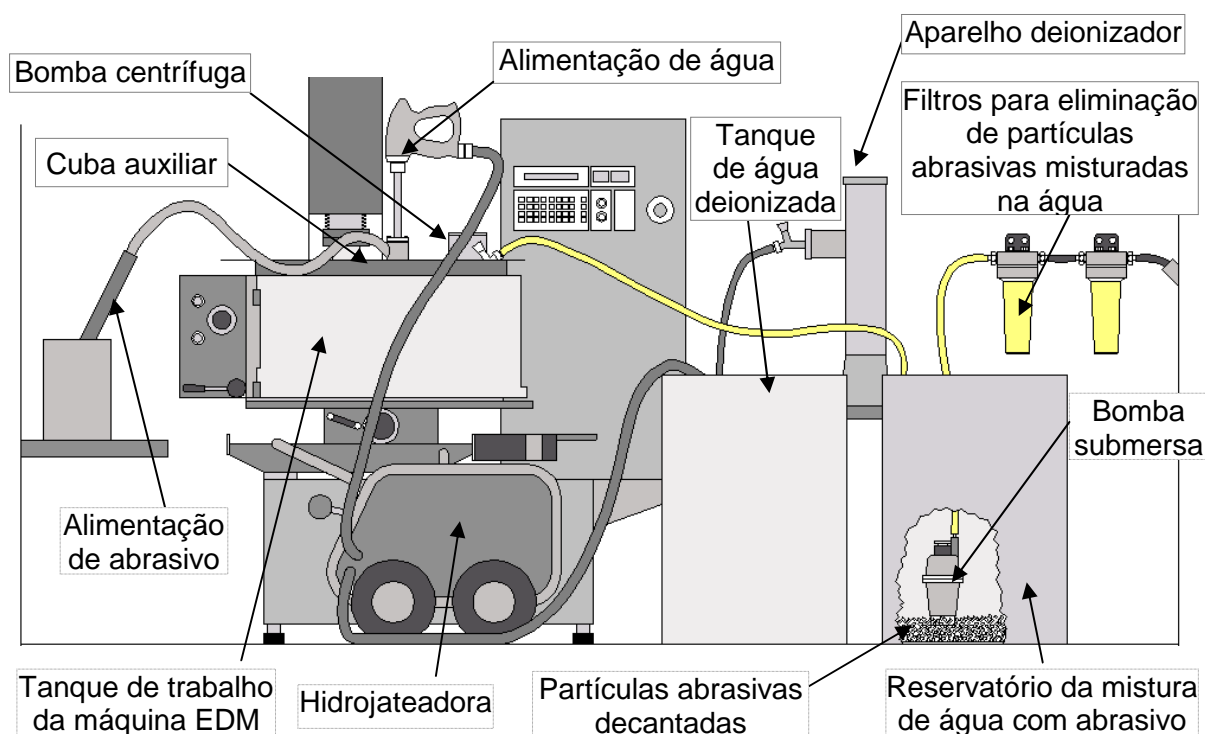


Figura 3.6 – Desenho esquemático do processo de usinagem híbrido AJEDM utilizando o bico *venturi*.

O Anexo 1 apresenta uma relação detalhada do levantamento dos custos de material e mão de obra, para fabricação e/ou aquisição dos componentes necessários para as adaptações.

3.2. Seleção dos testes

As adaptações implementadas na máquina de EDM possibilitaram a utilização do processo de usinagem híbrido AJEDM com bico *venturi*, e a aplicação dos testes para avaliação de diversos parâmetros como: seleção de materiais para eletrodo ferramenta, efeito da variação da pressão de trabalho, efeito do tipo e granulometria do abrasivo, degradação das partículas abrasivas, influência do ângulo de ataque do jato abrasivo e influência da dimensão do furo de alimentação do fluido dielétrico na ferramenta.

Os testes tiveram duração de 5 minutos cada, executados três vezes para cada condição, exceto na série de testes que avaliaram a degradação do abrasivo. A vazão de trabalho da hidrojateadora foi fixada em 1000 litros por hora, com consumo de aproximadamente 80 litros por teste. A condutividade da água deionizada foi verificada com um condutivímetro, mantendo-se inferior a 10 μS . O consumo das partículas abrasivas nos

testes AJEDM foi monitorado por meio de pesagem da quantidade de abrasivo no início e no final de cada teste.

Em todas as séries de testes foram usinadas barras de aço AISI M2 com seções transversais quadradas de 12,7 mm e 6,3 mm, ambas com 25 mm de comprimento. Na avaliação da influencia da variação da geometria os comprimentos variação em função da superfície de contato da superfície com a amostras.

3.2.1. Avaliação de materiais para eletrodo-ferramenta

Foram realizados testes para avaliação do material do eletrodo-ferramenta. Pelo fato do processo AJEDM ser misto, ou seja, exigir do material da ferramenta características de boa condutividade elétrica e ponto de fusão (EDM) e resistência mecânica (desgaste erosivo), selecionaram-se materiais para confecção de eletrodos-ferramenta que apresentassem essas características diferenciadas. Entre eles: aço AISI 52100, aço AISI 304, bronze, cobre, grafite e latão.

Os eletrodos-ferramenta foram confeccionados no formato tubular com diâmetro externo de 12,7 mm e furo interno com 6,3 mm por 50 mm de comprimento.

Nos ensaios para seleção do material para eletrodo-ferramenta foi utilizado como abrasivo carboneto de silício de granulometria 600 mesh na pressão de trabalho de 100 bar.

3.2.2. Avaliação da pressão de trabalho, tipo e tamanho dos abrasivos SiC e Al_2O_3

Foram realizados ensaios para avaliar o efeito da variação da pressão de trabalho, a influência do tamanho das partículas abrasivas no desempenho e na degradação dos abrasivos. A Tabela 3.2 apresenta as séries de testes relacionadas com os tipos de abrasivos, carboneto de silício (SiC) e óxido de alumínio (Al_2O_3). Como eletrodo-ferramenta foi utilizado cobre eletrolítico no formato tubular com diâmetros externo 19 mm e interno 6,3 mm por 30 mm de comprimento. Foram realizados três ensaios, com duração de 5 minutos cada, exceto na avaliação da degradação. Para avaliação da degradação foram realizadas sete séries de testes de cada dos abrasivos SiC e Al_2O_3 de granulometria 400 mesh, reciclando os abrasivos. Nas duas primeiras séries de testes para avaliar a degradação, foi possível realizar testes de 5 minutos. Nas séries intermediárias, terceira, quarta e quinta a quantidade foi suficiente para 4 minutos, apenas. Nas duas últimas (sexta e sétima) séries, para 3 minutos de teste, somente.

Tabela 3.2 – Testes para avaliação do efeito dos abrasivos SiC e Al_2O_3 .

| Parâmetro | Abrasivo | Granulometria [mesh] | Pressões [bar] | Duração [min] |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------|------------------|
| Variação da pressão | SiC e Al_2O_3 | 600 | 80,130,170 e 240 | 5 |
| Tamanho da partícula | SiC | 400, 600 e 1000 | 240 | 5 |
| Desempenho do abrasivo | SiC e Al_2O_3 | 600 | 240 | 5 |
| Degradação do abrasivo | SiC e Al_2O_3 | 400 | 240 | 5, 4 e 3 |

3.2.3. Avaliação da influência da variação da geometria do eletrodo-ferramenta

Para avaliar a influência da variação da geometria do eletrodo-ferramenta, foram realizados ensaios com abrasivo SiC na granulometria de 500 mesh. A pressão de trabalho aplicada foi 240 bar. Como material do eletrodo-ferramenta foi usado cobre eletrolítico no formato tubular com diâmetro externo 19 mm e interno 6,3 mm com diferentes comprimentos. Foram realizados ensaios com os ângulos na extremidade do eletrodo-ferramenta de 30°, 45° e 60°, que geraram as áreas da superfície de mm^2 , respectivamente. A Figura 3.7 ilustra três formatos das ferramentas utilizadas nos ensaios.

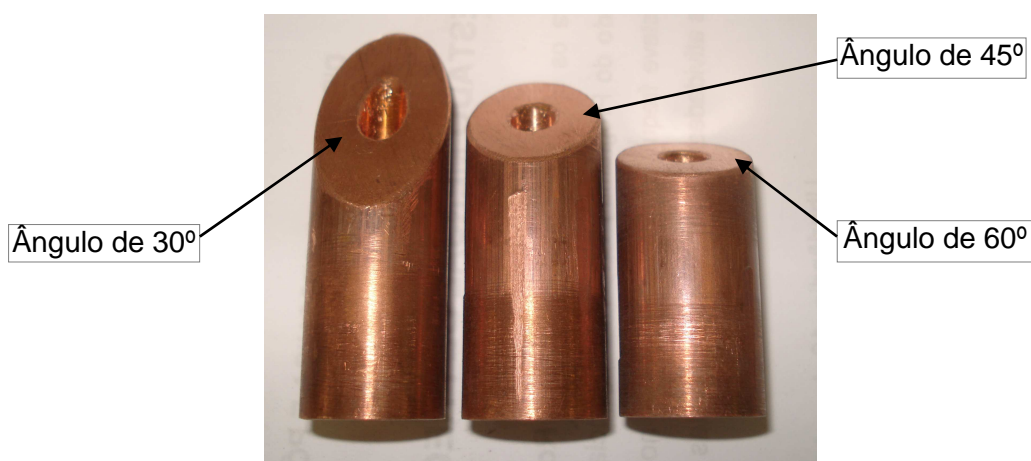


Figura 3.7 – Eletrodos-ferramenta de cobre usados na avaliação da variação da geometria.

A Figura 3.8 ilustra a montagem do eletrodo-ferramenta posicionado para teste da avaliação da variação da geometria com ângulo na extremidade de 30°.

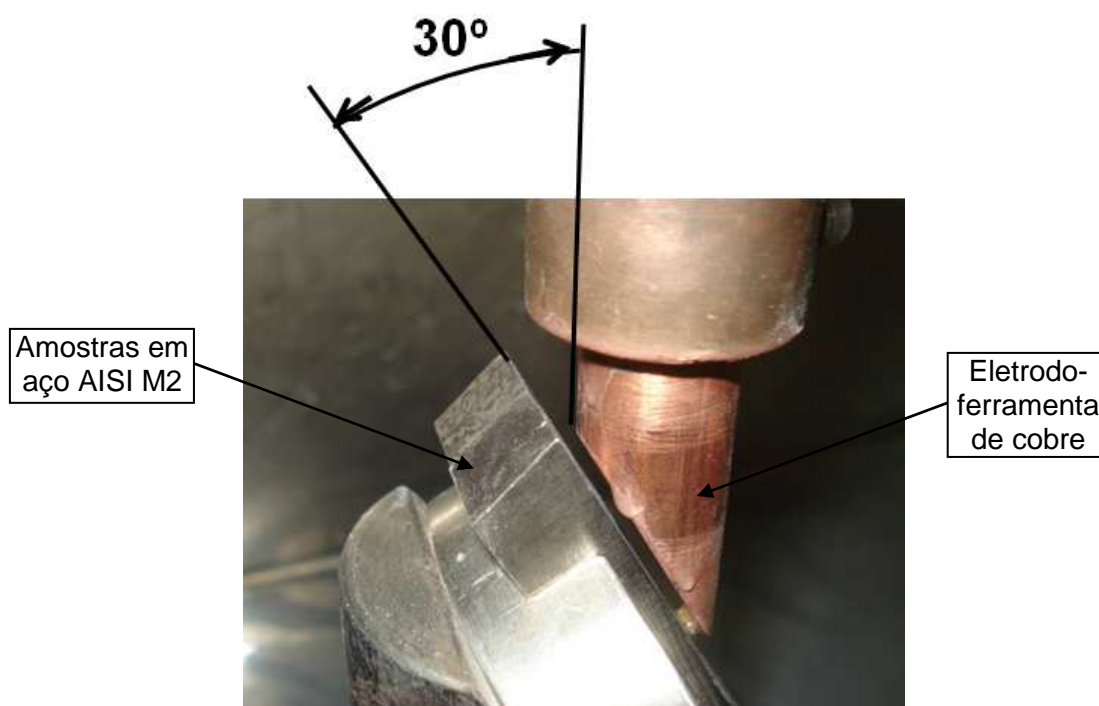


Figura 3.8 – Montagem do eletrodo-ferramenta com chanfro de 30° na extremidade.

3.2.4. Avaliação dos abrasivos SiC , Al_2O_3 e B_4C de 320 mesh no AJEDM

Foram realizados testes para avaliação do desempenho dos abrasivos SiC , Al_2O_3 e carboneto de boro (B_4C) de 320 mesh em relação ao comportamento dos mesmos referentes à TRM, TD e DVR na usinagem do aço AISI M2 com eletrodo-ferramenta de cobre no formato tubular com diâmetros externo 19 mm e interno 6,3 mm por 30 mm de comprimento.

3.3. Determinação dos parâmetros de EDM

Os regimes de trabalho escolhidos para as séries de testes foram de desbaste médio e severo, de acordo com os ajustes da corrente possibilitados pela máquina de EDM. A corrente da descarga elétrica consumida no processo exerce influência direta na qualidade da superfície e no rendimento da operação. Com isto, uma melhor qualidade implica em corrente baixa e pouca quantidade de material removido com tempo de usinagem maior. No caso da máquina utilizada nos experimentos, o valor da corrente depende do parâmetro TS (*Transistor Standard*), regulado, ela (a corrente) vale 3 vezes TS. A Tabela 3.3 apresenta as séries de testes e o valor do TS ajustado.

Tabela 3.3 – Regime de trabalho usado nas séries de testes.

| Tipo de teste | TS | Corrente[A]* | Regime de trabalho |
|---|----|--------------|--------------------|
| Seleção de materiais para eletrodo ferramenta | 6 | 18 | Desbaste médio |
| Avaliação da variação da pressão de trabalho | 6 | 18 | Desbaste médio |
| Efeito do tamanho da partícula abrasiva | 6 | 18 | Desbaste médio |
| Avaliação do desempenho do abrasivo | 6 | 18 | Desbaste médio |
| Efeito da degradação da partícula abrasiva | 6 | 18 | Desbaste médio |
| Efeito do chanfro na extremidade | 10 | 30 | Desbaste severo |

(*) Os valores da corrente sofrem variações que são observadas no *display* da máquina, durante o processo de usinagem AJEDM.

Os demais parâmetros de EDM são compatíveis com os estabelecidos por Arantes (2007) no desenvolvimento do processo AJEDM, exceto o *gap* e a sensibilidade do *gap*. A Tabela 3.4 apresenta esses parâmetros.

Tabela 3.4 – Parâmetros de EDM usados nas séries de testes.

| Parâmetro | Unidade | |
|---|----------|----|
| Polaridade do eletrodo ferramenta (cobre eletrolítico/grafite) em aço | Positiva | |
| Tensão | 100* | V |
| Corrente | 18 e 30 | A |
| TS (1/3 da corrente) | 6 e 10 | |
| T _{on} | 200 | μs |
| DT | 70 | % |
| Tempo de erosão | 6 | s |
| Afastamento periódico da ferramenta ou retração | 0,4 | mm |
| Intervalo entre tempo de erosão e afastamento periódico | 0 | s |
| Gap | 2 | |
| Sensibilidade do gap | 8 | |

(*) Os valores da tensão sofrem variações que são observadas no *display* da máquina, durante o processo de usinagem AJEDM.

A polaridade indica a posição dos eletrodos ferramenta e peça, se anodo ou catodo, em relação às descargas elétricas. A polaridade pode ser invertida trocando a posição dos cabos de alimentação da corrente elétrica, um fixado no tanque de trabalho da máquina e o outro no cabeçote da EDM.

A tensão para ionização e formação do canal de plasma foi mantida constante, de acordo com os parâmetros estabelecidos pelo manual do fabricante da máquina.

O DT (*Duty Time*) está relacionado com os tempos de pausa, t_{off} e duração do pulso, t_{on} , no caso da máquina usada no experimento o mesmo é ajustado diretamente no painel de controle. A Equação (3.1) expressa seu valor em porcentagem [%].

$$DT = \frac{t_{on}}{(t_{on} + t_{off})} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3.1)$$

Onde: t_{on} = tempo de pulso [μ s] e t_{off} = tempo de pausa [μ s].

Foram ajustados os parâmetros de tempo de erosão, retração da ferramenta e intervalo, de acordo com os parâmetros estabelecidos por Arantes (2007).

Foram ajustados ainda o *gap* (fenda de trabalho) e sensibilidade do *gap*, diretamente no painel da máquina.

3.4. Parâmetros ou aspectos avaliados

Nos experimentos a amostra (eletrodo-peça) e o eletrodo-ferramenta foram pesados três vezes antes e após cada teste. Utilizou-se uma balança eletrônica com capacidade máxima para 310 gramas e resolução de 10^{-3} g. O eletrodo-ferramenta de grafite foi secado em forno durante 4 horas na temperatura de 300 °C, aproximadamente, antes de cada pesagem.

A variação de massa foi determinada pela diferença entre as massas inicial e final, obtida da Equação (3.2), expressa em gramas [g].

$$\Delta_m = m_i - m_f \quad (3.2)$$

onde: m_i = massa inicial [g] e m_f = massa final do eletrodo [g].

Para quantificar a TRM, foi utilizada a Equação (3.3), expressa em milímetro cúbico por minuto [mm^3/min].

$$TRM = \frac{\Delta_m}{(0,00768) \cdot t} \quad (3.3)$$

onde: Δ_m = variação de massa da peça [g], t = tempo de usinagem [min] e a constante 0,00768 g/mm^3 corresponde ao peso específico do aço AISI M2.

Para quantificar a TD do eletrodo-ferramenta, foi utilizada a Equação (3.4), expressa em milímetro cúbico por minuto [mm^3/min].

$$TD = \frac{\Delta_m}{\rho \cdot t} \quad (3.4)$$

onde: Δ_m = variação de massa da ferramenta [g], t = tempo de usinagem [min] e ρ [g/mm^3] corresponde ao peso específico do material do eletrodo-ferramenta.

A Equação (3.5) foi usada para determinar o DVR, que é a relação entre TD e TRM, expresso em porcentagem [%].

$$DVR = \frac{TD}{TRM} \cdot 100 \quad (3.5)$$

A espessura da camada refundida que se forma ao longo da seção transversal da cavidade usinada, o número e o comprimento das micro-trincas foram determinadas por meio de microscopia ótica. Foram contadas e medidas as micro-trincas de metade da seção transversal da cavidade usinada.

Para visualização da morfologia da superfície usinada foi utilizado microscópio eletrônico de varredura. Os eletrodos foram limpos por meio de aparelho de limpeza ultra sônica.

A microdureza da camada refundida foi determinada com o auxílio de microdurômetro. Foram realizadas três medições de microdureza Vickers com carga de 10 gramas.

O canal de plasma formado pelas descargas elétricas na usinagem com óleo mineral e água deionizada com e sem abrasivos foi observado por meio de câmera fotográfica de alta velocidade. Na condição de água deionizada com adição dos abrasivos foram utilizados SiC e Al_2O_3 , ambos com granulometria de 600 mesh. Utilizou-se eletrodo-ferramenta de cobre com formato cilíndrico e chanfro na ponta. Como eletrodo-peça foram usadas barras aço AISI M2. O fluido dielétrico foi utilizado sem bombeamento. A Figura 3.9 ilustra o posicionamento da câmera fotográfica na frente da máquina de EDM, para aquisição das imagens. As descargas elétricas ocorreram dentro de uma pequena cuba auxiliar, posicionada sobre a mesa do tanque de trabalho da EDM. As descargas elétricas foram observadas através de uma janela lateral de vidro, instalada na cuba auxiliar.



Figura 3.9 – Montagem da câmera fotográfica de alta velocidade na frente da máquina de EDM para aquisição de imagens.

Para avaliar a qualidade da água filtrada pelos filtros de carvão ativado, com relação à presença de partículas, foi realizada uma análise de fluorescência de raio X com configuração EDX.

Fluorescência é um fenômeno físico em que uma amostra (sólida ou líquida) emite luz quando excitada por alguma fonte de energia como um feixe de elétrons, por exemplo. A luz emitida pela amostra está relacionada à sua constituição atômica elementar. Existe uma relação entre o número atômico Z e seu espectro de energia. Esta relação é característica de cada elemento químico, ou seja, cada elemento da tabela periódica possui seu espectro de energia. A partir dessa relação, os espectros de energia da amostra são decompostos em seus diversos elementos presentes.

3.5. Coleta das micro-partículas erodidas misturadas ao pó abrasivo

Algumas partículas do pó abrasivo (SiC , B_4C ou Al_2O_3) que participaram do processo de usinagem, bem como das micro-partículas erodidas da superfície usinada do aço AISI M2 foram coletadas. Um tubo de aço foi posicionado no fundo da cuba auxiliar, de modo que o suporte para fixação das amostras ficasse no interior desse tubo, conforme Figura 3.10. Esse procedimento manteve uma quantidade das micro-partículas erodidas e do abrasivo depositados na cavidade usinada.

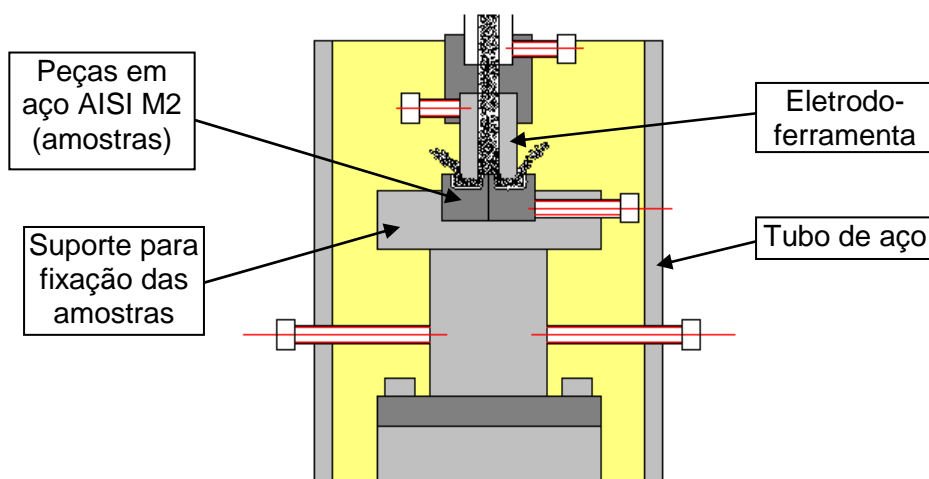


Figura 3.10 – Posicionamento do tubo para auxiliar na coleta das partículas abrasivas e das micro-partículas erodidas.

3.6. Problemas nos ensaios e na preparação metalográfica das amostras

No início da operação de usinagem, o processo flui normalmente e a pressão de sucção do *venturi* é suficiente para arrastar as partículas abrasivas que alimentam a câmara de mistura. Porém, após alguns segundos de funcionamento, o sistema de alimentação de abrasivos começa a falhar, ocorrendo retorno do jato de água pressurizado pela mangueira de alimentação de abrasivos.

A Figura 3.11, mostra um desenho esquemático das duas condições, o início do processo (a) e o instante em que ocorre a situação desfavorável (b).

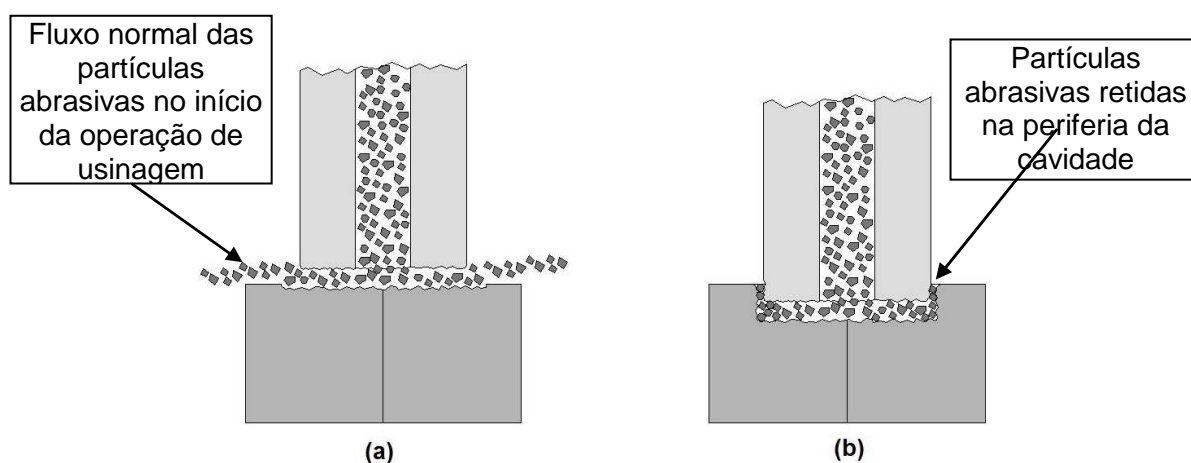


Figura 3.11 – Deslocamento da ferramenta contra a superfície da peça durante o processo AJEDM. No início da usinagem (a) e quando a ferramenta começa a penetrar na peça (b).

A pequena fenda de trabalho não permite o fluxo de partículas abrasivas entre os eletrodos ferramenta e peça. No início da usinagem no AJEDM o fluxo de água com abrasivo circula, sem dificuldades, sobre a superfície da peça na fenda de trabalho formada entre os eletrodos ferramenta e peça. Porém, no instante em que o eletrodo-ferramenta começa a penetrar na peça, ocorre um entupimento no sistema de alimentação do abrasivo. Para solucionar este problema, foi necessário executar um furo passante de 6,3 mm de diâmetro, no corpo da peça que liga a pinça, que prende o eletrodo-ferramenta no suporte de fixação. Este furo possibilita a passagem do fluxo de água deionizada mais abrasivo, evitando o retorno de água pela mangueira de sucção do abrasivo. A Figura 3.12 mostra o conjunto formado pelo eletrodo-ferramenta, pinça e peça de ligação. Pode-se observar o furo passante de 6,3 mm no corpo da peça de ligação.

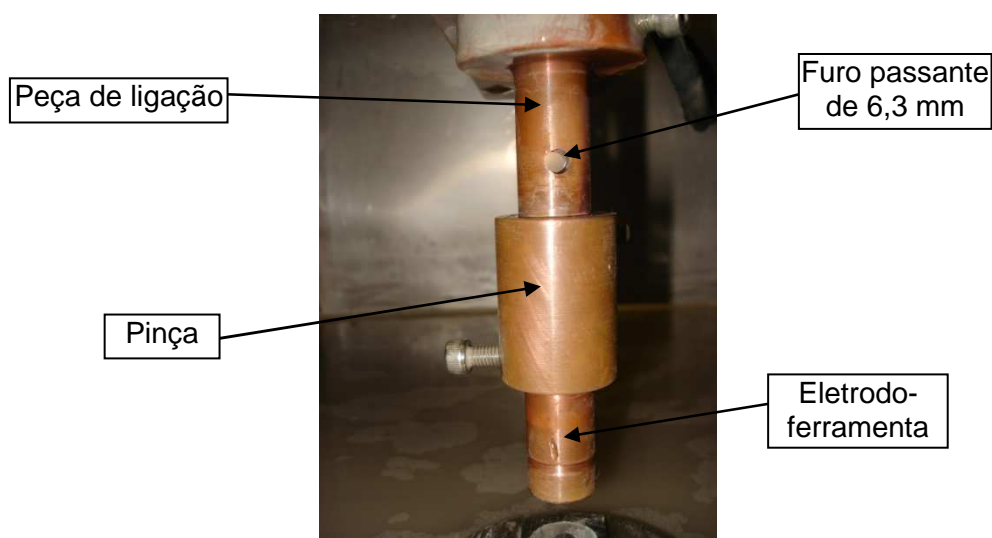


Figura 3.12 – Eletrodo-ferramenta fixado na pinça e peça de ligação.

Uma pinça fez-se necessária, devido ao desgaste erosivo observado nos primeiros eletrodos-ferramenta que foram confeccionados com comprimento de 100 mm. A Figura 3.13 ilustra o desgaste provocado pelo fluxo do jato abrasivo no topo da ferramenta. Esse desgaste poderia comprometer o cálculo da TD da ferramenta.



Figura 3.13 – Desgaste erosivo provocado pelo jato abrasivo no eletrodo-ferramenta.

Observou-se que a alimentação de grande quantidade de abrasivo não permite o funcionamento adequado do processo de usinagem AJEDM. Ocorreram falhas no sistema das descargas elétricas da máquina EDM, nas primeiras operações, utilizando o abrasivo SiC de granulometria 400 mesh. O excesso de partículas abrasivas na fenda de trabalho provoca curto circuito.

O excesso de partículas abrasivas proporcionado pelo sistema de alimentação pode provocar, ainda, o entupimento do orifício de entrada na câmara de mistura do bico *venturi*. A Figura 3.14 ilustra este problema. Para solucioná-lo, deve-se controlar a quantidade de abrasivos que entra no sistema, não permitindo a passagem excessiva de abrasivo.

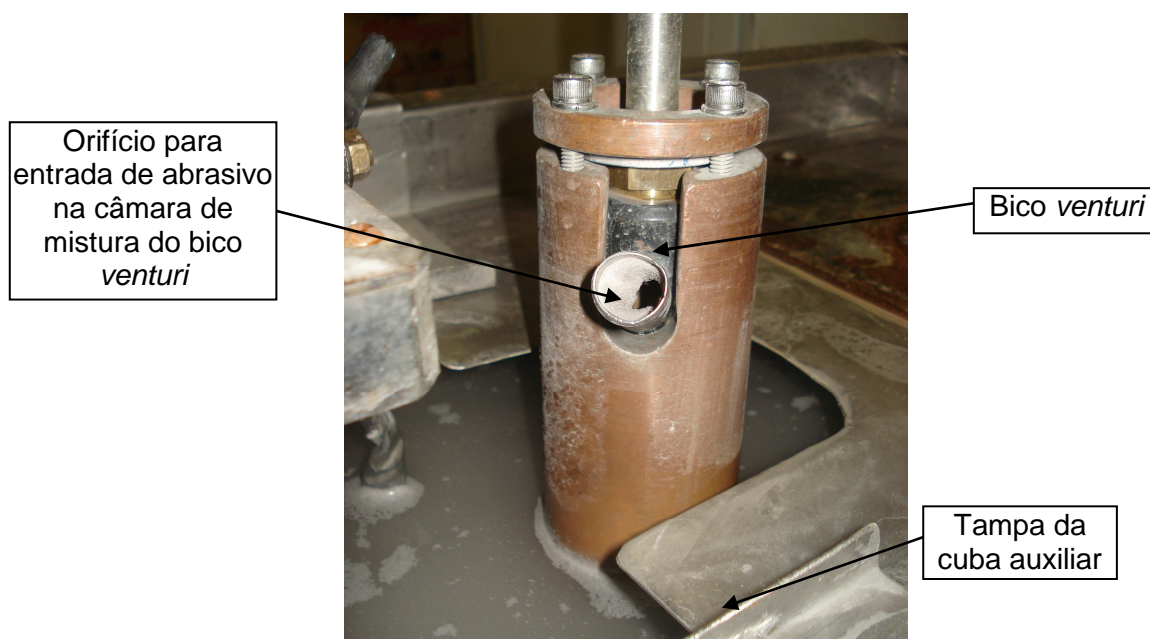


Figura 3.14 – Entupimento do orifício da entrada de abrasivo na câmara de mistura do bico *venturi* provocado pelo excesso de partículas.

Nos primeiros trabalhos observou-se que na preparação metalografica das amostras, ocorria quebra da camada refundida em algumas regiões, ao longo da seção transversal. A utilização de amostras de aço AISI M2 no formato quadrado de 12,7 mm, inicialmente, obrigava o corte das mesmas para viabilizar o embutimento. Porém, a introdução de peças do aço M2 com seção quadrada de 6,3 mm, evitou-se o corte, possibilitando a preservação integral da camada refundida. E ainda, para conservação de toda camada refundida as amostras foram embutidas em pares, de modo que uma cavidade usinada ficou de frente para outra. A Figura 3.15 ilustra as amostra embutidas. Esse procedimento possibilita também a proteção da camada refundida durante as operações de lixamento e polimento.

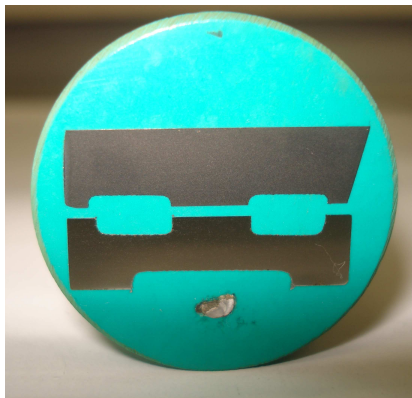


Figura 3.15 – Amostra preparada para análise por meio de microscopia ótica.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Avaliação de materiais para eletrodo-ferramenta

As Figuras 4.1 a 4.3 apresentam os resultados de TRM, TD e DVR, respectivamente, referentes ao desempenho dos materiais usados como eletrodo-ferramenta no processo AJEDM. Usou-se água deionizada na pressão de trabalho de 100 bar com carboneto de silício na granulometria de 600 mesh.

Em relação à TRM, pela ordem, a grafite, o cobre e o latão apresentaram desempenhos melhores que os demais materiais.

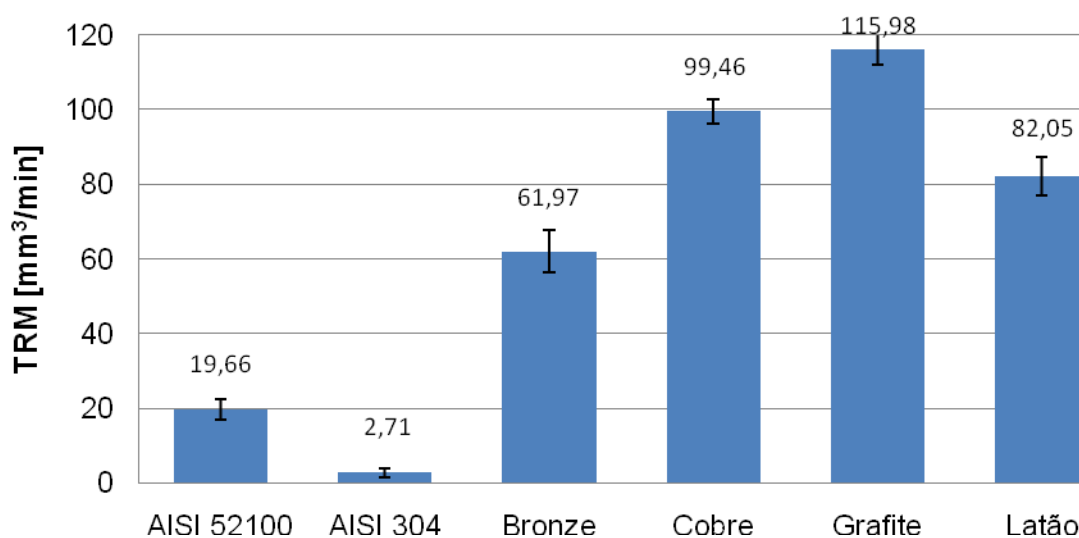


Figura 4.1 – TRM para diferentes materiais usados como eletrodo-ferramenta.

Em relação à TD, o bronze e o latão sofreram a maior perda de material em comparação com os outros materiais.

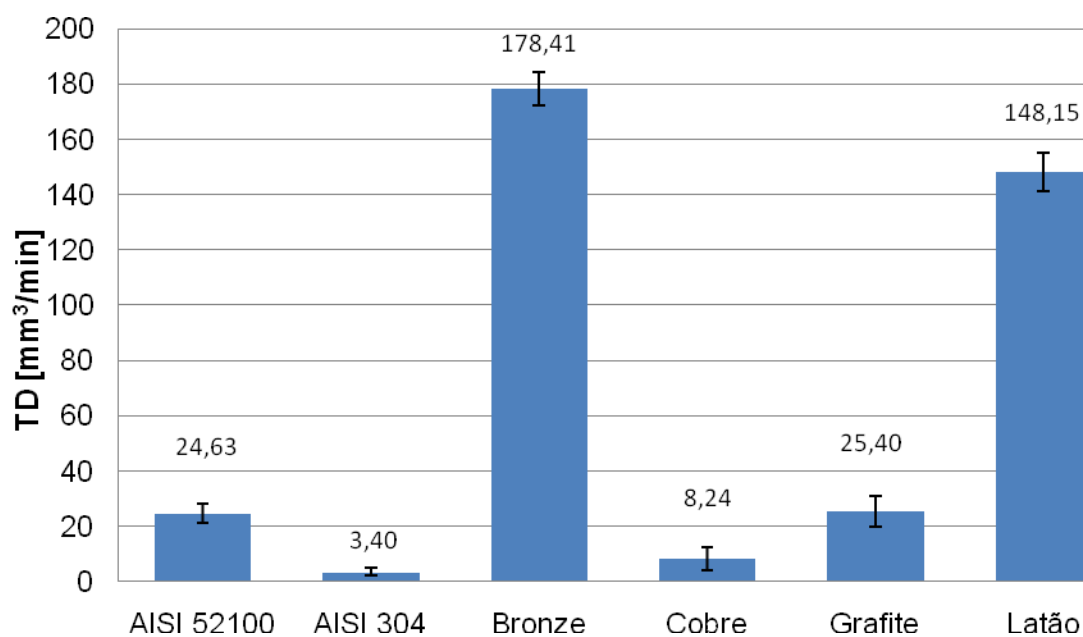


Figura 4.2 – TD para diferentes materiais usados como eletrodo-ferramenta.

Em relação ao DVR, observa-se que os melhores comportamentos foram do cobre (10%) e da grafite (24%).

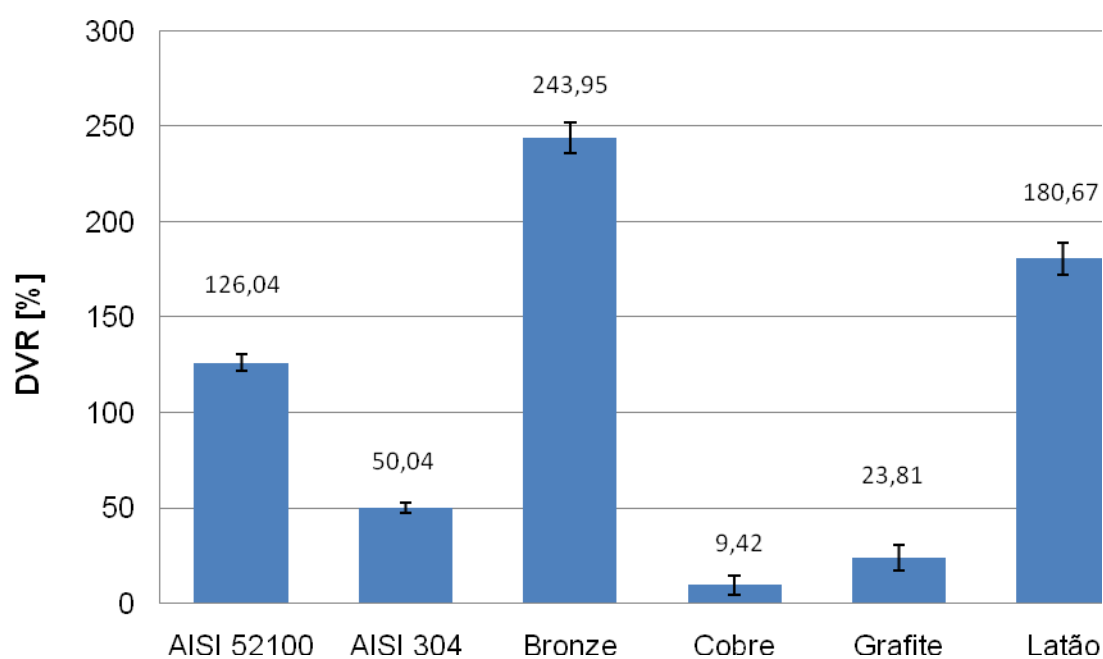


Figura 4.3 – DVR para diferentes materiais usados como eletrodo-ferramenta.

As diferentes respostas dos eletrodos podem ser explicadas por suas propriedades físicas e mecânicas, especificadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Condutividade elétrica e propriedades mecânicas dos materiais dos eletrodos-ferramenta.

| Material da ferramenta | Condutividade elétrica, σ [S.m/mm²] | Ponto de fusão, T_f [°C] | Dureza, H_v [kgf/mm²] | Fragilidade, K_{Ic} [MPa.m^{1/2}] |
|-------------------------------|---|--|--|---|
| Aço AISI 52100 | 8,76 ³ | 1590 ³ | 848 ³ | 50 ⁵ |
| Aço AISI 304 | 2,8 ³ | 1400 ³ | 129 ³ | 175 ³ |
| Bronze | 14,9 ³ | 1020 ¹ | 140 ³ | 100 ¹ |
| Cobre | 61,7 ³ | 1080 ¹ | 100 ³ | 100 ¹ |
| Grafite | 0,07 ³ | 3550 ² | 40 ³ | 1 ⁴ |
| Latão | 14,9 ³ | 960 ¹ | 140 ³ | 100 ¹ |

¹ASHBY (2007).

²FORD (2008).

³MATWEB (2012).

⁴WANG (2008).

⁵KAR (1979).

As propriedades mecânicas não demonstram influência sobre o desempenho dos materiais para eletrodo-ferramenta. O que continua prevalecendo são os parâmetros tradicionais de seleção, ou seja, o ponto de fusão elevado (grafite) e uma condutividade elétrica (cobre).

Arantes (2007) realizou estudos referentes ao efeito sinérgico das partículas abrasivas no processo AJEDM com pressão de trabalho de 100 bar e concluiu que essa pressão é insuficiente para provocar erosão sem o auxílio das descargas elétricas.

De acordo com Summers (1995) as pressões de trabalho na faixa entre 100 a 1400 bars estão associadas ao processo de limpeza industrial, por serem mais seguras. Para usinagem industrial é necessária uma pressão acima de 2000 bar.

O aço inoxidável AISI 304, apesar de desgastar pouco, apresenta baixo desempenho na TRM. Segundo Jahan et al. (2010), as propriedades térmicas e elétricas dos materiais têm influência significativa na TRM. A alta resistividade elétrica do aço inoxidável restringe a conversão da energia elétrica em térmica, reduzindo assim a ação da fusão e evaporação do material.

Segundo Stevens (1998), a polaridade tem importante influência sobre o desgaste do eletrodo-ferramenta no processo EDM. Na maioria dos casos, os materiais dos eletrodos ferramenta e peça são diferentes. Isso explica, em parte, a diferença da TRM em ambos. Porém, mesmo quando os materiais dos eletrodos são iguais (por exemplo aço), o desgaste

é diferente. Isso se deve à diferença no processo de remoção de material nos pólos. O comportamento durante a fusão provocada pela descarga elétrica do cátodo é diferente do ânodo.

Com esses resultados, nota-se que a ação do desgaste erosivo não modifica o desempenho dos materiais tradicionalmente usados como eletrodos-ferramenta nos processos EDM, ou seja, cobre e grafite. A melhor condutividade elétrica do cobre e o alto ponto de fusão da grafite determinam os melhores desempenhos. A resistência mecânica, importante sob o ponto de vista do desgaste erosivo, ficou em segundo plano, como mostra o resultado do aço AISI 52100, mas também a fragilidade; já que a grafite apresentou um desempenho superior ao aço inoxidável austenítico AISI 304.

Um material com condutividade elétrica ligeiramente superior ao cobre é a prata ($66,6 \text{ S.m/mm}^2$). Entretanto, ela apresenta um ponto de fusão inferior, de $906,8^\circ \text{ C}$. Além disso, o custo da prata é mais elevado.

4.2. Avaliação da variação da pressão do fluido dielétrico

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam os resultados de TRM e TD, respectivamente, referentes ao desempenho da variação da pressão de trabalho com o uso de água deionizada com abrasivo SiC de 600 mesh; com água deionizada pressurizada a 240 bar, sem abrasivo; água deionizada e óleo mineral, ambos sem pressão e sem abrasivo.

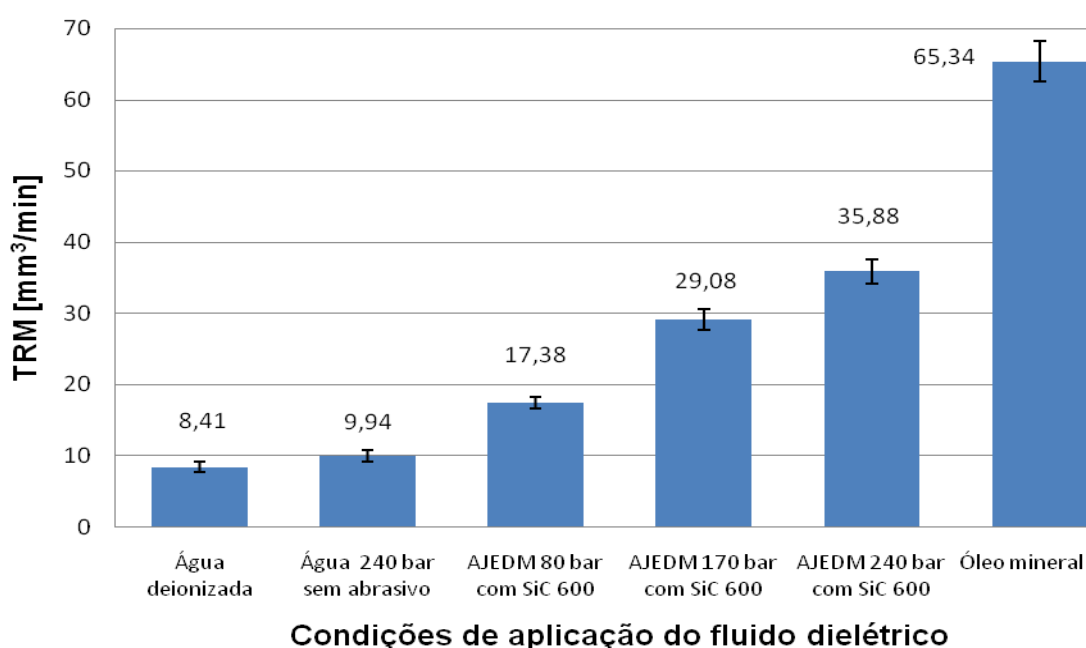


Figura 4.4 – TRM para avaliação das condições de aplicação do fluido dielétrico e efeito da variação da pressão.

Os resultados obtidos são inferiores aos de Arantes (2007), isso se deve as mudanças na geometria dos eletrodos-ferramentas e a menor concentração de abrasivos usados nesse trabalho.

Nota-se que a TRM do óleo mineral foi aproximadamente 8 vezes maior que a TRM da água deionizada na mesma condição de aplicação, ou seja, sem pressão. Observa-se que a usinagem na pressão de 240 bar, com SiC de 600 mesh, promoveu TRM de aproximadamente 50%, da usinagem com óleo mineral e três vezes maior que a usinagem com água deionizada sem pressão. A melhoria no sistema de lavagem, passando a condição de aplicação da água deionizada sem pressão para pressurizada, melhora o sistema de limpeza de micro-partículas removidas da superfície usinada pelas descargas elétricas. A adição de partículas abrasivas no processo aumenta a velocidade de usinagem. Segundo Fernandes (1999) a adição de SiC nivela as propriedades físicas e químicas dos fluidos dielétricos. A condutividade do SiC altera a rigidez dielétrica do fluido, nesse caso água deionizada.

O óleo possui propriedades que o habilitam para aplicação no processo EDM, ao contrário da água deionizada que não tem as mesmas características. Por exemplo, a alta rigidez dielétrica do óleo mineral. Esse fato explica o baixo rendimento da água deionizada na condição de trabalho sem pressão e mesmo pressurizada a 240 bar. A Tabela 4.2 apresenta algumas características dos fluidos dielétricos usados nos testes.

Tabela 4.2 – Características dos fluidos dielétricos usados nos testes (ARANTES, 2007).

| Fluido dielétrico | Constante dielétrica a 25 °C | Viscosidade cSt |
|--------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| Óleo mineral | 2,0 | 3,7 |
| Água deionizada | 78,4 | 0,95 |

Nota-se, ainda, um aumento da TRM na avaliação da variação da pressão de trabalho no processo AJEDM. A TRM tem seu valor dobrado na pressão de 240 bar em relação à pressão de trabalho de 80 bar.

Nesse caso, os resultados de TRM estão compatíveis com as verificações de Summers (1995) no processo AWJM. O aumento no valor da TRM está relacionado com a taxa de alimentação de abrasivo, quantidade do fluxo abrasivo e velocidade de impacto das partículas. A velocidade aumenta com o acréscimo da pressão de alimentação do jato de água.

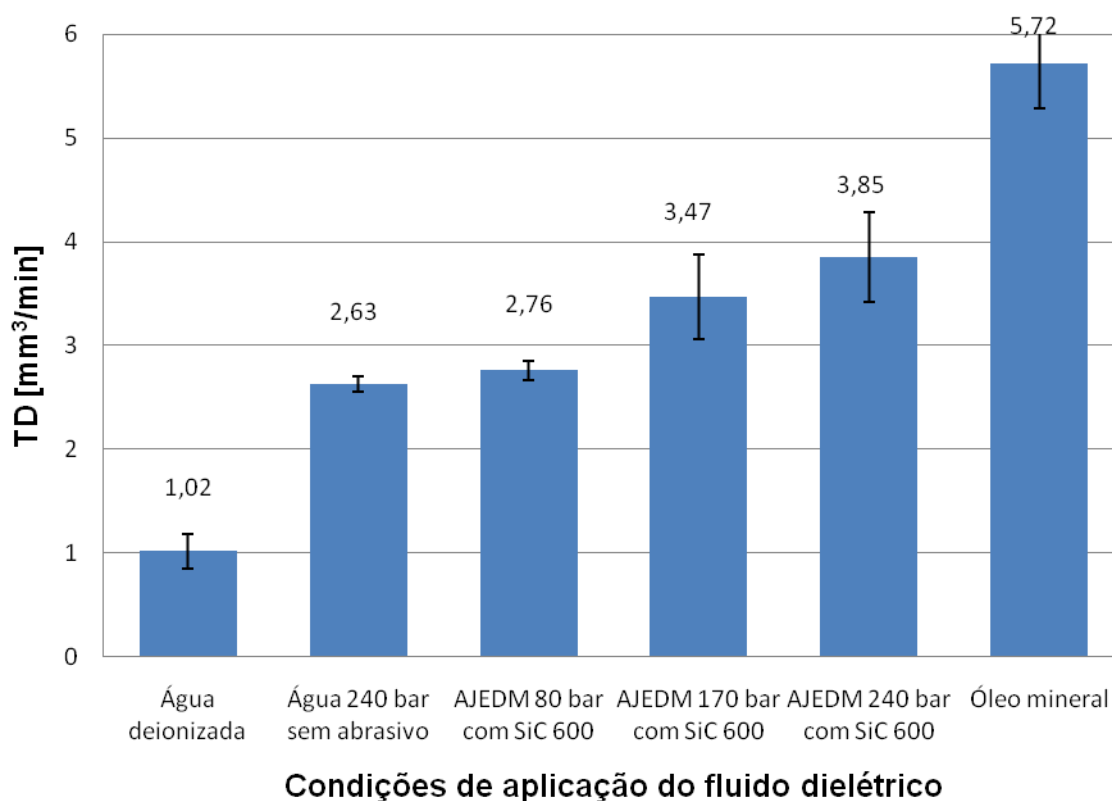


Figura 4.5 – TD para avaliação das condições de aplicação do fluido dielétrico e efeito da variação da pressão.

Observa-se que o desgaste da ferramenta mostra um comportamento parecido com a TRM, já que o maior desgaste foi no eletrodo-ferramenta usado na usinagem com óleo mineral e o menor com água deionizada sem pressão. Nota-se que o desgaste da usinagem com água pressurizada a 240 bar sem abrasivo é praticamente o mesmo que na usinagem com pressão de 80 bar no processo. Segundo Arantes (2007), a adição de partículas abrasivas, no processo AJEDM, aumenta a energia de impacto do fluido dielétrico contra a superfície, melhorando a velocidade de usinagem. Porém, sob pressões baixas tem-se pouca eficácia na ação erosiva das partículas, devido à baixa energia de impacto.

A aplicação da água deionizada pressurizada com a introdução de abrasivos, melhora a TRM. Tem-se, contudo, um maior desgaste da ferramenta. Isso pode ser explicado pelas imagens das superfícies desgastadas dos eletrodos ferramenta e peça, figuras 4.6 a 4.10.

A Figura 4.6 ilustra uma imagem de MEV da superfície do eletrodo-ferramenta de cobre usada na usinagem com água deionizada na pressão de 240 bar com SiC de 600 mesh.

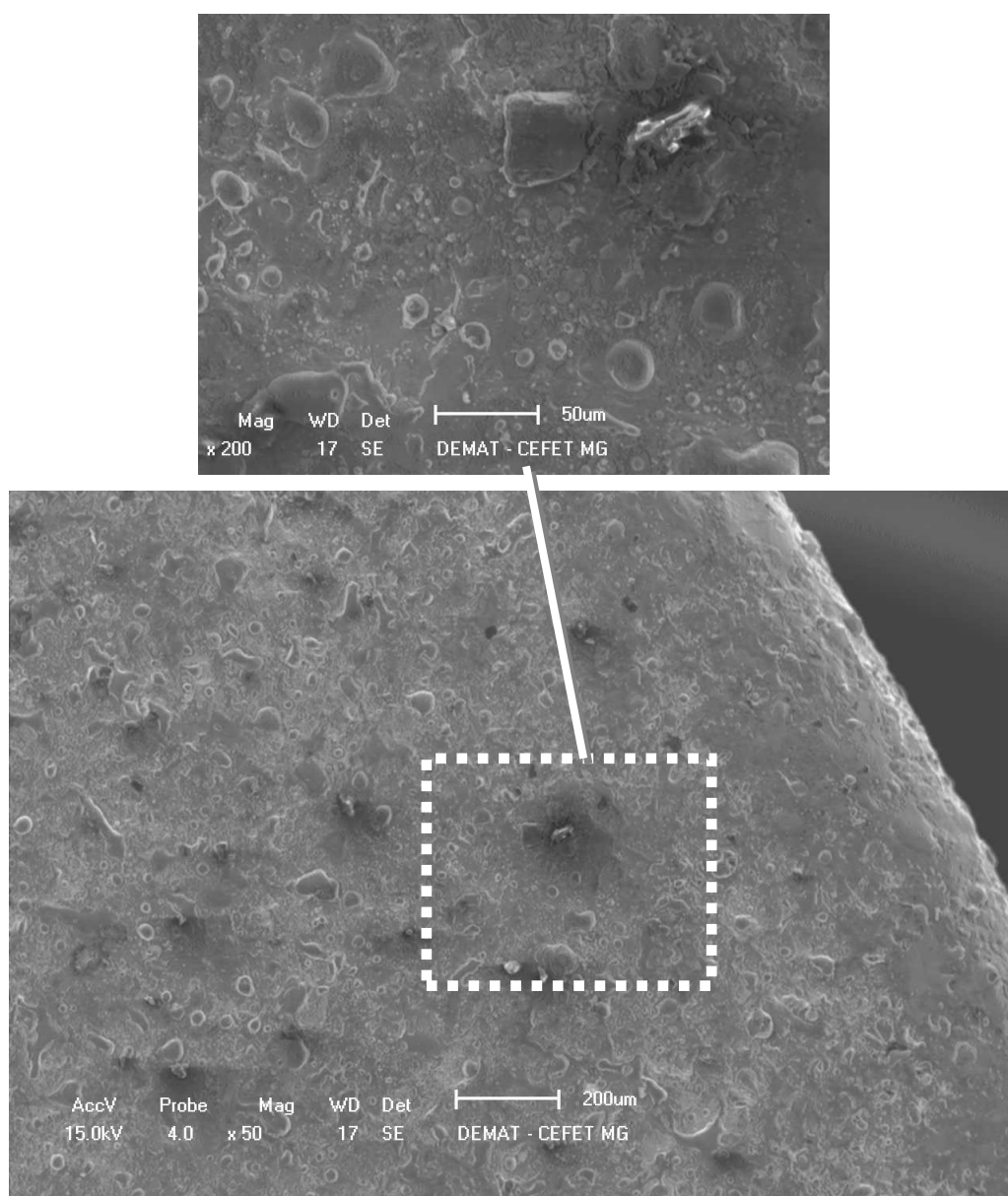


Figura 4.6 – Imagem de MEV da superfície do eletrodo-ferramenta de cobre usado na usinagem com água deionizada na pressão de 240 bar com SiC de 600 mesh. Destaque para região onde uma partícula abrasiva encontra-se incrustada.

Após o processo de usinagem com água deionizada na pressão de 240 bar com SiC na granulometria de 600 mesh, foi possível observar que partículas do abrasivo ficaram incrustadas na superfície do eletrodo-ferramenta de cobre usado no processo, como ilustra a Figura 4.6. Uma análise de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), na imagem da Figura 4.7, que é um destaque da Figura 4.6, corrobora essa afirmação, como mostra o gráfico do espectro de EDS (Figura 4.8).

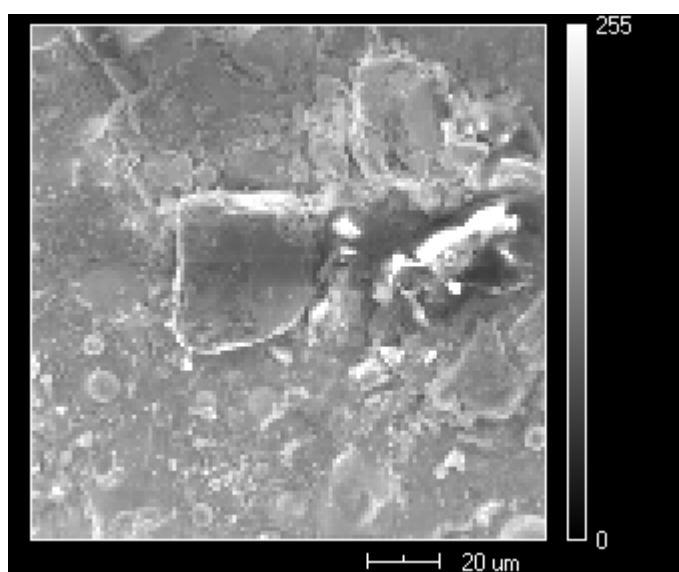


Figura 4.7 – Destaque da partícula abrasiva de SiC (600 mesh) incrustada na superfície da ferramenta de cobre. Usinagem com água deionizada na pressão de 240 bar.

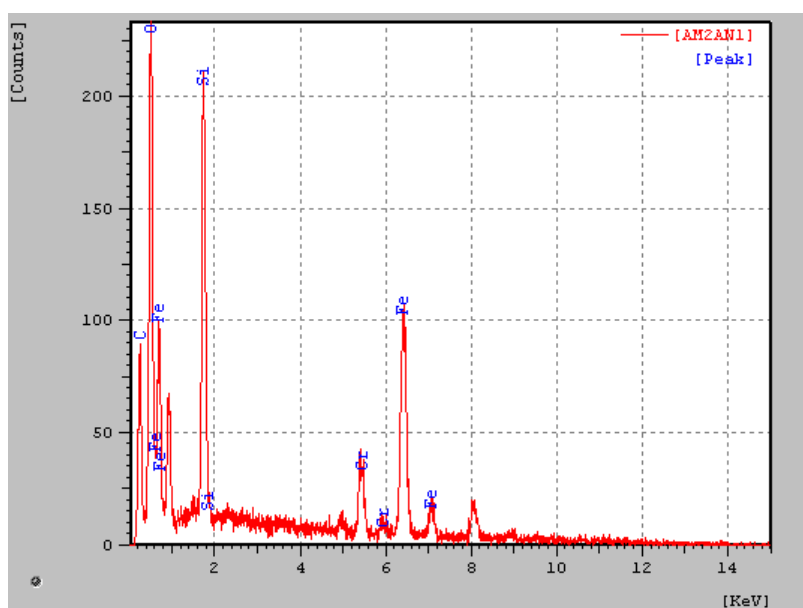


Figura 4.8 – Gráfico do espectro de EDS da imagem da Figura 4.7.

Esse fato mostra que ocorre uma participação efetiva das partículas abrasivas no processo de desgaste do eletrodo-ferramenta durante o processo.

As Figuras 4.9 e 4.10 ilustram imagens de MEV, obtida da superfície usinada com abrasivos SiC e Al_2O_3 de 600 mesh na pressão de 240 bar. Na Figura 4.9(a), pode-se observar uma partícula abrasiva de SiC, e na Figura 4.10(a), uma partícula de Al_2O_3 , ambas incrustadas na superfície. A Figura 4.9(b) ilustra o espectro de EDS realizado na partícula abrasiva de SiC, e a Figura 4.10(b) mostra o espectro realizado na partícula de Al_2O_3 . As setas nas Figuras 4.9(a) e 4.10(a) indicam a posição onde foi realizada a análise de EDS pontual.

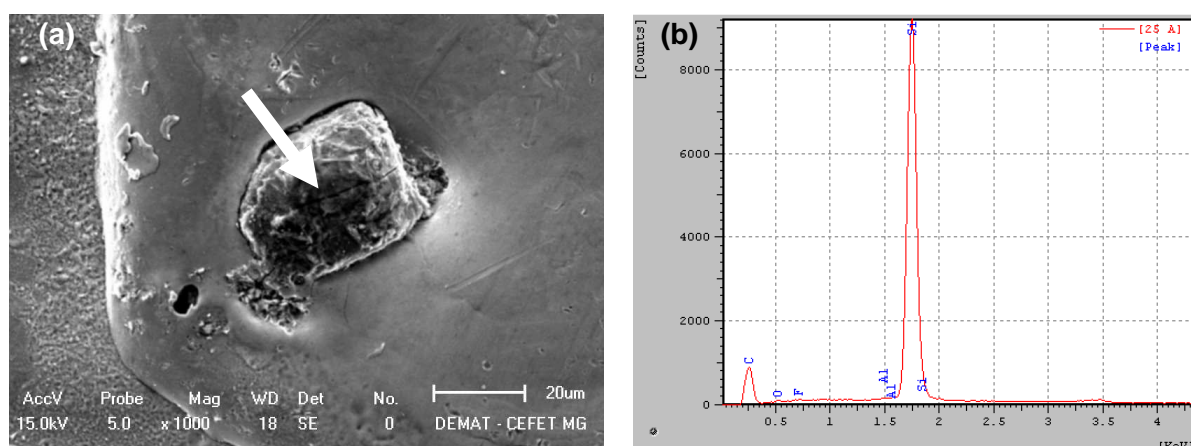


Figura 4.9 – Imagem de MEV da superfície usinada com SiC de 600 mesh (a) e imagem do espectro de EDS pontual na partícula de SiC incrustada na superfície (b).

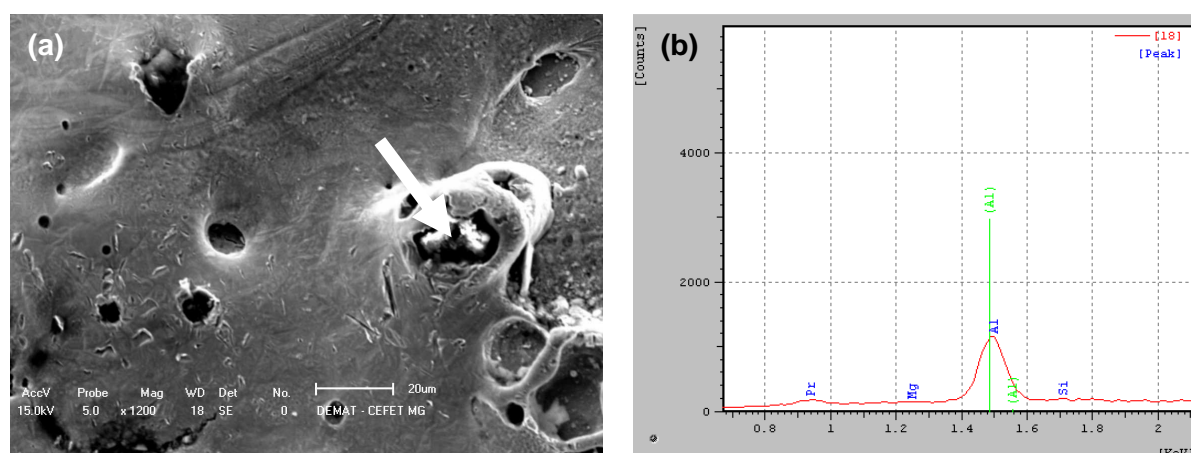


Figura 4.10 – Imagem de MEV da superfície usinada com Al₂O₃ de 600 mesh (a) e imagem do espectro de EDS pontual na partícula de Al₂O₃ incrustada na superfície (b).

Os resultados mostraram que as superfícies obtidas pelo processo AJEDM com os abrasivos SiC e Al₂O₃ não diferem muito da usinada por EDM convencional. Em ambos os casos ocorre a formação de poros, micro-trincas e absorção de micro-partículas refundidas. O que difere uma superfície da outra é a presença de partículas abrasivas incrustadas na superfície usinada pelo AJEDM. Isso pode ser observado pelos espectros de EDS que identificam as partículas de SiC e Al₂O₃ incrustadas nessas superfícies. Isso demonstra que houve uma efetiva participação das partículas abrasivas no processo de remoção do material fundido pelas descargas elétricas na peça usinada, refletindo no aumento substancial da TRM.

A Figura 4.11 apresentam os resultados de DVR referentes ao desempenho da variação da pressão de trabalho com o uso de água deionizada com abrasivo SiC de 600

mesh; água deionizada pressurizada a 240 bar, sem abrasivo; água deionizada e óleo mineral, ambos sem pressão e sem abrasivo.

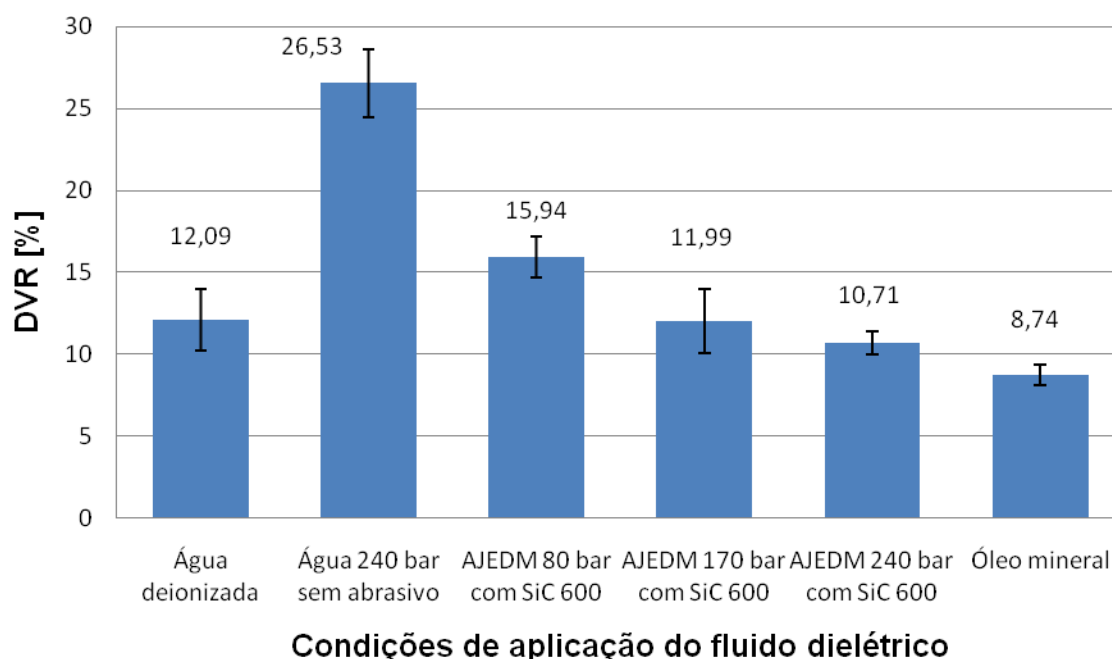


Figura 4.11 – DVR para avaliação das condições de aplicação do fluido dielétrico e efeito da variação da pressão.

Nota-se que, em relação ao DVR, o óleo mineral sem pressão continuou a manter o melhor comportamento em relação às demais condições. Em destaque, observa-se que, na usinagem com água deionizada pressurizada, sem abrasivo; obteve-se o pior rendimento em relação às demais condições, já que o DVR ficou próximo de 27%. O comportamento da condição de usinagem com pressão de 240 bar no processo aproximou-se do desempenho do óleo mineral.

Com a utilização da água pressurizada a 240 bar não se obteve um implemento significativo com relação à TRM (Figura 4.4), entretanto provocou um desgaste significativo do eletrodo- ferramenta (Figura 4.5). Isso teve reflexos no baixo desempenho da água deionizada pressurizada a 240 bar, promovendo assim um alto valor no DVR. A inserção de abrasivo também provoca desgaste mais acentuado do eletrodo com o aumento da pressão, contudo a TRM é implementada significativamente. Isso conduz a um valor competitivo com o óleo mineral com a pressão de 240 bar pelo processo AJEDM. Esse resultados estão compatíveis com os observados por Arantes (2007).

Os resultados do DVR mostram que o aumento da pressão no processo exerce influência sobre o desgaste relativo de modo a diminuí-lo, à medida que a pressão aumenta.

Essa elevação proporciona um acréscimo nas TRM e TD, devido ao fato de ambas as superfícies da peça e ferramenta ficarem sujeitas à ação dos efeitos das descargas elétricas e do desgaste erosivo promovido pelas partículas abrasivas.

Observa-se que o jato empurra uma pequena quantidade da camada refundida para fora da cavidade usinada, formando rebarbas na periferia externa da cavidade, como mostra a Figura 4.12. As Figuras 4.13 e 4.14 ilustram imagens de MEV desse efeito da pressão ao empurrar o material derretido da camada refundida para fora da cavidade usinada. A Figura 4.20 ilustra a imagem de trecho da periferia externa da cavidade, e a Figura 4.21 de trecho da periferia interna, onde o jato incide diretamente.

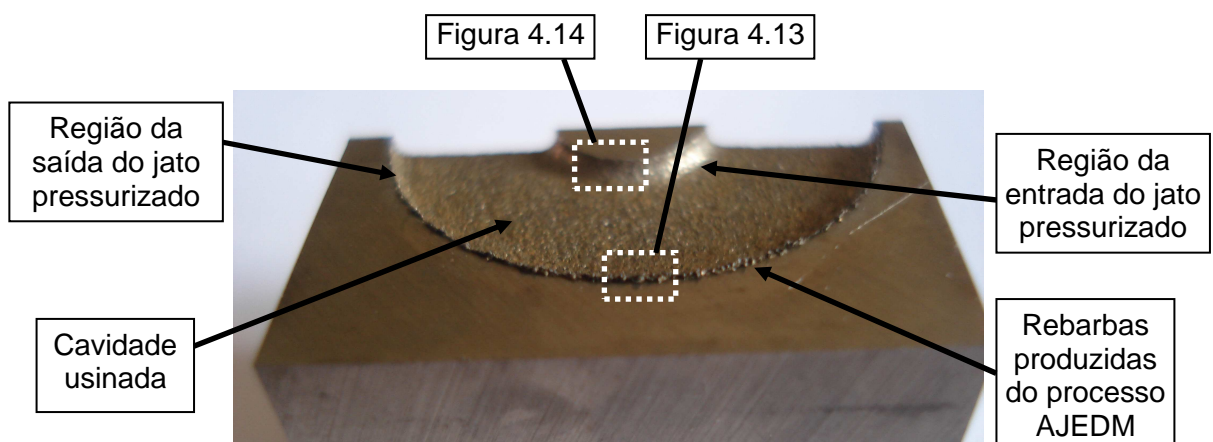


Figura 4.12 – Cavidade usinada produzida no aço AISI M2 pelo processo com SiC de 600 mesh na pressão de 240 bar.

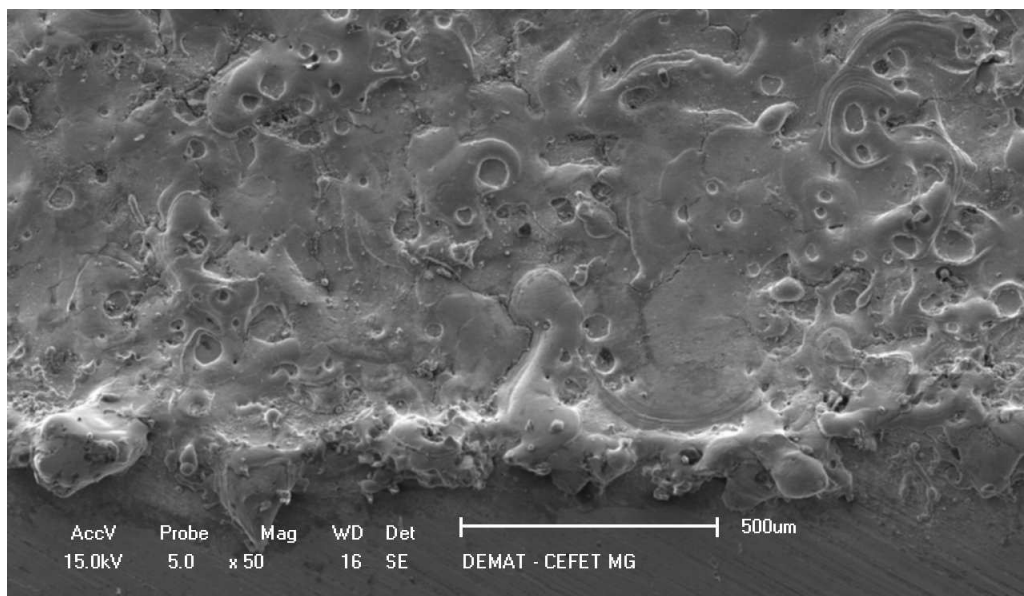


Figura 4.13 – Imagem de MEV de trecho da periferia externa da cavidade usinada pelo processo com pressão de 240 bar.

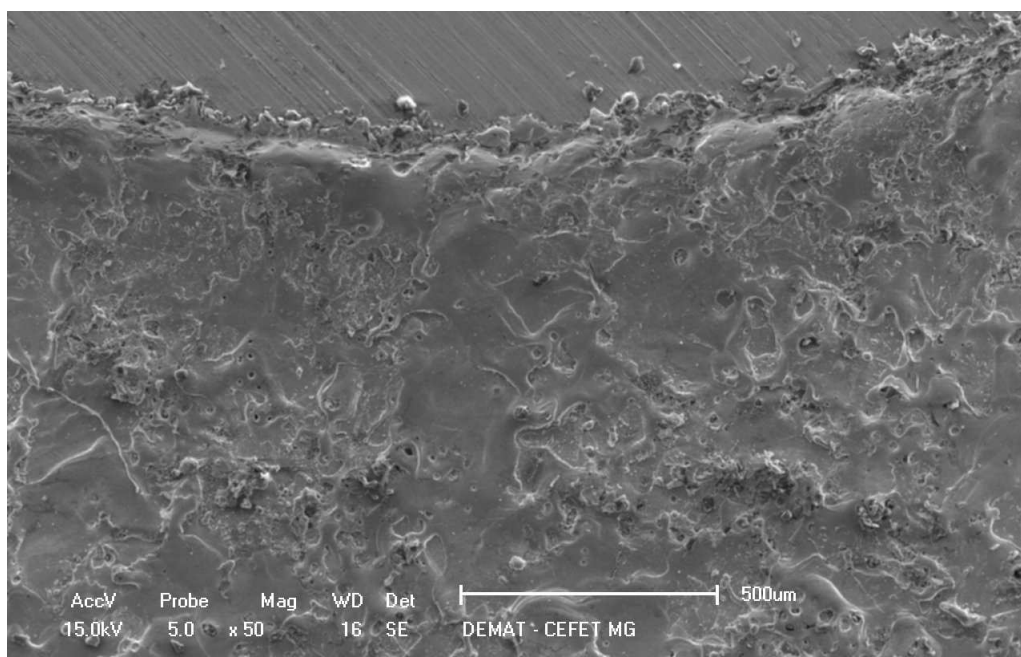


Figura 4.14 – Imagem de MEV de trecho da periferia interna da cavidade usinada pelo processo com pressão de 240 bar.

A camada refundida, produzida pela usinagem com abrasivo SiC de 600 mesh na pressão de 240 bar, não é uniforme ao longo da seção transversal da cavidade. A camada forma-se com uma espessura menor na entrada do jato de água pressurizado, na região do furo central do eletrodo-ferramenta. A espessura cresce da região de entrada do jato até atingir valores máximos na região de saída. Essa variação é provocada pelo fluxo do jato de água abrasivo sob alta pressão, que acentua o efeito da lavagem, pelo fluido dielétrico, das micro-partículas do material arrancado da superfície da peça pelas descargas elétricas.

O gráfico da Figura 4.15 apresenta os resultados da espessura da camada refundida referentes ao desempenho da variação da pressão de trabalho no processo AJEDM, da usinagem com água deionizada e óleo mineral, água deionizada pressurizada a 240 bar, água deionizada mais abrasivo SiC de 600 mesh, nas pressões de 80, 170 e 240 bar.

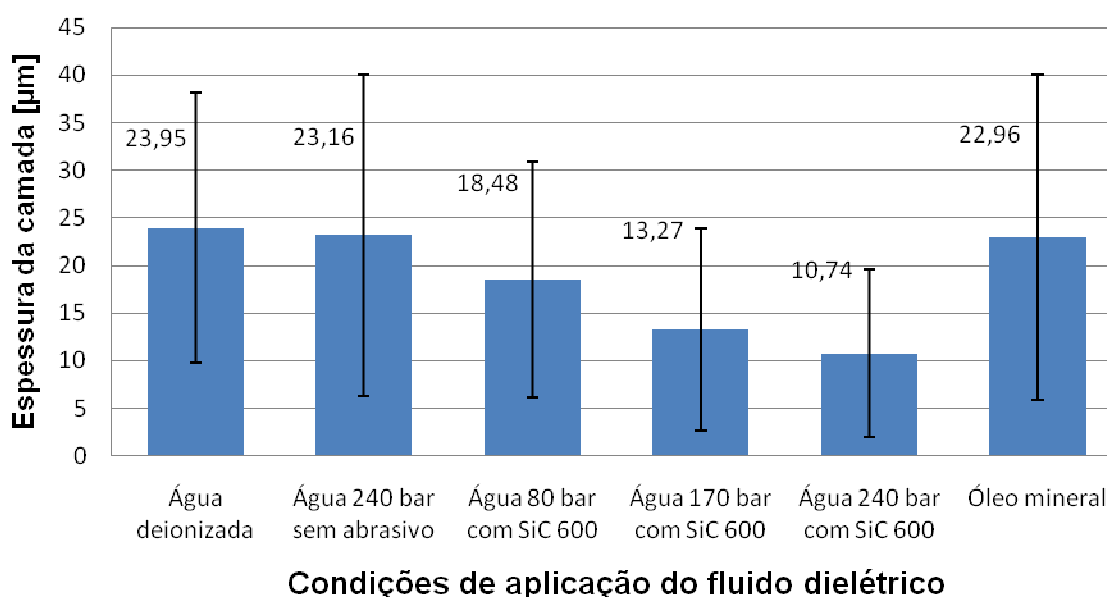


Figura 4.15 – Espessura da camada refundida [μm] para avaliação das condições de aplicação do fluido dielétrico e efeito da variação da pressão.

Os resultados mostram que existe, na média, uma tendência de queda no valor da espessura da camada refundida com a adição de abrasivo e aumento da pressão. A dispersão nos resultados pode ser explicada pela heterogeneidade da descarga elétrica (Figura 2.12, página 20).

As espessuras das camadas refundidas para as condições de aplicação do fluido sem pressão com óleo mineral e água deionizada, ficaram próximas da faixa de 23 μm (valor médio), esse mesmo comportamento pode ser observado na condição de água pressurizada a 240 bar sem abrasivo.

Já na condição de usinagem pelo processo AJEDM, ocorreu uma ligeira redução no valor médio da espessura da camada refundida, ficando próxima de 18 μm com jato pressurizado de 80 bar, e 10 μm, aproximadamente, com jato de 240 bar. A adição de partículas abrasivas, provavelmente, torna o jato mais denso, melhora o efeito de limpeza da superfície usinada e possibilita um maior deslocamento do material da camada refundida durante o processo.

As Figuras 4.16 a 4.21 ilustram imagens de microscopia ótica da seção transversal de metade da cavidade usinada. Nas imagens, pode-se observar o formato da camada refundida. Os ataques químicos foram feitos com nital 2%.

A Figura 4.16 refere-se a usinagem com água deionizada sem pressão. A Figura 4.17 refere-se a usinagem com água deionizada pressurizada a 240 sem abrasivo. As Figuras 4.18 a 4.20 refere-se a usinagem com água deionizada na presença de abrasivo

SiC de 600 mesh nas pressões de 80, 170 e 240, respectivamente. A Figura 4.21 refere-se a usinagem com óleo mineral sem pressão.

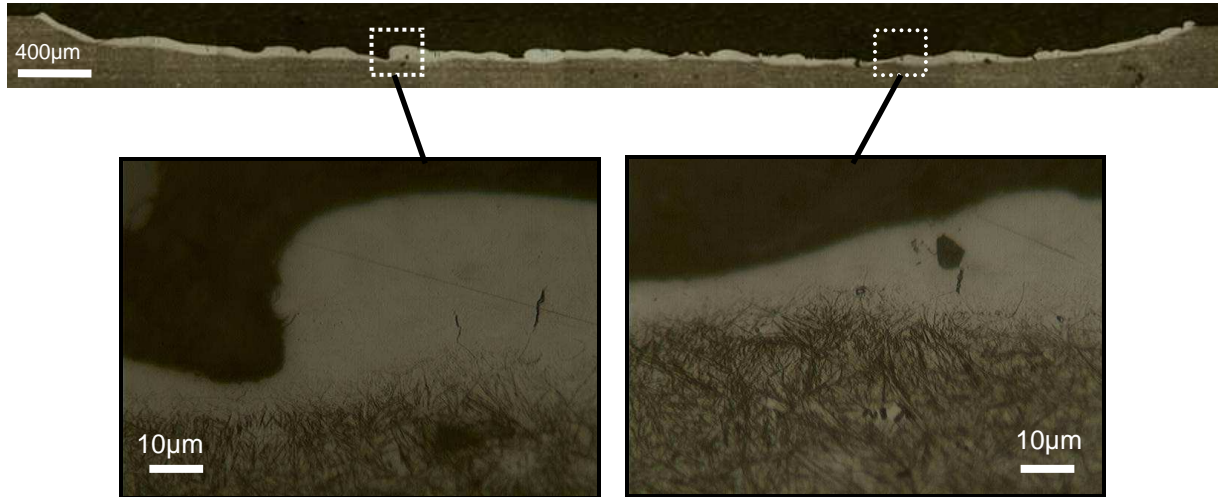


Figura 4.16 – Imagens de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com água deionizada sem pressão. Camada refundida em destaques.

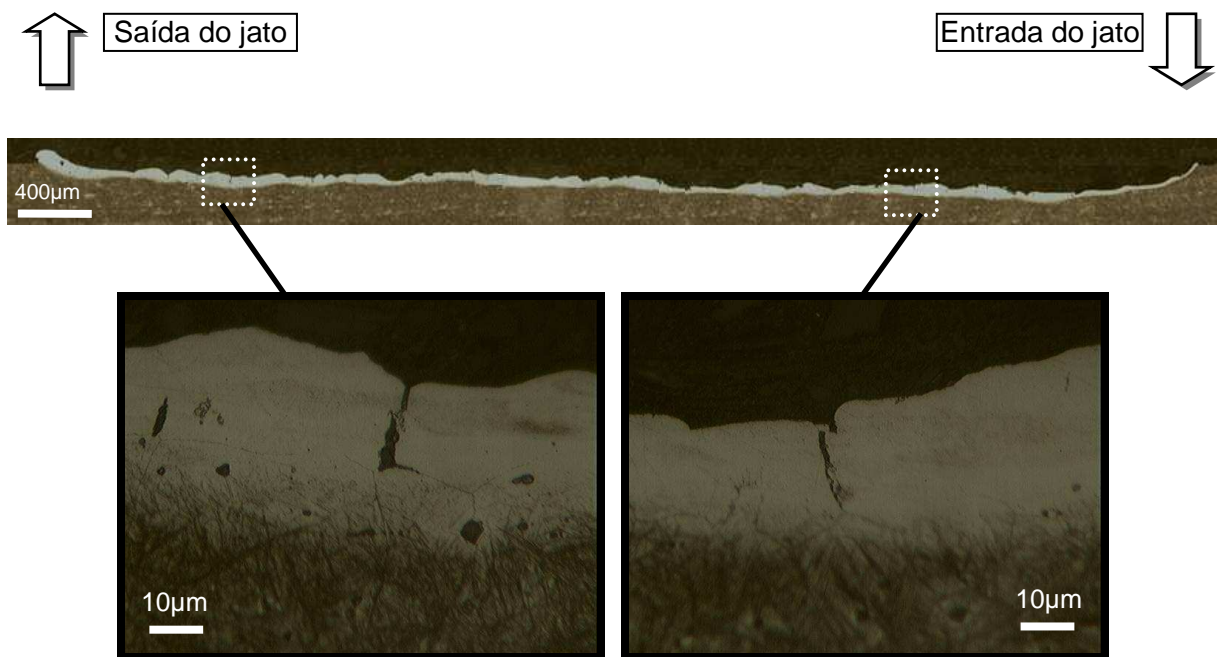


Figura 4.17 – Imagens de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com água pressurizada a 240 bar, sem abrasivo. Camada refundida em destaques.

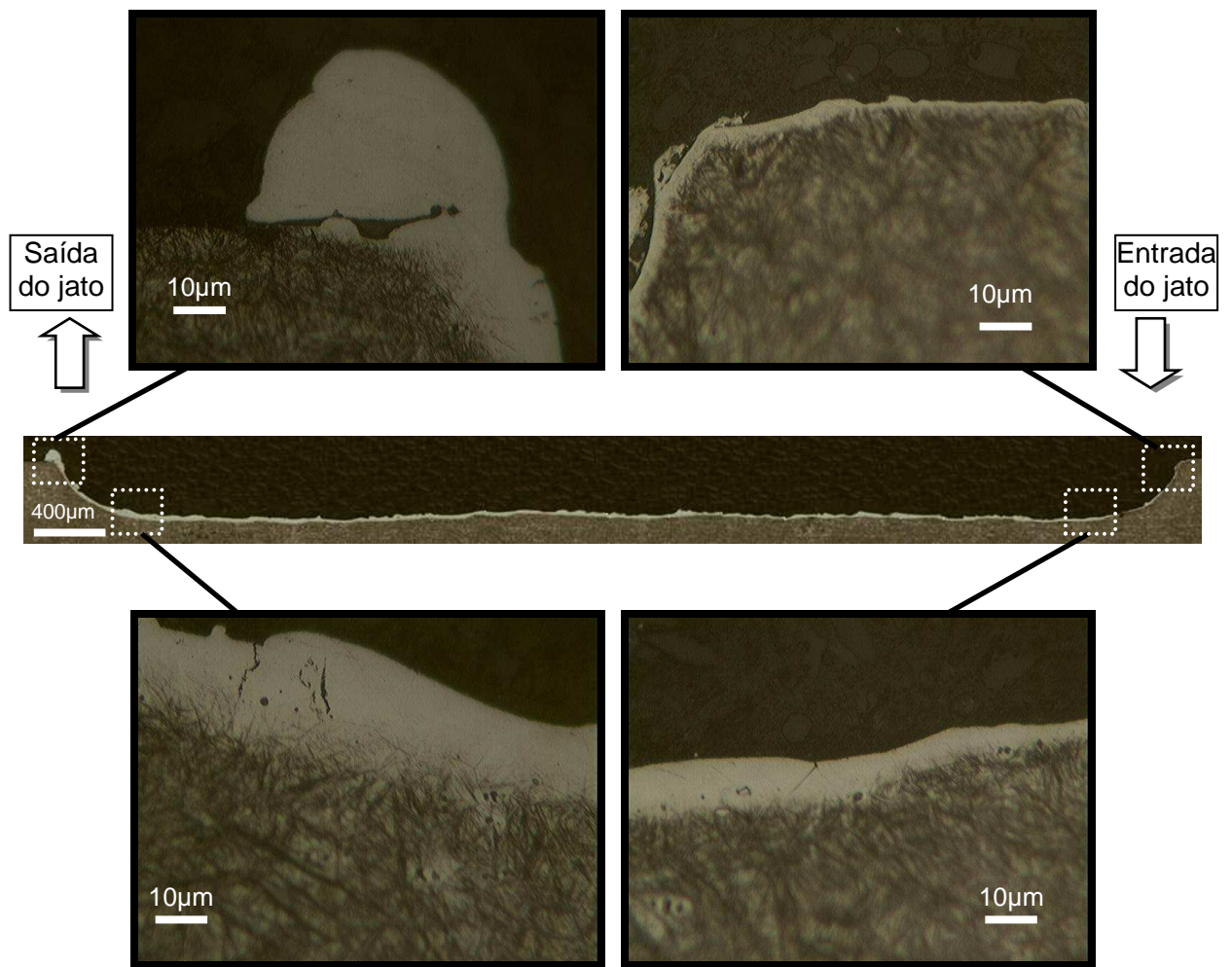


Figura 4.18 – Imagens de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com pressão de 80 bar com SiC de 600 mesh. Camada refundida em destaques.

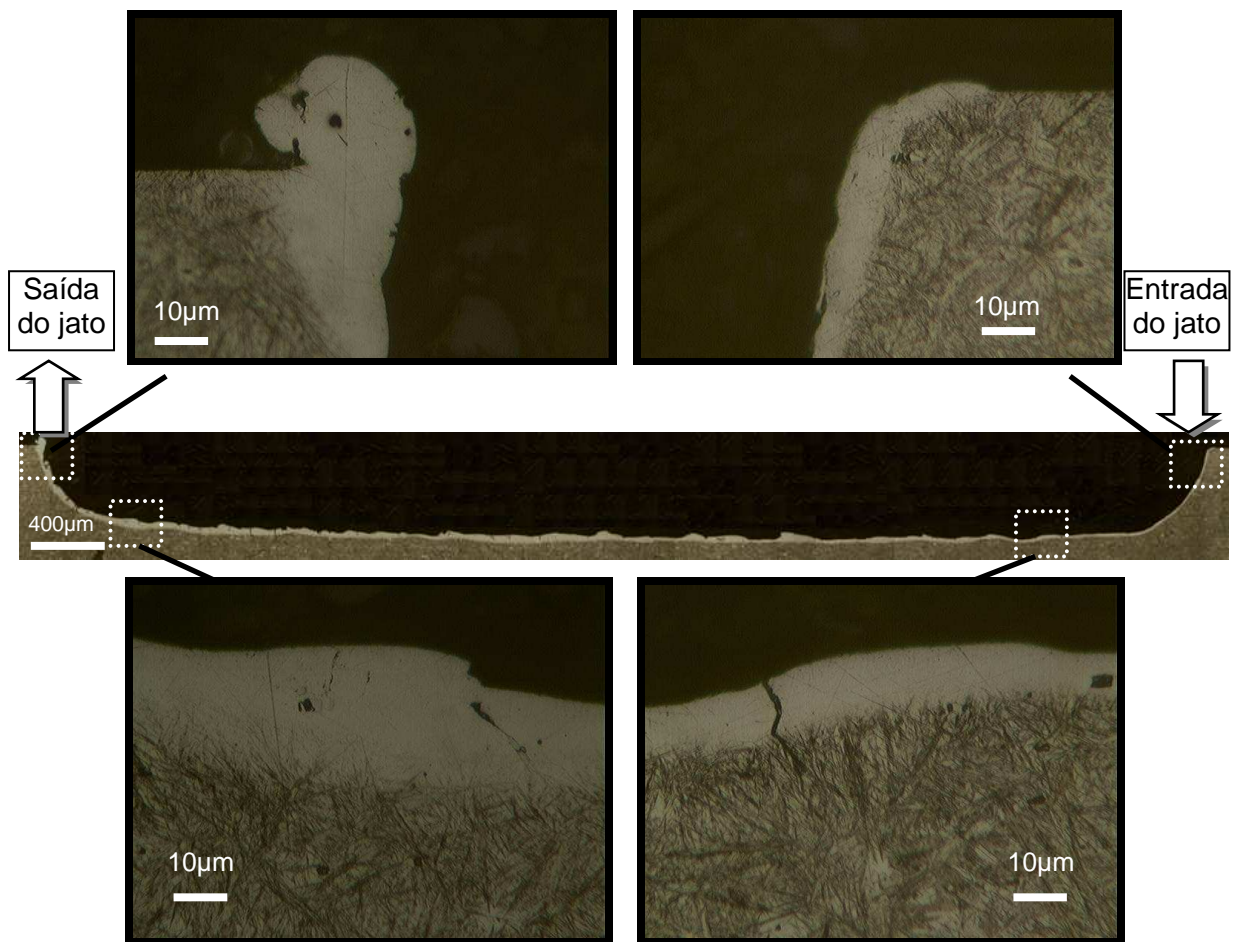


Figura 4.19 – Imagens de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com pressão de 170 bar com SiC de 600 mesh. Camada refundida em destaques.

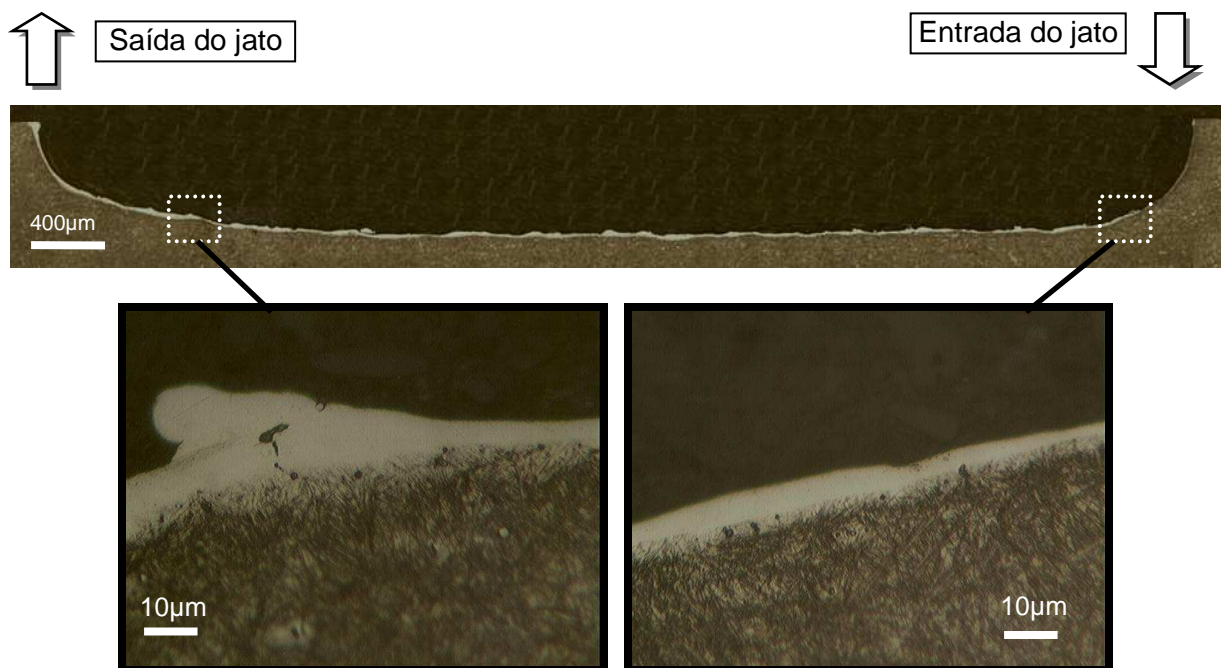


Figura 4.20 – Imagem de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com pressão de 240 bar com SiC de 600 mesh. Camada refundida em destaques.

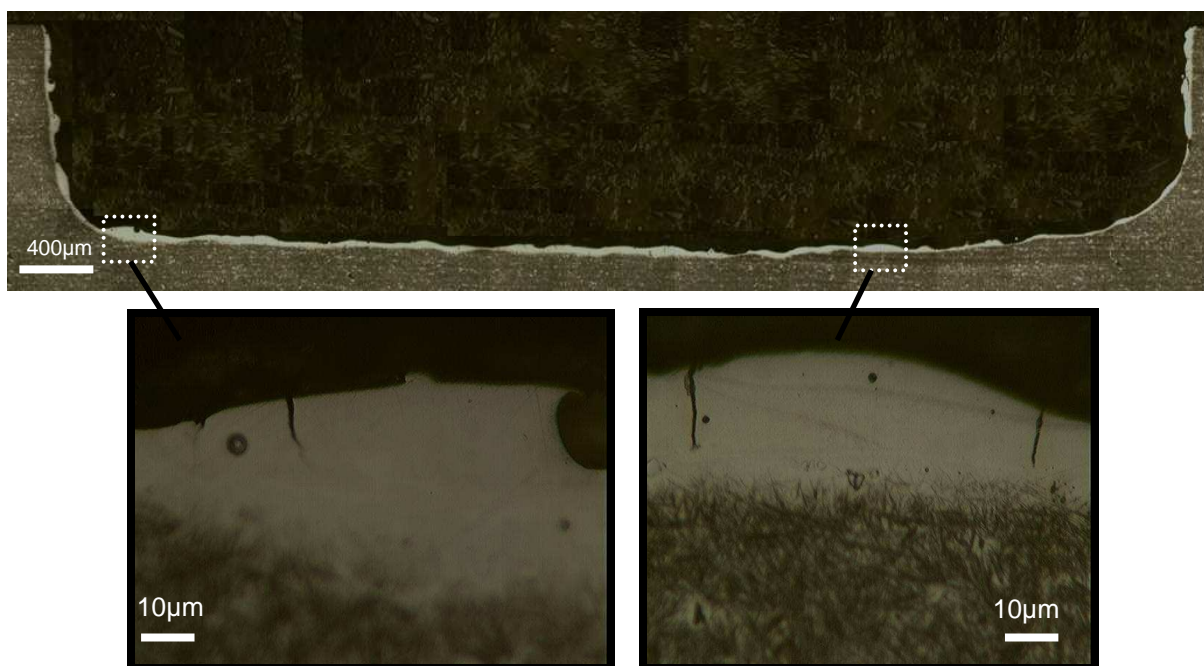


Figura 4.21 – Imagens de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com óleo mineral sem pressão. Camada refundida em destaques.

Observa-se que a camada refundida produzida pelas usinagens com água deionizada e óleo mineral, ambos sem pressão, têm formatos e espessuras uniformemente distribuídos ao longo da cavidade usinada. Apenas em alguns trechos, a espessura sofre redução na medida. Já na usinagem com água pressurizada a 240 bar, nota-se discreta redução da espessura (mínimas) na região de entrada do jato; e maior espessura (máximas) na região de saída do jato, contrastando-se com a usinagem com água deionizada sem pressão. Observa-se também que a camada refundida produzida na usinagem pelo AJEDM destaca-se entre as demais, pois ocorreu uma redução em sua espessura na região de entrada do jato, com aumento gradual ao longo de toda a extensão da cavidade, até atingir valores máximos, próximos da região de saída do jato. Nota-se também que a espessura da camada refundida, ao longo da cavidade usinada pelo AJEDM, é menor que nas condições de aplicação dos fluidos dielétricos sem pressão, água deionizada e óleo mineral, bem como água deionizada pressurizada a 240 bar, sem abrasivo.

O gráfico da Figura 4.22 ilustra os resultados da quantidade de micro-trincas por comprimento em μm , da seção transversal da cavidade usinada, referentes ao desempenho da variação da pressão de trabalho no processo AJEDM, da usinagem com água deionizada e óleo mineral, água deionizada pressurizada a 240 bar, água deionizada mais abrasivo SiC de 600 mesh, nas pressões de 80, 170 e 240 bar.

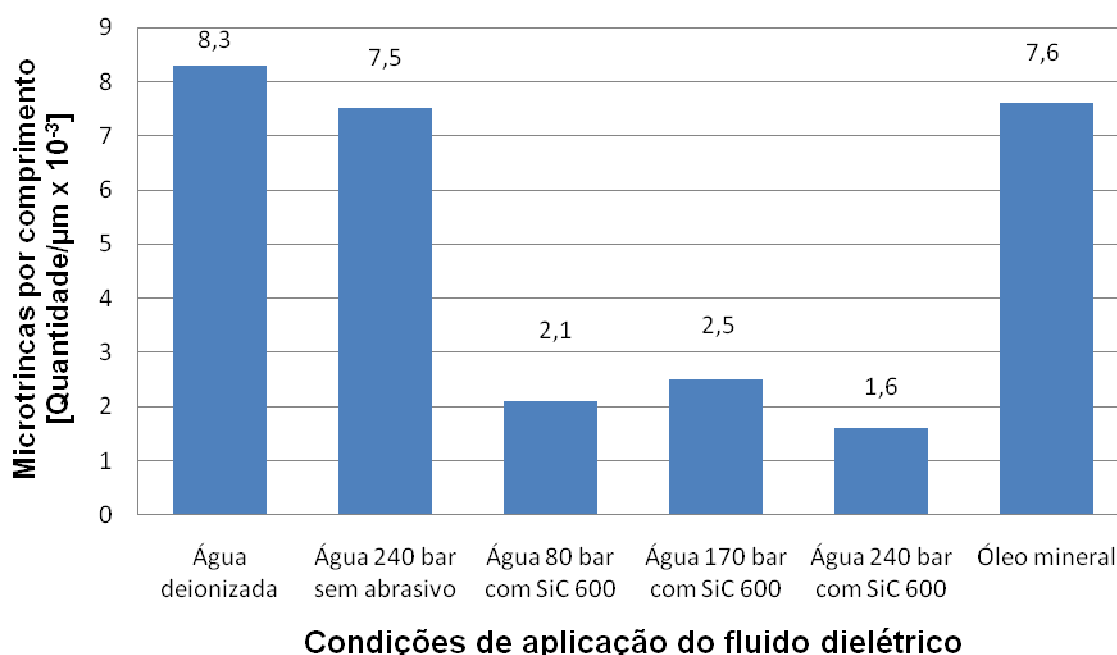


Figura 4.22 – Quantidade de micro-trincas por comprimento em μm , para avaliação das condições de aplicação do fluido dielétrico e efeito da variação da pressão.

Nota-se que a quantidade de micro-trincas por comprimento é menor na usinagem obtida pelo processo AJEDM. A redução da espessura da camada refundida, promovida pelo jato de alta pressão no processo AJEDM, é responsável pelo menor número de micro-trincas que ocorreram nessa condição.

Conforme relatado por Lee e Tai (2003), as micro-trincas formam-se mais facilmente em camadas refundidas mais espessas. Já nas camadas mais finas, a capacidade de dissipar calor rapidamente reduz a possibilidade de formação das micro-trincas.

Esses resultados corroboram com a afirmação de Lonardo e Bruzzone (1999), em que melhoria no sistema de lavagem exerce influência na quantidade de micro-trincas e na camada refundida que podem ter seus valores reduzidos.

O gráfico da Figura 4.23 apresenta os resultados do comprimento das micro-trincas referentes ao desempenho da variação da pressão de trabalho no processo AJEDM, da usinagem com água deionizada pressurizada a 240 bar, sem abrasivo; água deionizada e óleo mineral, ambos sem pressão.

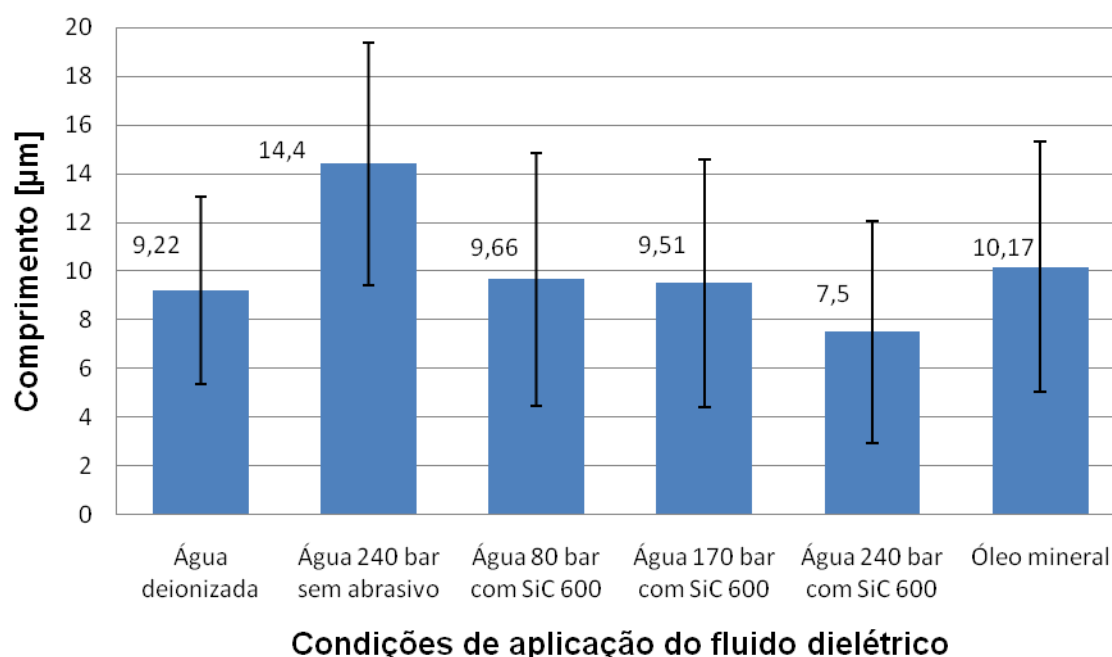


Figura 4.23 – Comprimento de micro-trincas para avaliação das condições de aplicação do fluido dielétrico e efeito da variação da pressão.

Nota-se que não ocorreram variações significativas nos comprimentos das micro-trincas entre as diferentes condições de aplicação do fluido dielétrico.

A Figura 4.24 ilustra imagem de MEV da superfície usinada com água deionizada sem pressão. A Figura 4.25 refere-se a usinagem com água deionizada pressurizada a 240 bar. As Figuras 4.26 a 4.28 refere-se a usinagem com água deionizada na presença de abrasivo SiC de 600 mesh nas pressões de 80, 170 e 240, respectivamente. A Figura 4.29 refere-se a usinagem com óleo mineral sem pressão.

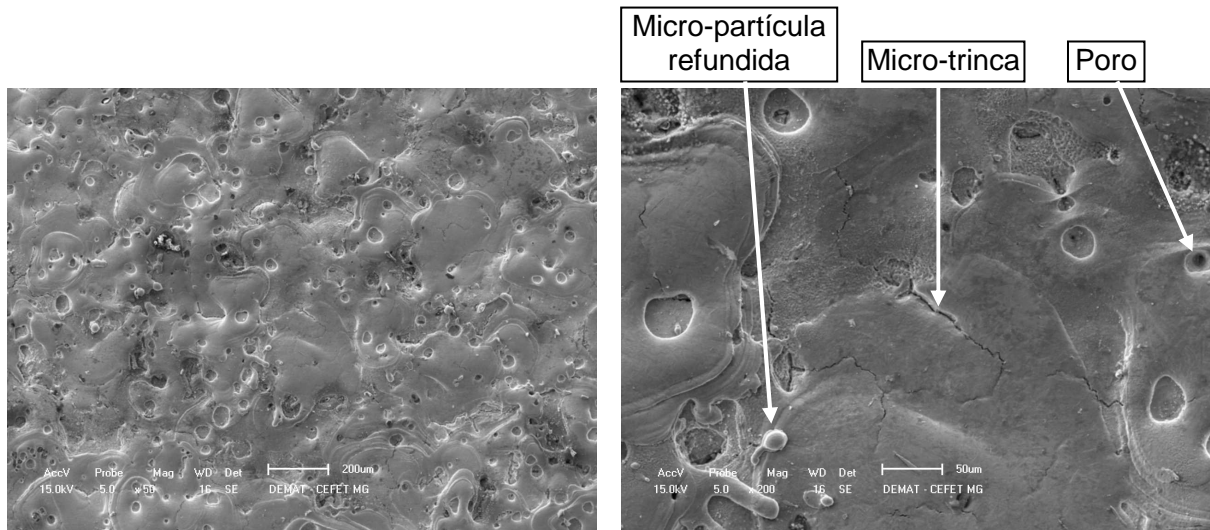


Figura 4.24 – Imagens de MEV das superfícies usinadas com água deionizada sem pressão e sem abrasivo.

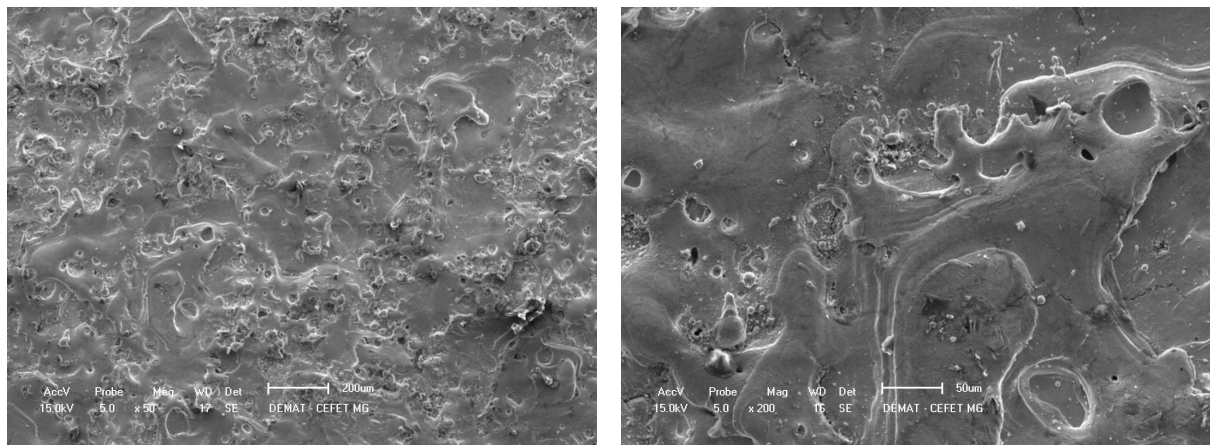


Figura 4.25 – Imagens de MEV das superfícies usinadas com água deionizada pressurizada a 240 bar sem abrasivo.

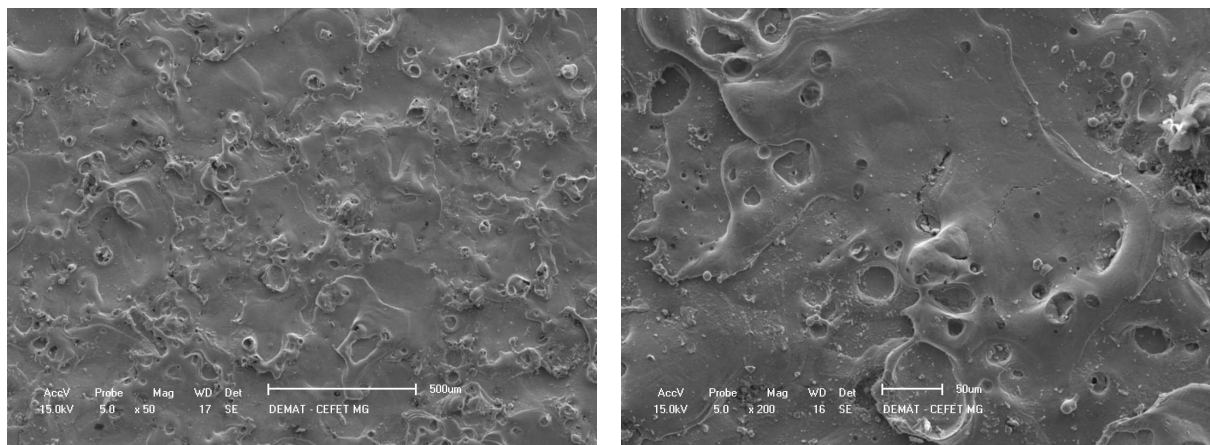


Figura 4.26 – Imagens de MEV das superfícies usinadas pelo processo com SiC de 600 mesh na pressão de trabalho de 80 bar.

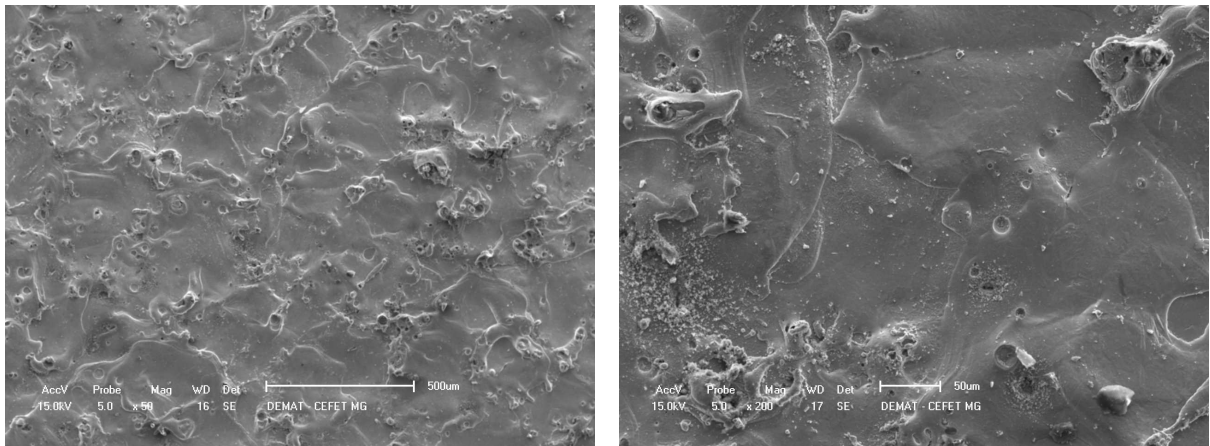


Figura 4.27 – Imagens de MEV das superfícies usinadas pelo processo com SiC de 600 mesh na pressão de trabalho de 170 bar.

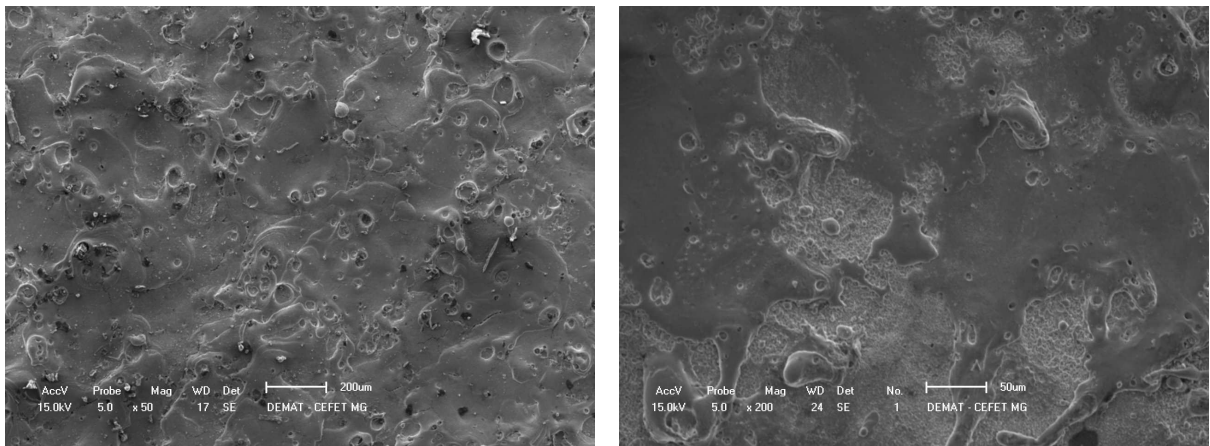


Figura 4.28 – Imagens de MEV das superfícies usinadas pelo processo com SiC de 600 mesh na pressão de trabalho de 240 bar.

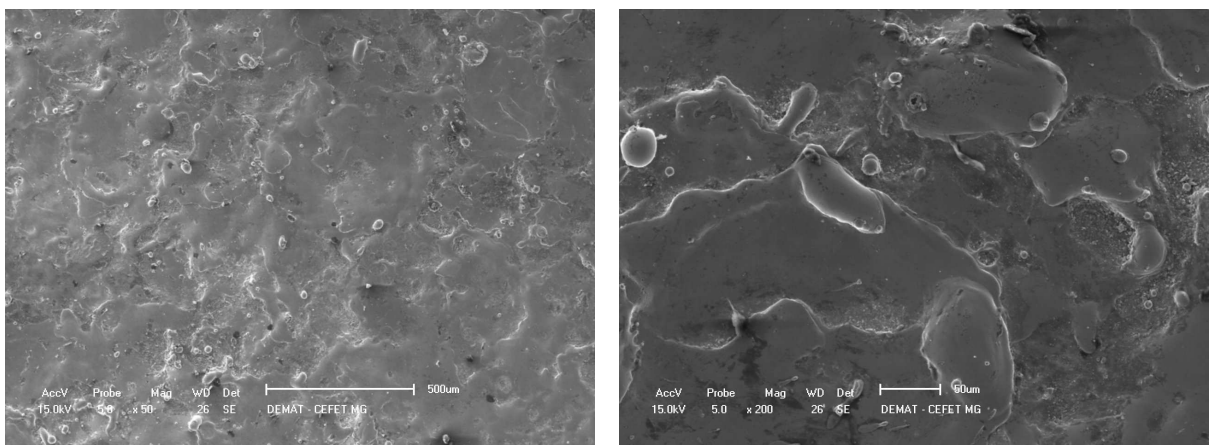


Figura 4.29 – Imagens de MEV das superfícies usinadas com óleo mineral sem pressão e sem abrasivo.

Nota-se, por meio das imagens de MEV, que as superfícies obtidas pelo processo AJEDM não apresentam diferenças significativas das usinadas por EDM convencional com óleo mineral sem pressão. Até mesmo, da produzidas com água deionizada pressurizada ou sem pressão. Ocorre a formação de poros, micro-trincas e absorção de micro-partículas refundidas na superfície.

A Figura 4.30 apresenta os valores de microdureza Vickers [kgf/mm²] da camada refundida, zona afetada pelo calor e material base para avaliação das condições de aplicação do fluido dielétrico e efeito da variação da pressão no processo. A microdureza foi realizada na seção transversal da cavidade usinada.

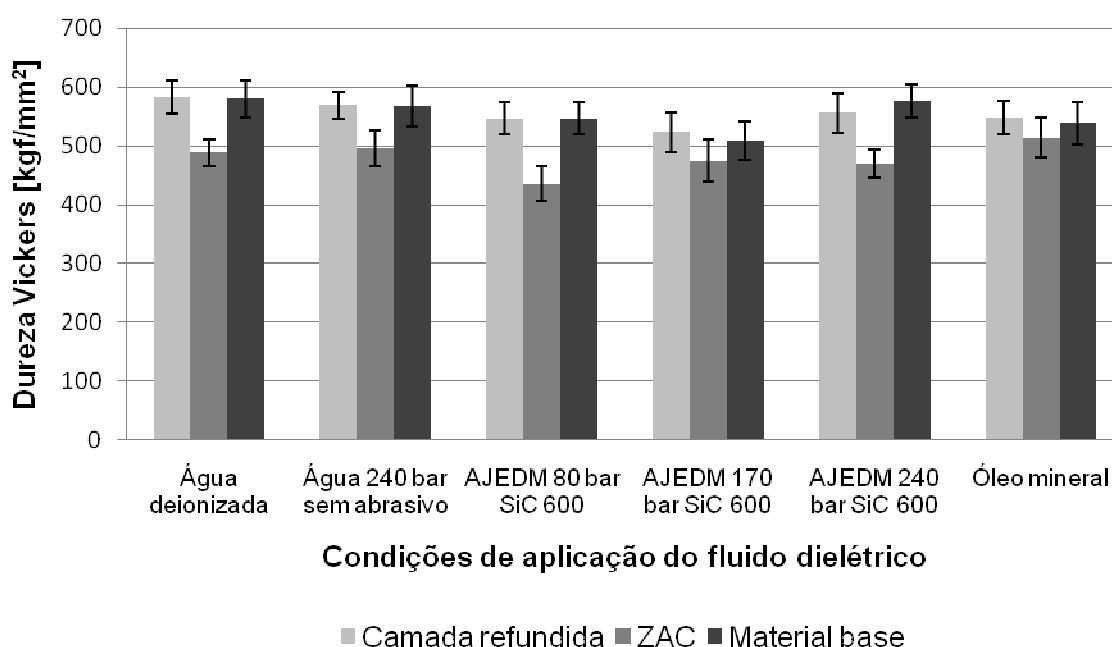


Figura 4.30 – Valores de microdureza Vickers [HV] da camada refundida, ZAC e material base (aço AISI M2) para avaliação das condições de aplicação do fluido dielétrico e efeito da variação da pressão no processo.

Nota-se que não ocorreram variações significativas nos valores de micro-dureza entre as diferentes condições de aplicação do fluido dielétrico.

O gráfico da Figura 4.31 apresenta os resultados do consumo do abrasivo SiC de 600 mesh para avaliação do efeito da variação da pressão de trabalho no processo.

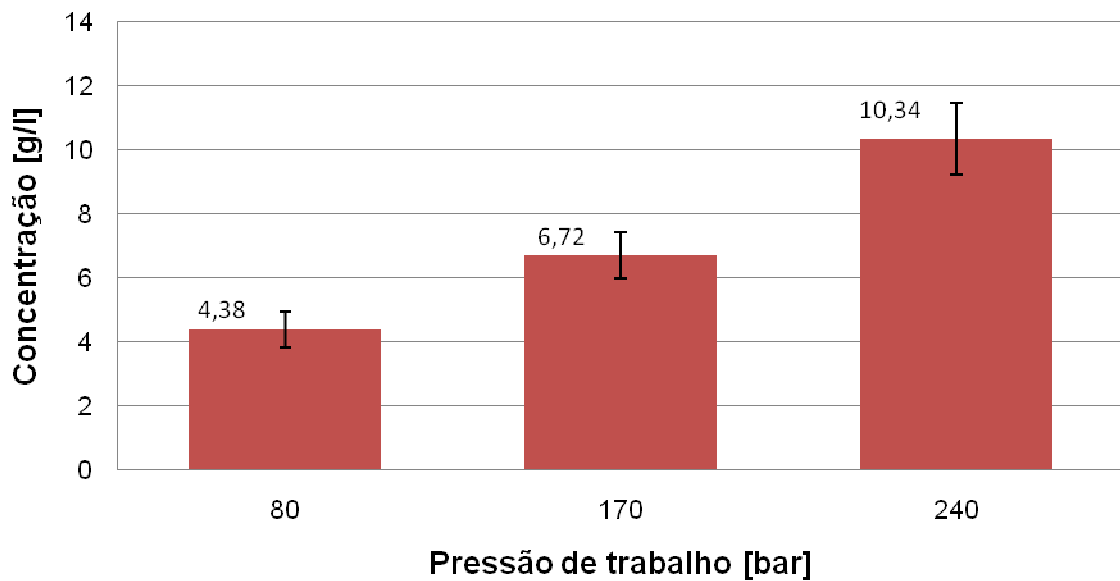


Figura 4.31 – Consumo de abrasivo para avaliação do efeito da variação da pressão de trabalho no processo.

Nota-se que o aumento na pressão exerce influência na quantidade de abrasivo que alimenta o processo. Conforme relatado por Momber e Kovacevic (1998), a pressão do jato influencia a taxa do fluxo de alimentação de abrasivo. A quantidade que é sugada para dentro da câmara de mistura no bico *venturi*, depende da velocidade do fluxo de ar devido à pressão na mangueira de sucção de abrasivo, a sucção cresce com o aumento na pressão do jato de água, que arrasta o fluxo de partículas abrasivas.

4.3. Influência do tamanho da partícula de SiC no AJEDM

As Figuras 4.32 a 4.34 apresentam os resultados de TRM, TD e DVR, respectivamente, referentes à avaliação de diferentes tamanhos da partícula abrasiva de SiC com pressão de 240 bar no processo.

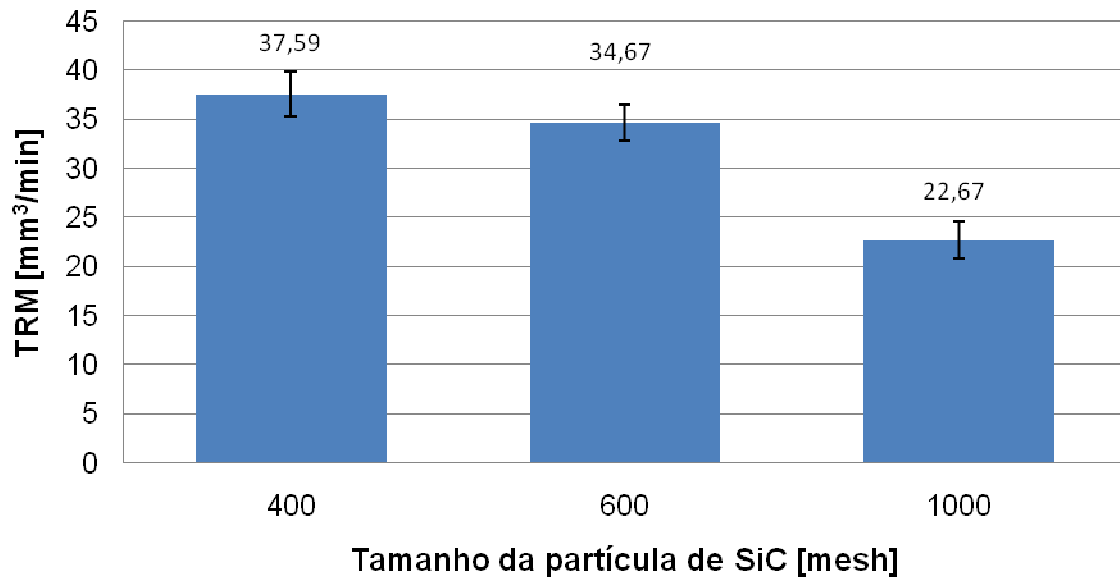


Figura 4.32 – TRM para diferentes tamanhos da partícula do abrasivo SiC com pressão de trabalho de 240 bar no processo.

Nota-se que a usinagem com partículas de 400 e 600 mesh produziu TRMs semelhantes. Mas são cerca de 65% maiores em comparação com a de 1000 mesh.

Como observado por Benedict (1987), o tamanho da partícula do abrasivo tem influência sobre a remoção de material, maiores granulometria retiram maior quantidade de material. Partículas maiores aumentam a TRM, provavelmente estas exercem um efeito de arraste sobre o metal líquido mais acentuado na superfície da peça.

No caso do processo AJEDM, provavelmente as partículas maiores exercem fortes pressões ao expulsar maior quantidade do material arrancado da superfície usinada por EDM, empurrando a camada refundida para fora da cavidade usinada.

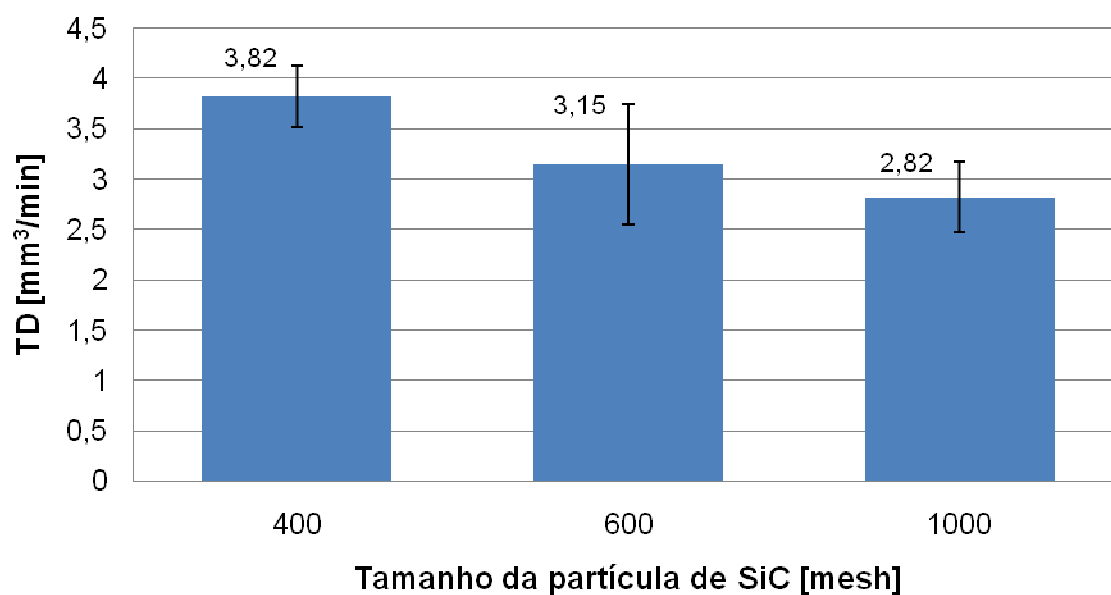


Figura 4.33 – TD para diferentes tamanhos da partícula do abrasivo SiC com pressão de trabalho de 240 bar no processo.

Nota-se que os valores da TD sofrem alterações significativas entre os diferentes tamanhos de partícula abrasiva de SiC, com destaque para 1000 e 400 mesh. Ocorre uma discreta vantagem para a granulometria de 400 mesh em relação à de 1000 mesh. Como observado na TRM, partículas maiores exercem maior influência na remoção de material. Como ambas as superfícies (peça e ferramenta) sofrem o efeito de arraste das partículas, logo, a partícula abrasiva de 400 mesh exerceu maior desgaste da ferramenta.

Segundo Zhao (2002), embora a EDM com pós melhore a eficiência do processo, ela causa uma série de problemas como, por exemplo, maior desgaste do eletrodo-ferramenta, em comparação com a EDM convencional.

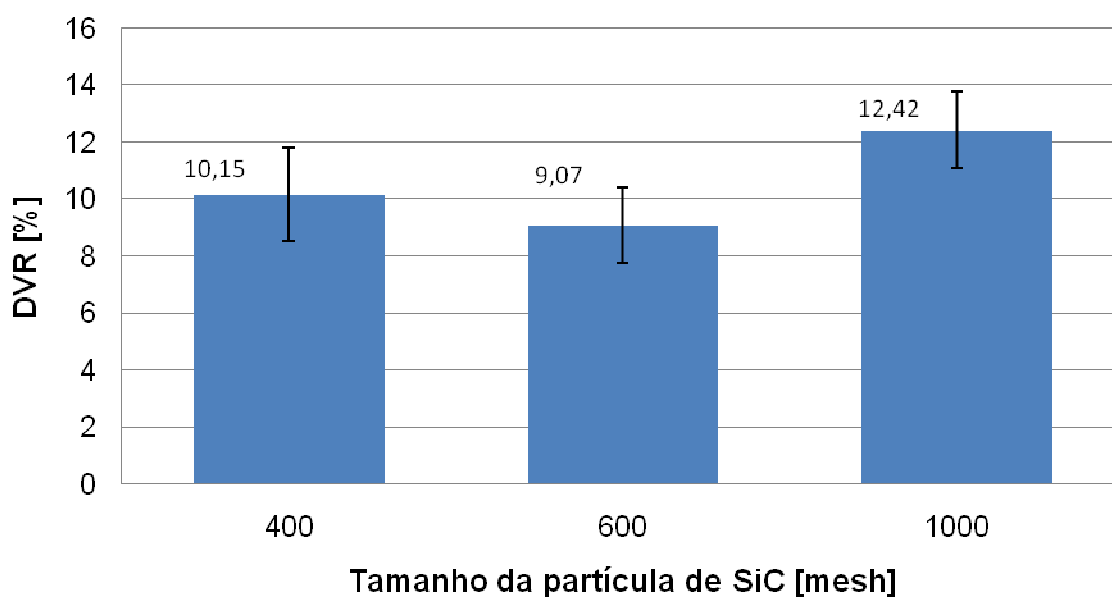


Figura 4.34 – DVR para diferentes tamanhos da partícula do abrasivo SiC com pressão de trabalho de 240 bar.

Pode-se destacar o menor desgaste médio (9%) provocado pela usinagem com a partícula de SiC de 600 mesh. Isso explica a recomendação de Fernandes (1999) para o uso da granulometria de 600 mesh. Essa granulometria produz valores de TRM tão alta quanto a de 400 mesh, combinada com o baixo valor da TD da granulometria de 1000 mesh. Essa combinação promove o seu bom desempenho em relação ao DVR. Provavelmente, essa granulometria é a mais adequada à fenda de trabalho.

4.4. Desempenho dos abrasivos SiC e Al_2O_3 no AJEDM

Os gráficos das Figuras 4.35 a 4.47 apresentam os resultados de TRM, TD e DVR, respectivamente, referentes à avaliação do desempenho dos abrasivos SiC e Al_2O_3 de 600 mesh no processo AJEDM com pressões de trabalho de 80, 130, 170 e 240 bars.

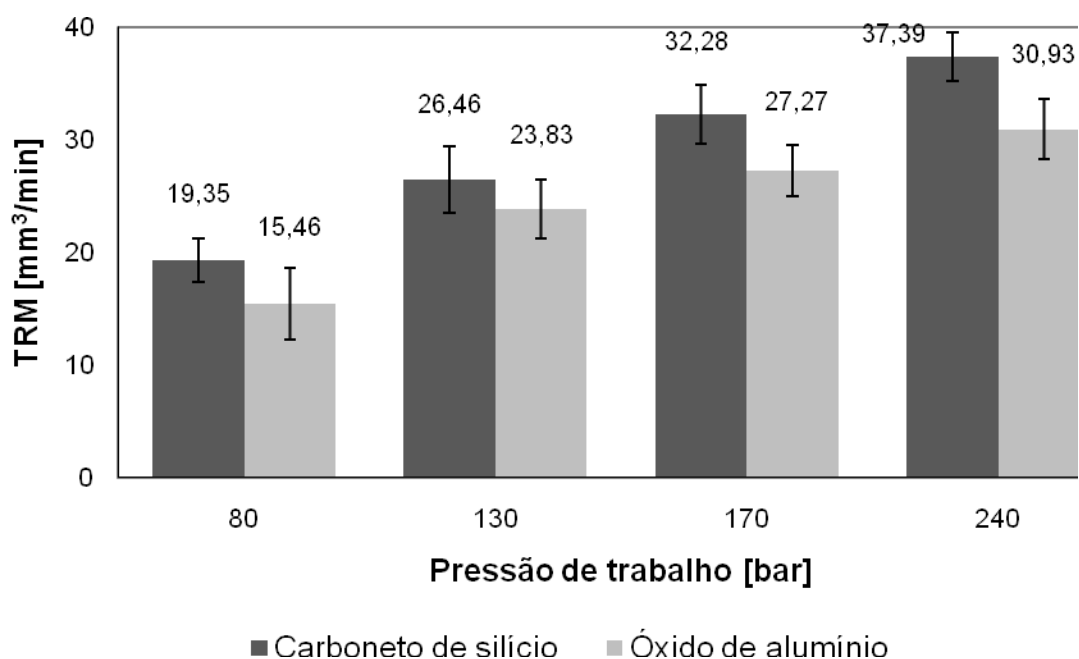


Figura 4.35 – TRM para avaliação de desempenho dos abrasivos SiC e Al₂O₃ de 600 mesh no processo nas pressões de 80, 130, 170 e 240 bars.

Nota-se que com o aumento da pressão de trabalho ocorreu um aumento da TRM, tanto para SiC com Al₂O₃. Observa-se ainda, que na média, tem-se um melhor desempenho para o SiC. A maior dureza do SiC, Tabela 4.3, contribui para esse discreto aumento, no valor da TRM.

Tabela 4.3 – Propriedades dos abrasivos SiC e Al₂O₃.

| Abrasivo | Dureza, H_V [kgf/mm ²]* | Fragilidade, K_{Ic} [MPa.m ^{1/2}]** |
|--------------------------------|---------------------------------------|---|
| SiC | 2500 | 5 |
| Al ₂ O ₃ | 2000 | 4 |

* Hutchings (1992).

** ASM Metals Handbook (1992)

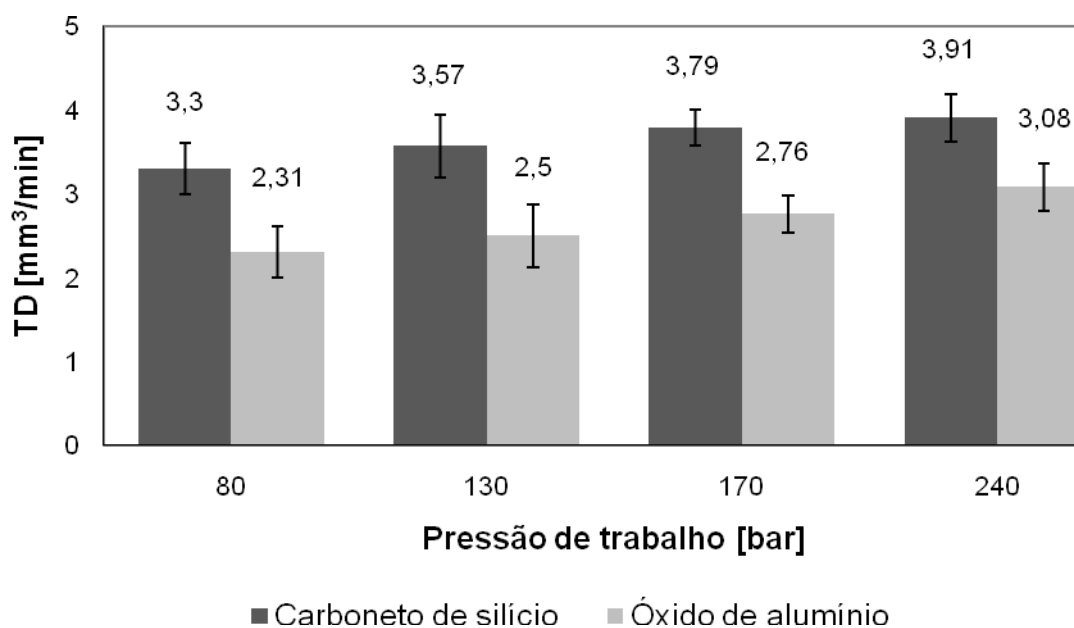


Figura 4.36 – TD para avaliação de desempenho dos abrasivos SiC e Al₂O₃ de 600 mesh no processo nas pressões de trabalho de 80, 130, 170 e 240 bars.

A TD com abrasivo SiC é superior a do Al₂O₃, como ocorreu com a TRM. As duas superfícies dos eletrodos ferramenta e peça ficam sujeitas à ação das partículas abrasivas.

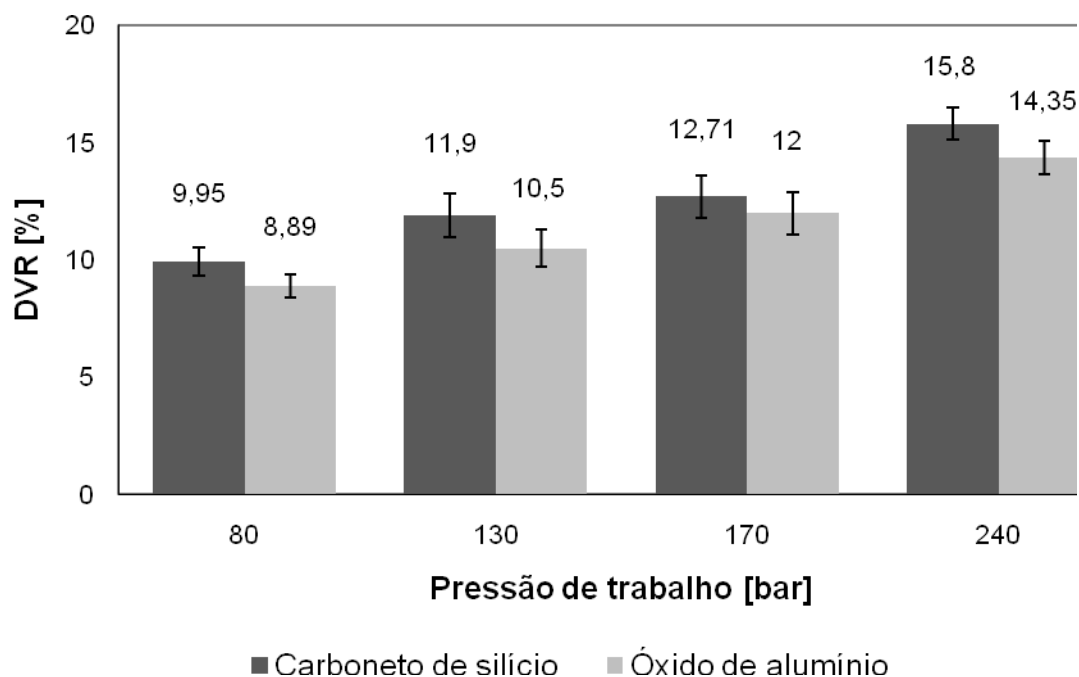


Figura 4.37 – DVR para avaliação de desempenho dos abrasivos SiC e Al₂O₃ de 600 mesh no AJEDM nas pressões de trabalho de 80, 130, 170 e 240 bars.

Os resultados demonstram que ambos os abrasivos, SiC e Al_2O_3 , comportaram-se, de modo semelhante, com relação ao desempenho do DVR.

O gráfico da Figura 4.38 apresenta os resultados do consumo de abrasivo SiC e Al_2O_3 referentes à avaliação de desempenho no processo AJEDM.

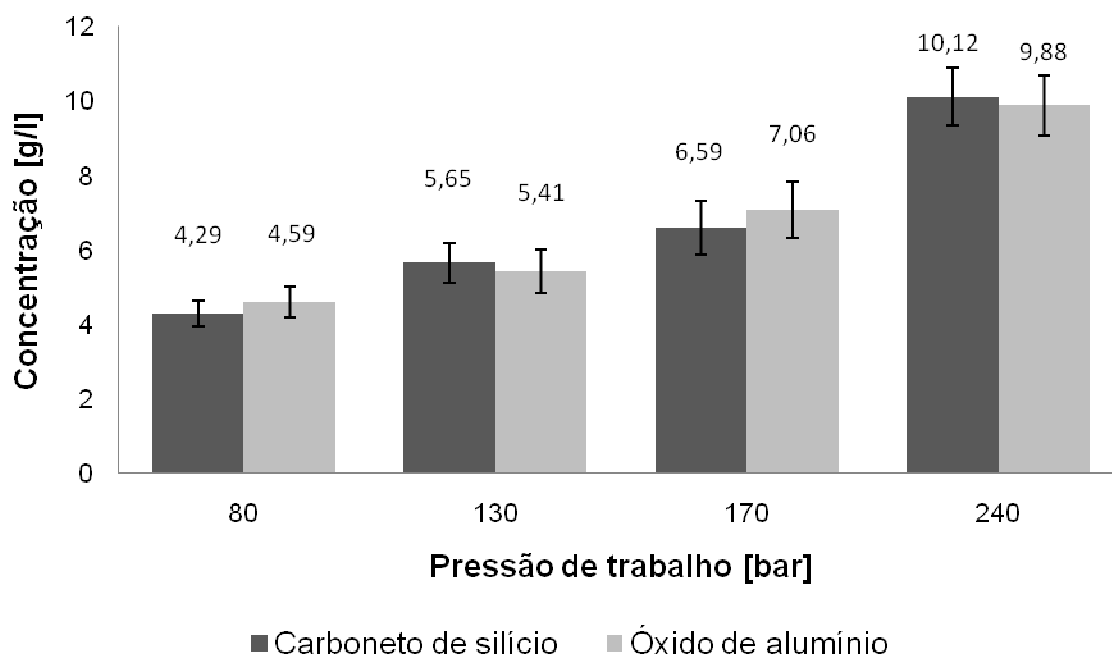


Figura 4.38 – Consumo dos abrasivos SiC e Al_2O_3 de 600 mesh [concentração em g/l] para avaliação de desempenho nas pressões de trabalho de 80, 130, 170 e 240 bars.

Observa-se que o comportamento dos dois tipos de abrasivos (SiC e Al_2O_3) é praticamente o mesmo em relação à taxa de alimentação de abrasivo na câmara de mistura do bico *venturi*. Essa taxa, em ambos abrasivos, só sofre alterações provocadas pelo aumento da pressão de trabalho.

Não pode ser ignorada a contribuição da variação da concentração de abrasivos no aumento dos valores dos parâmetros de TRM, RD e DVR. É difícil o controle da quantidade de abrasivo que é sugado pela câmara de mistura. Esse problema não foi constatado por Arantes (2007), já que o mesmo utilizou uma concentração fixa de usou 30 g/l em sua pesquisa. Nesse caso, o abrasivo era misturado ao fluido dielétrico antes de passar pela bomba.

A utilização de um aparelho dosador para controlar a quantidade de abrasivo que entra na câmara de mistura pode ser uma solução para corrigir esse inconveniente na aplicação do bico *venturi*.

4.5. Efeito do espalhamento das descargas

As Figuras 4.39 a 4.42 ilustram imagens obtidas, com câmera fotográfica de alta velocidade, da descarga elétrica, em sequência, da usinagem com água deionizada e óleo mineral, ambos sem abrasivo e água deionizada com partículas abrasivas de SiC e Al_2O_3 de 600 mesh, sem pressão.

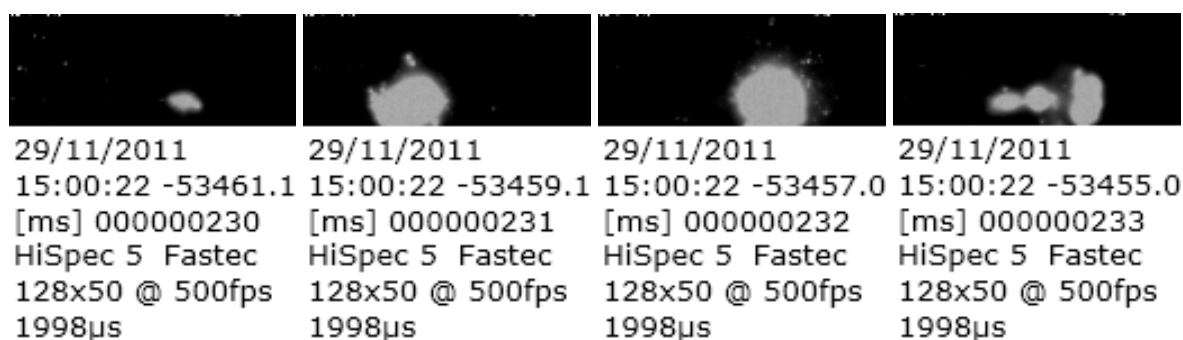


Figura 4.39 – Sequência de fotos da descarga elétrica da usinagem com água deionizada sem pressão.

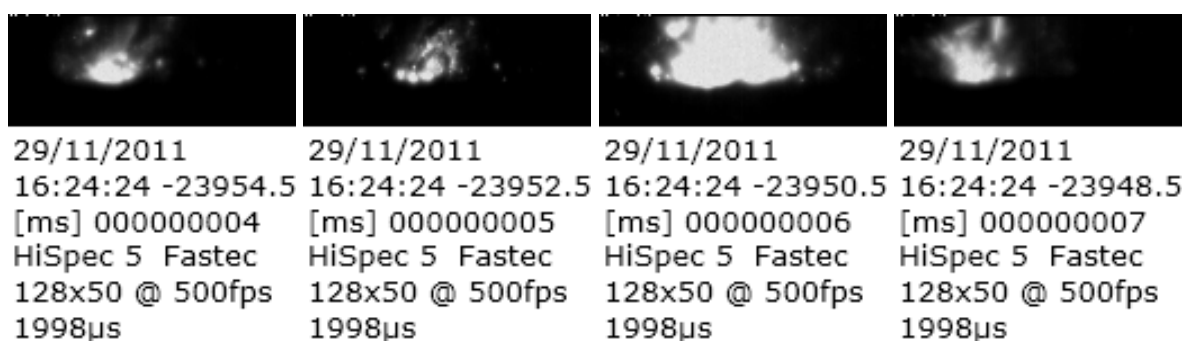


Figura 4.40 – Sequência de fotos da descarga elétrica da usinagem com óleo mineral sem pressão.

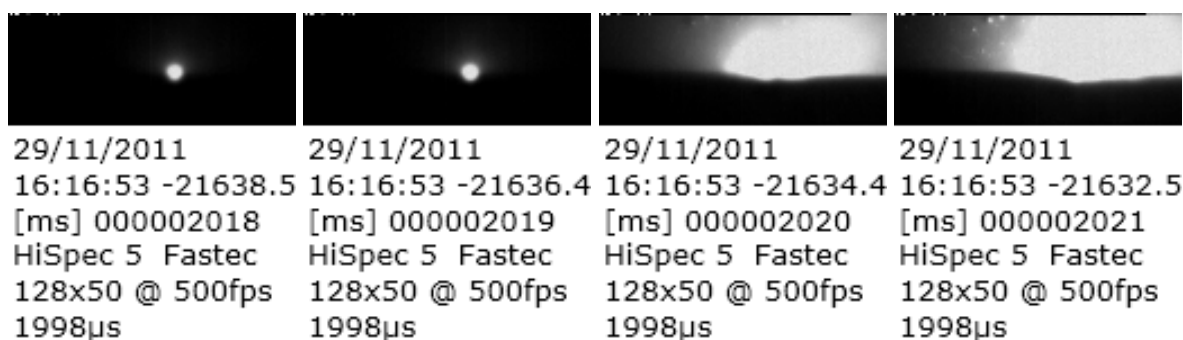


Figura 4.41 – Sequência de fotos da descarga elétrica da usinagem com água deionizada sem pressão com abrasivo SiC de 600 mesh na concentração de 10 g/l.

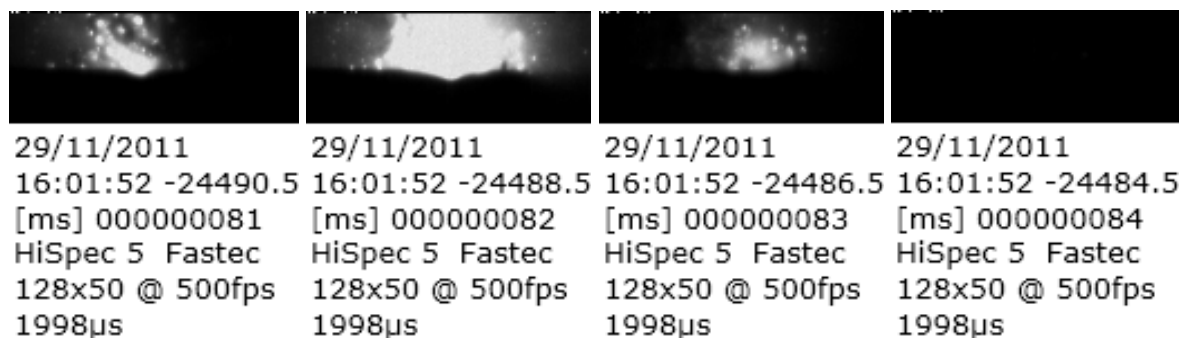


Figura 4.42 – Sequência de fotos da descarga elétrica da usinagem com água deionizada sem pressão com abrasivo Al_2O_3 de 600 mesh na concentração de 10 g/l.

Nota-se que a descarga elétrica com água deionizada como fluido dielétrico é menos concentrada. A fluidez da água promove menores pressões contra o canal de plasma, em comparação com a usinagem com óleo mineral. A adição de partículas abrasivas na água aumenta a condutividade, a densidade e a potência da descarga. Além disso, as partículas abrasivas reduzem a rigidez dielétrica do fluido.

Segundo Arantes (2007), a adição de partículas abrasivas modifica a densidade do fluido dielétrico e aumenta a pressão no arco de plasma. Essa alteração melhora a dispersão das descargas na superfície. Porém, sob baixa pressão essa adição é insuficiente para provocar erosão sem as descargas elétricas. Esse fato foi observado pelo referido autor, por meio de estudos do efeito sinérgico ao comparar a TRM dos processos EDM, AWJM e AJEDM.

A maior contribuição para arrancar material da superfície, durante o processo, é promovida pelas descargas elétricas. Porém, a adição de partículas abrasivas melhora a capacidade de concentração das descargas elétricas, além de o jato pressurizado conter partículas que aumentam a força de deslocamento da camada refundida para fora da fenda de trabalho.

4.6. Proposta do enriquecimento superficial

O enriquecimento por ligas tem sido explorado por outros pesquisadores (Kumar et al. 2009). A proposta é usar a transferência de material do eletrodo-ferramenta, pós diluídos no fluido ou ambos. Entretanto, os resultados alcançados não são satisfatórios para aplicações práticas. Principalmente, devido à não homogeneidade na distribuição dos elementos. Soma-se a isso, o fato de o enriquecimento ocorrer na zona refundida que, normalmente, deve ser extraída após a usinagem.

No processo AJEDM, as partículas são impactadas por pressão contra a superfície do eletrodo peça, isso levantou a hipótese de que poderia ser criada uma alternativa para o enriquecimento por liga de superfícies submetidas a descargas elétricas.

O fato de as partículas abrasivas não se fragmentarem com o impacto sobre a superfície da peça inviabilizou a proposta do enriquecimento por liga de silício (SiC), alumínio (Al_2O_3) e boro (B_4C) da superfície usinada. Outras tentativas, com resultados semelhantes, foram feitas com óxido de nióbio (Nb_2O_5), bissulfeto de molibdênio (MoS_2) e grafite. Em algumas situações, é possível que a realização de tratamentos térmicos de recozimento possa induzir a difusão de elementos para o interior da peça, além de promover uma melhor distribuição dos mesmos.

Tentou-se a utilização de pós finos com nanotubos de carbono diluídos na água. Contudo, com o campo eletromagnético gerado, elas se aglomeraram.

4.7. Influência da variação da geometria da extremidade do eletrodo-ferramenta

Os gráficos das Figuras 4.43 a 4.45 apresentam os resultados de TRM, TD e DVR, respectivamente, referentes à influência da variação da geometria da extremidade do eletrodo-ferramenta com jato abrasivo de SiC de 500 mesh com pressão de 240 bar no processo AJEDM.

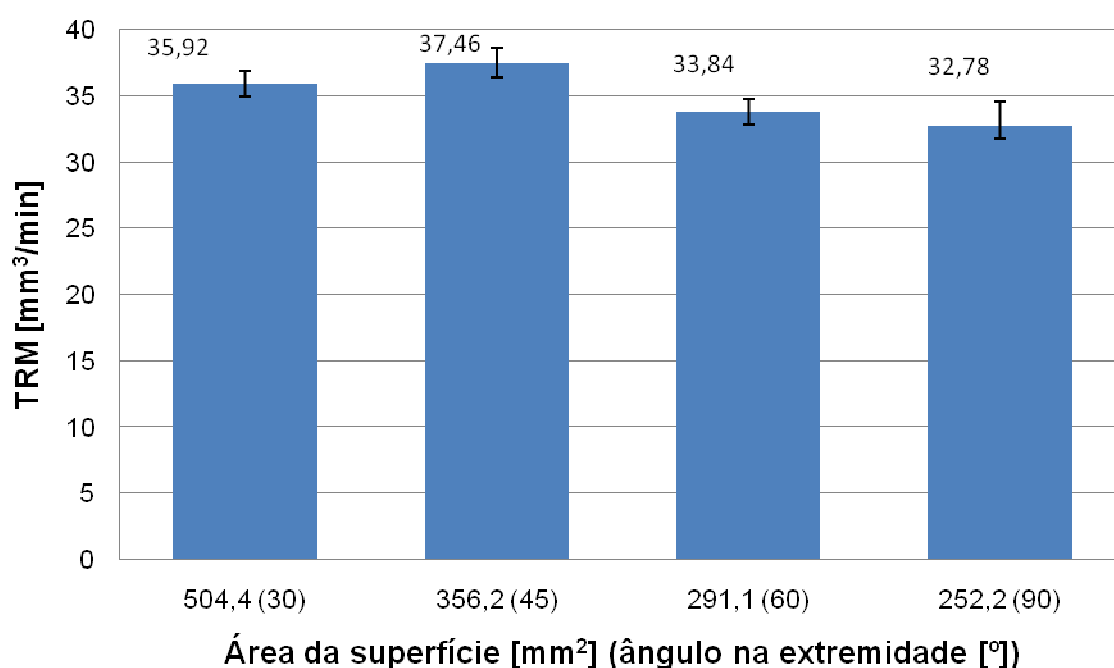


Figura 4.43 – TRM em relação à variação da geometria da extremidade da ferramenta com jato abrasivo de SiC de 500 mesh com pressão de 240 bar no processo.

Nota-se que a variação da geometria da extremidade da ferramenta no processo exerce pouca influência no valor da TRM. A pressão de trabalho de 240 bar do jato pressurizado não é suficiente para promover um desgaste erosivo capaz de alterar o mecanismo de remoção de material significativamente. Porém essa discreta variação na TRM é compatível com os resultados obtidos por Teles (2012), quando o mesmo realizou testes para avaliação do desgaste erosivo do aço AISI M2, com Al_2O_3 de 400 mesh na pressão de trabalho 80 bar.

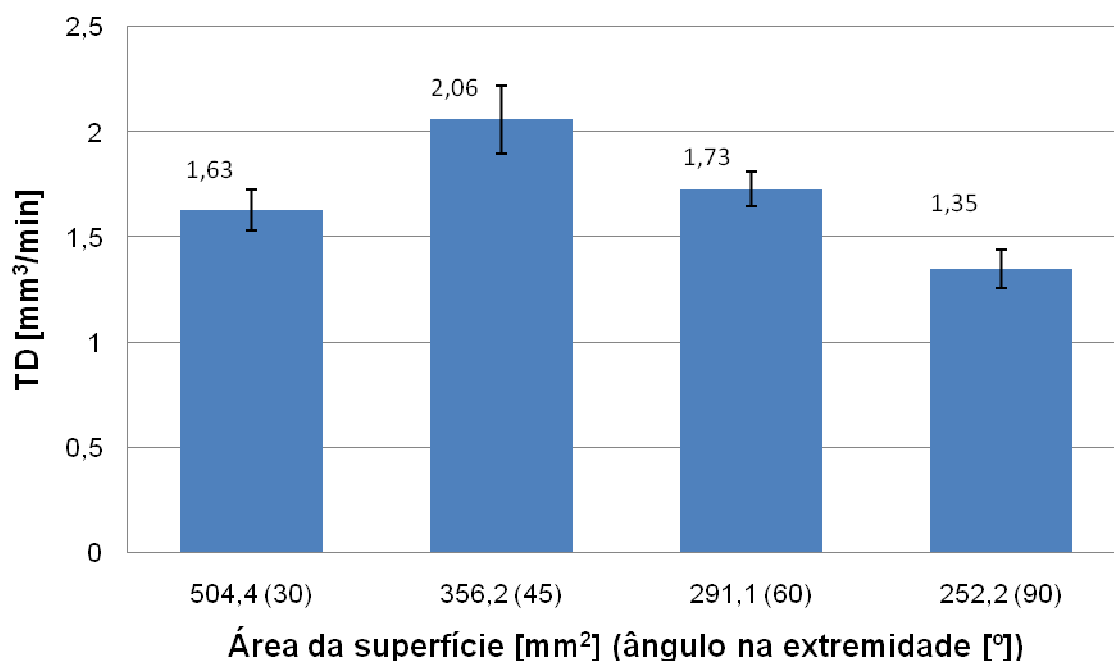


Figura 4.44 – TD em relação à variação da geometria da extremidade da ferramenta com jato abrasivo de SiC de 500 mesh com pressão de 240 bar.

Observa-se que em relação à TD, apenas o ângulo de 45° promoveu um desgaste maior em relação aos demais, aproximadamente 50% a mais que no ângulo de 90°. Porém manteve seu valor próximo aos dos outros dois ângulos (30° e 60°). Não causando variações significativas.

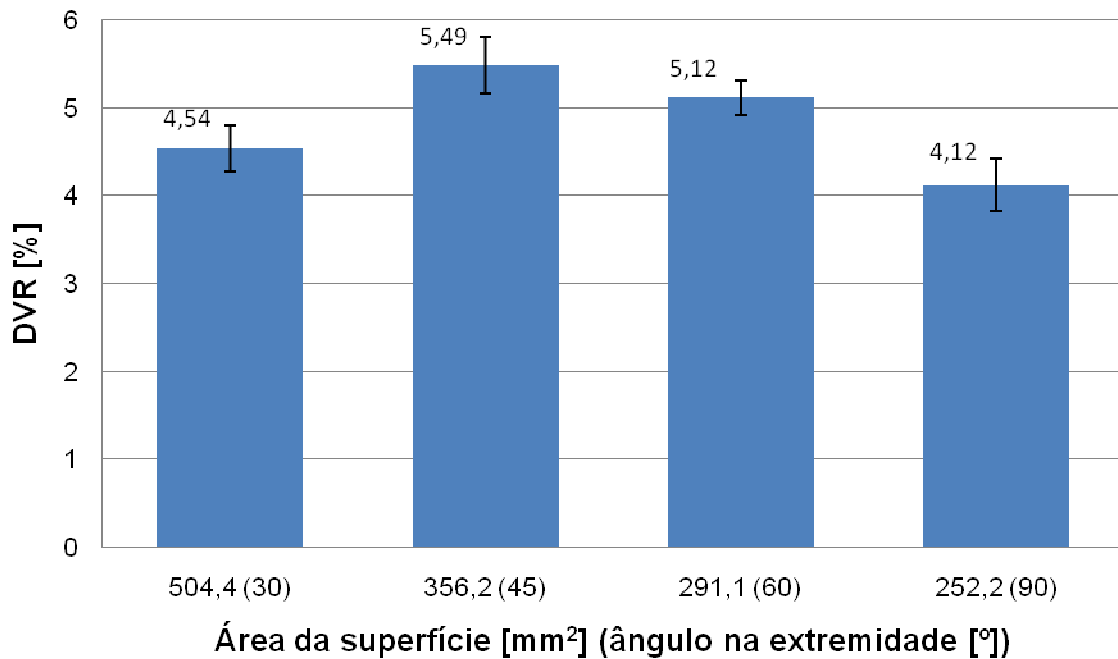


Figura 4.45 – DVR em relação à variação da geometria da extremidade da ferramenta com jato abrasivo de SiC de 500 mesh no processo com pressão de 240 bar.

Nota-se que, em relação ao DVR, o comportamento para os quatro ângulos da extremidade da ferramenta avaliados foi semelhante, pois os valores do DVR ficaram na faixa de 4 a 5%.

A Figura 4.46 ilustra uma foto da cavidade usinada pelo processo AJEDM da extremidade com ângulo de 30°, com abrasivo SiC de 500 mesh na pressão de trabalho de 240 bar. A imagem mostra também o eletrodo-ferramenta usado para produzir a cavidade.

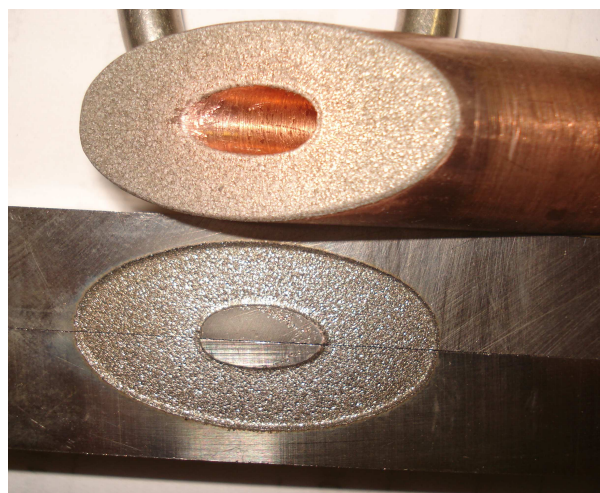


Figura 4.46 – Cavidade usinada obtida da extremidade com ângulo de 30° e respectivo eletrodo-ferramenta utilizado no processo com SiC de 500 mesh na pressão de 240 bar.

Observa-se que a cavidade obtida da usinagem no processo da extremidade com ângulo de 30° tem o mesmo aspecto da cavidade do ângulo de 90°, vista anteriormente na Figura 4.12.

4.8. Influência dos abrasivos SiC, Al₂O₃ e B₄C de 320 mesh no AJEDM

Os gráficos das Figuras 4.47 a 4.49 apresentam os resultados de TRM, TD e DVR, respectivamente, referentes à influência dos abrasivos SiC, Al₂O₃ e B₄C (carboneto de boro) de granulometria 320 mesh no processo AJEDM. Pressão de 240 bar e regime de trabalho de desbaste severo com corrente de 30 A.

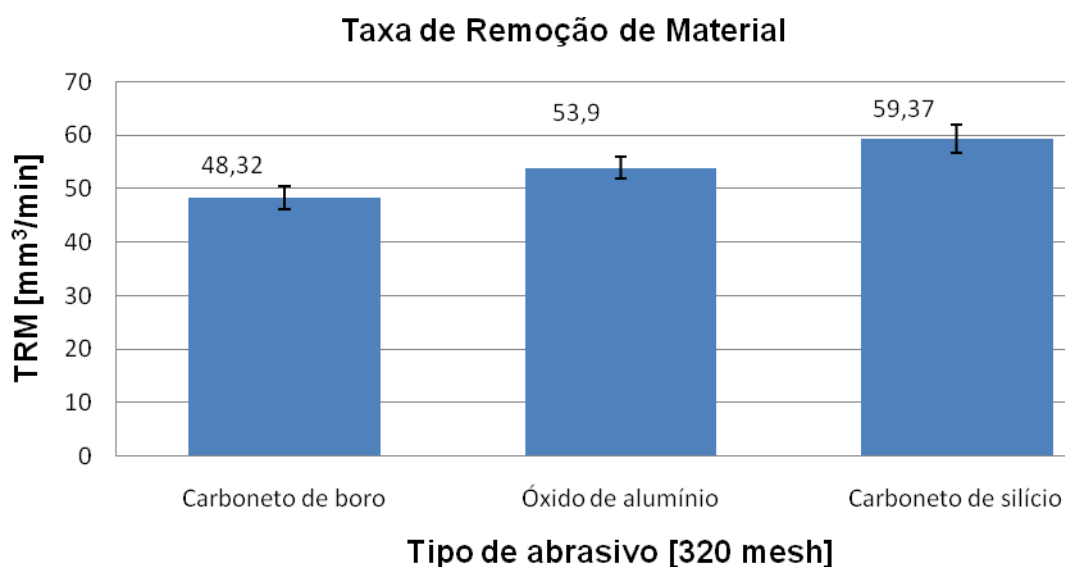


Figura 4.47– TRM dos abrasivos SiC, Al₂O₃ e B₄C com granulometria de 320 mesh na pressão de 240 bar.

Observa-se um discreto ganho na TRM, usando-se o abrasivo SiC em relação ao B₄C, com valor aproximadamente 20% maior.

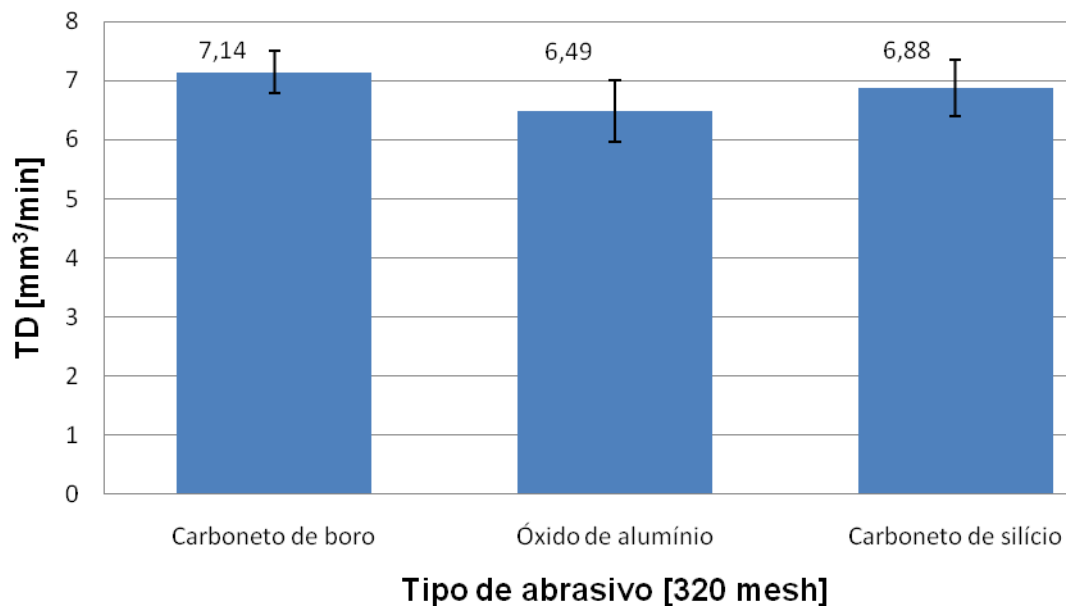


Figura 4.48 – TD dos abrasivos SiC, Al₂O₃ e B₄C de granulometria 320 mesh na pressão de 240 bar.

Nota-se que, entre os valores da TD, não ocorreu nenhuma mudança significativa.

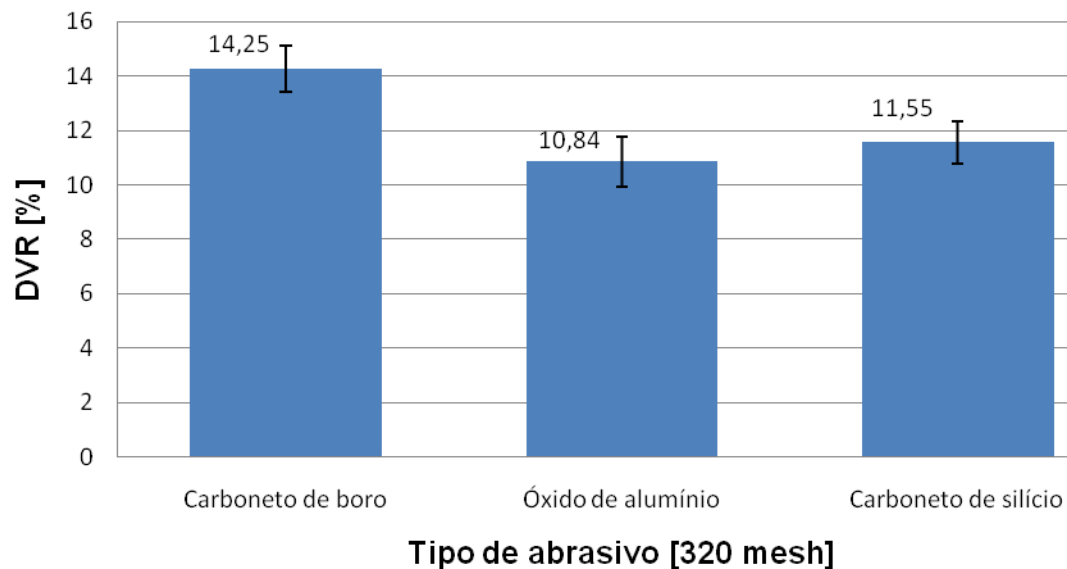


Figura 4.49– DVR dos abrasivos SiC, Al₂O₃ e B₄C de 320 mesh para pressão de trabalho de 240 bar.

A menor TRM, promovida pelo B_4C , em relação aos abrasivos SiC e Al_2O_3 , acompanhada da equivalência nos valores da TD entre os três tipos de abrasivos, aumentou o valor do DVR do B_4C em aproximadamente 40% a mais em relação ao Al_2O_3 .

As Figuras 4.50 a 4.52 ilustram imagens de MEV dos abrasivos SiC , Al_2O_3 e B_4C de granulometria 320 mesh, novos.

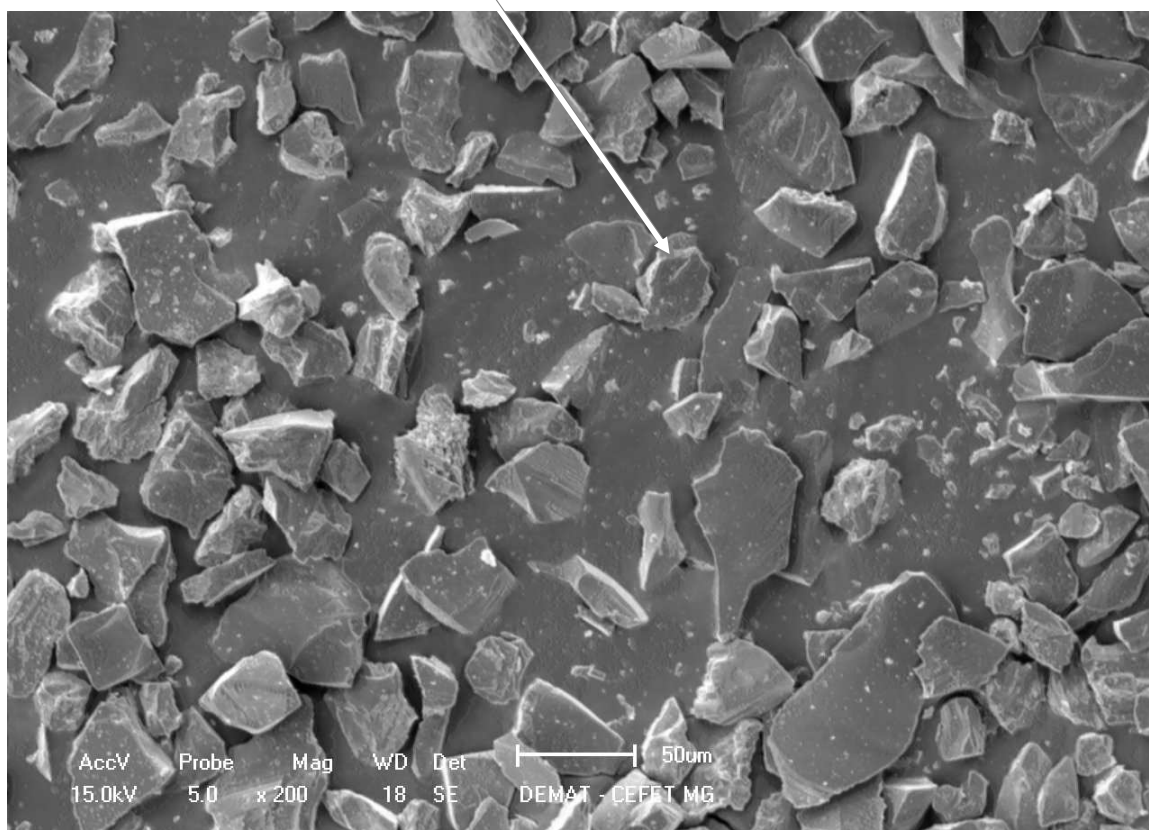
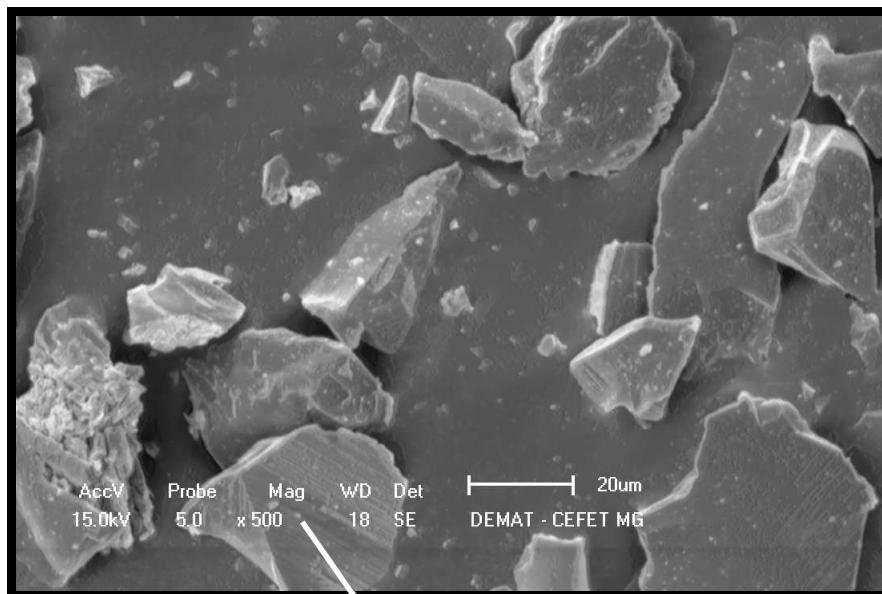


Figura 4.50 – Imagens de MEV do abrasivo SiC de granulometria 320 mesh.

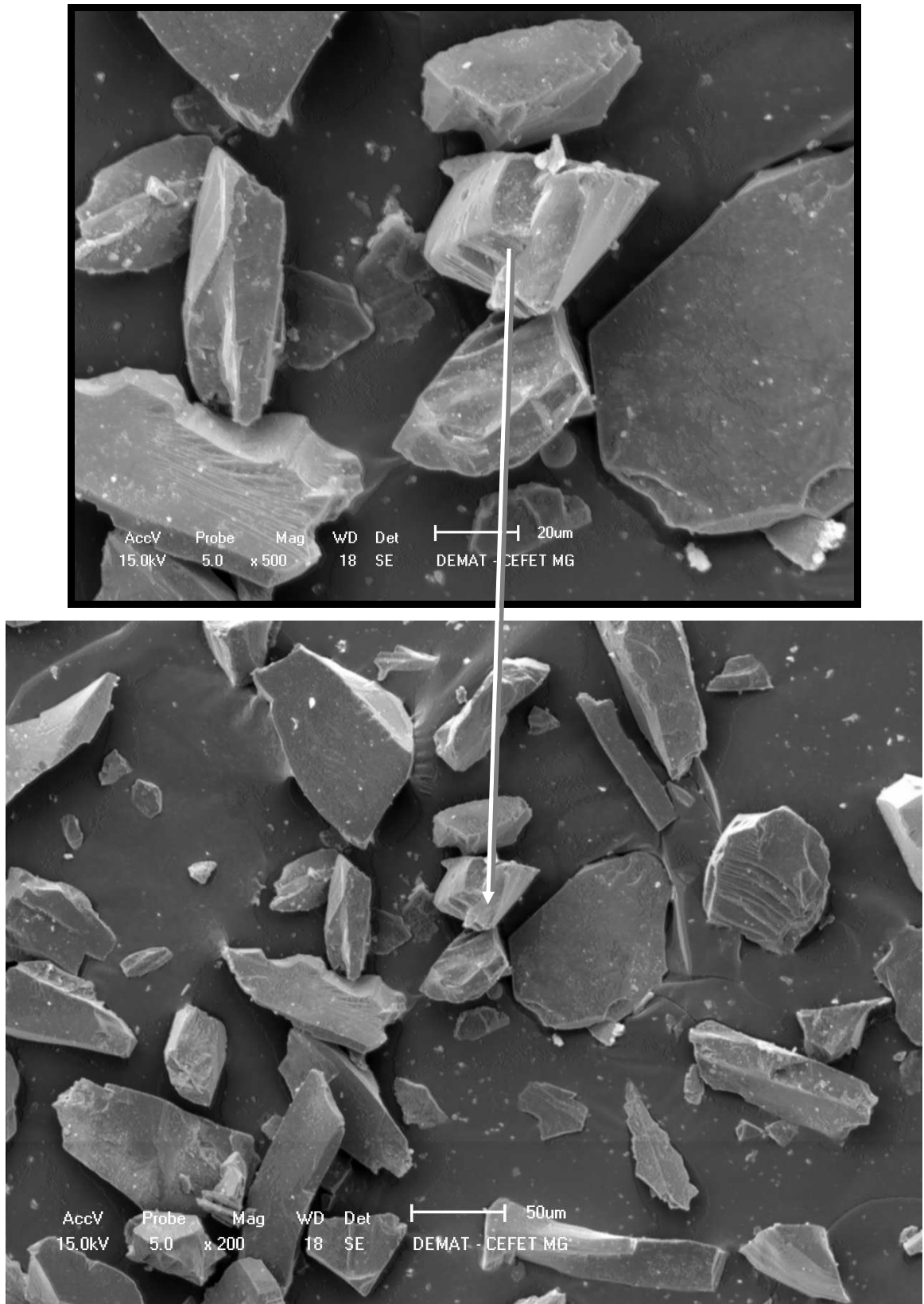


Figura 4.51 – Imagens de MEV do abrasivo Al_2O_3 de granulometria 320 mesh.

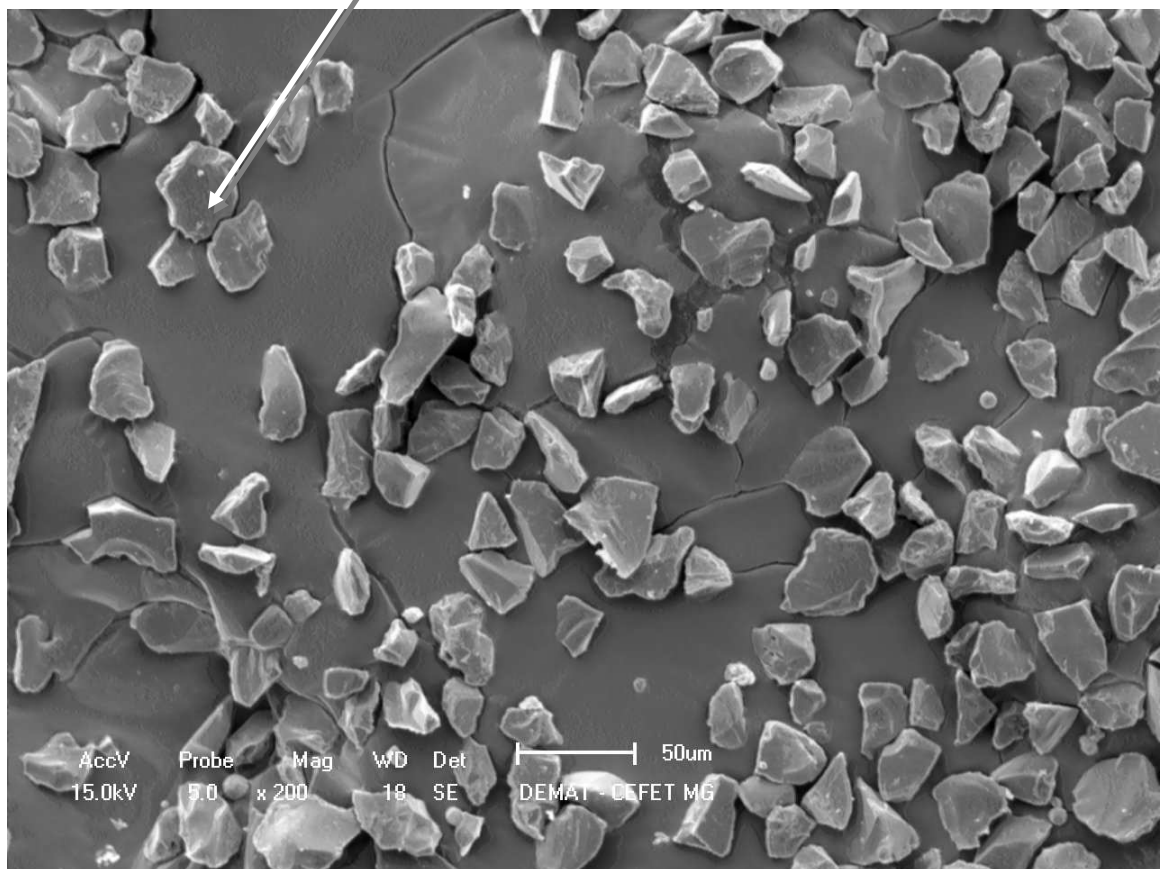
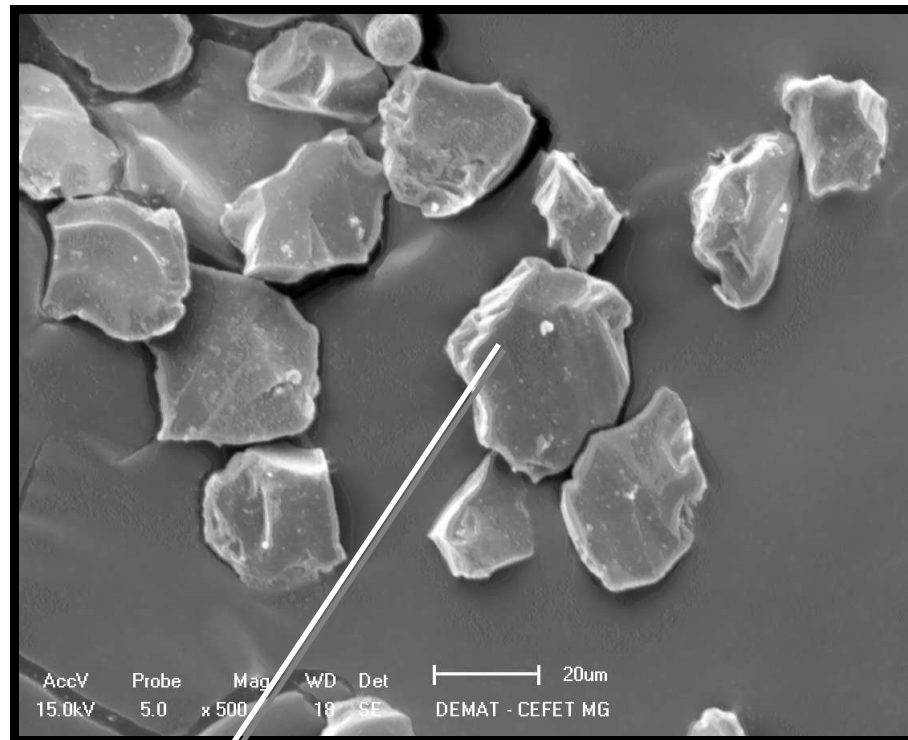


Figura 4.52 – Imagens de MEV do abrasivo B₄C de granulometria 320 mesh.

As imagens de MEV dos abrasivos mostram que o B_4C tem menor angulosidade que SiC e Al_2O_3 . Nota-se também que o abrasivo B_4C apresenta uma distribuição mais uniforme no tamanho das partículas. A maior angulosidade dos abrasivos SiC e Al_2O_3 melhora as condições de remoção de material, nesse caso, da camada refundida.

A maior variação no tamanho das partículas abrasivas do SiC e da Al_2O_3 exercem uma discreta influência na taxa de remoção de material destes abrasivos em relação ao B_4C . A Tabela 4.4 apresenta o preço dos abrasivos SiC, Al_2O_3 e B_4C de granulometria 320 mesh usados nos testes.

Tabela 4.4 – Preço dos abrasivos SiC, Al_2O_3 e B_4C de granulometria 320 mesh.

| Abrasivo | Unidade monetária |
|-----------|-------------------|
| SiC | 2 |
| Al_2O_3 | 1 |
| B_4C | 15 |

Nota-se o preço mais elevado do abrasivo B_4C em relação ao SiC e Al_2O_3 , o que pode constituir um fator restritivo ao seu uso.

4.9. Mecanismo de desgaste

A explicação para a contribuição das partículas abrasivas no processo AJEDM é a de que as mesmas atuam sobre uma superfície de metal líquido. Esse fato pode ser comprovado pelas seguintes observações:

1º) não há registros de marcas de desgastes por erosão na superfície tanto do eletrodo-ferramenta (Figura 4.6) quanto na camada refundida do eletrodo-peça (Figuras 4.13, 4.14 e 4.26 a 4.28) e

2º) presença de partículas abrasivas ficam incrustadas na superfície do eletrodo-ferramenta (Figuras 4.6 e 4.7) e na camada refundida do eletrodo-peça (Figuras 4.9 e 4.10);

Para reforçar essa hipótese, adotou-se um procedimento que permitiu a análise do material subtraído da superfície usinada.

Após realização da usinagem com o processo AJEDM no aço AISI M2, as partículas abrasivas que ficaram sobrepostas à cavidade usinada e ao topo do suporte de fixação das amostras, como ilustra a Figura 4.53, foram recolhidas e analisadas por meio de imagens de MEV.



Figura 4.53 – Partículas abrasivas depositadas na cavidade usinada e no topo do suporte de fixação das amostras após a usinagem do aço AISI M2.

A Figura 4.54 ilustra uma imagem de MEV das micro-partículas extraídas, misturadas ao pó abrasivo, nesse caso, B_4C .

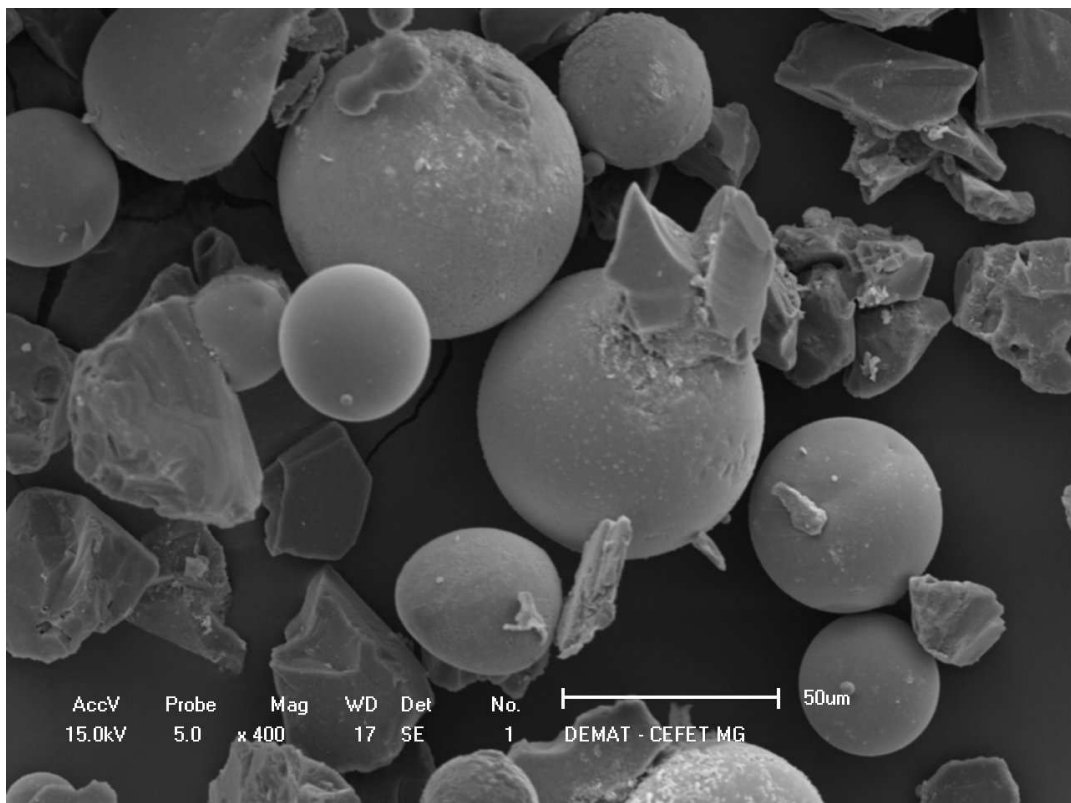


Figura 4.54 – Imagem de MEV das micro-partículas extraídas obtidas da usinagem do aço AISI M2 pelo processo misturadas ao abrasivo B_4C de 320 mesh.

A Figura 4.55 ilustra uma imagem de MEV de uma quantidade de partículas abrasivas de SiC de 320 mesh aglutinadas ao material removido da peça de aço AISI M2.

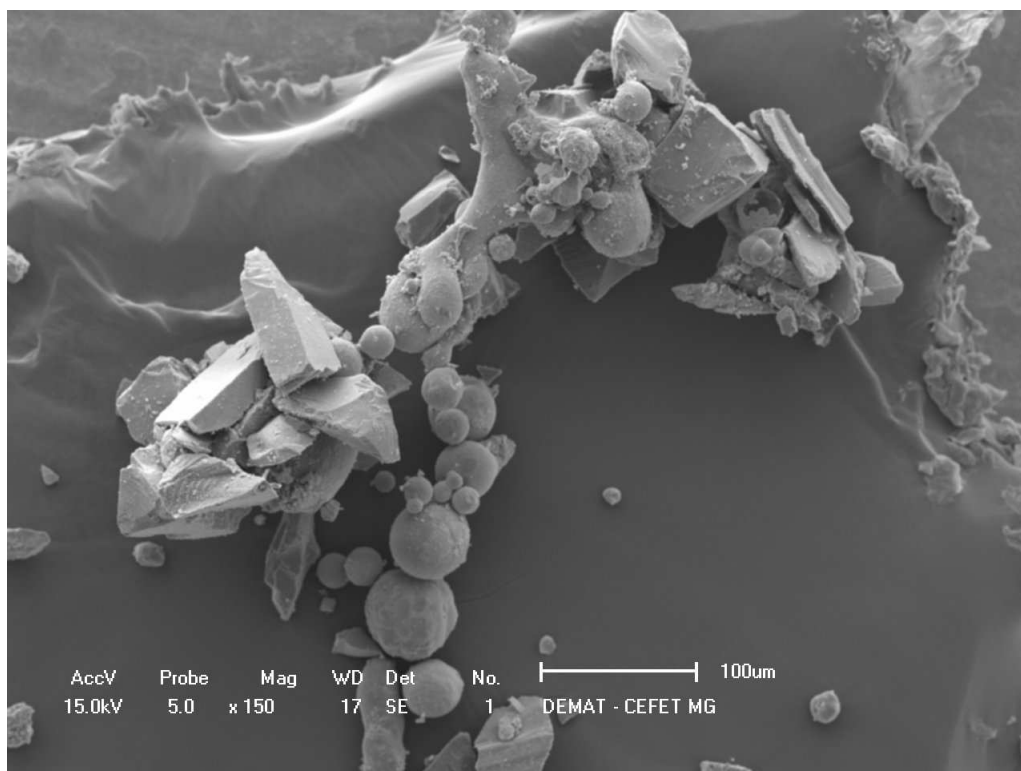


Figura 4.55 – Imagem de MEV de partículas abrasivas de SiC de 320 mesh aglutinadas ao material removido da peça de aço AISI M2.

Nota-se que algumas partículas abrasivas e fragmentos das mesmas ficaram aderidas nas micro-partículas extraídas.

Durante a usinagem com o abrasivo SiC ocorreram a formação de micro-partículas de ferro provenientes da peça de aço AISI M2, que se juntam ao abrasivo, como ilustra a Figura 4.56. Uma análise de EDS, na imagem da Figura 4.56, corrobora essa afirmação, como mostra o gráfico do espectro de EDS (Figura 4.57). O formato esférico das micro-partículas extraídas do metal líquido deve-se a ação do vapor que reduz a taxa de resfriamento das mesmas. Esse mesmo fenômeno é observado na literatura por Khanra et al. (2007).

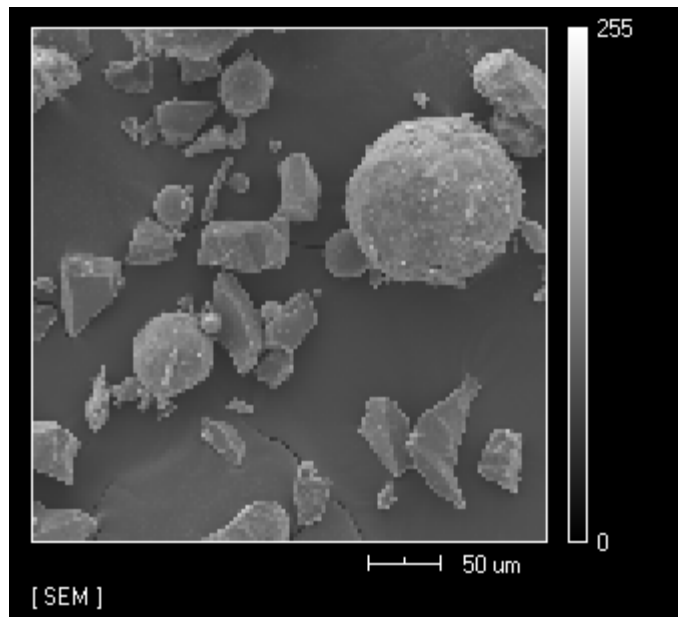


Figura 4.56 – Imagem de MEV das partículas abrasivas de SiC de 320 mesh, junto às micro-partículas extraídas obtidas da usinagem do aço AISI M2 pelo AJEDM

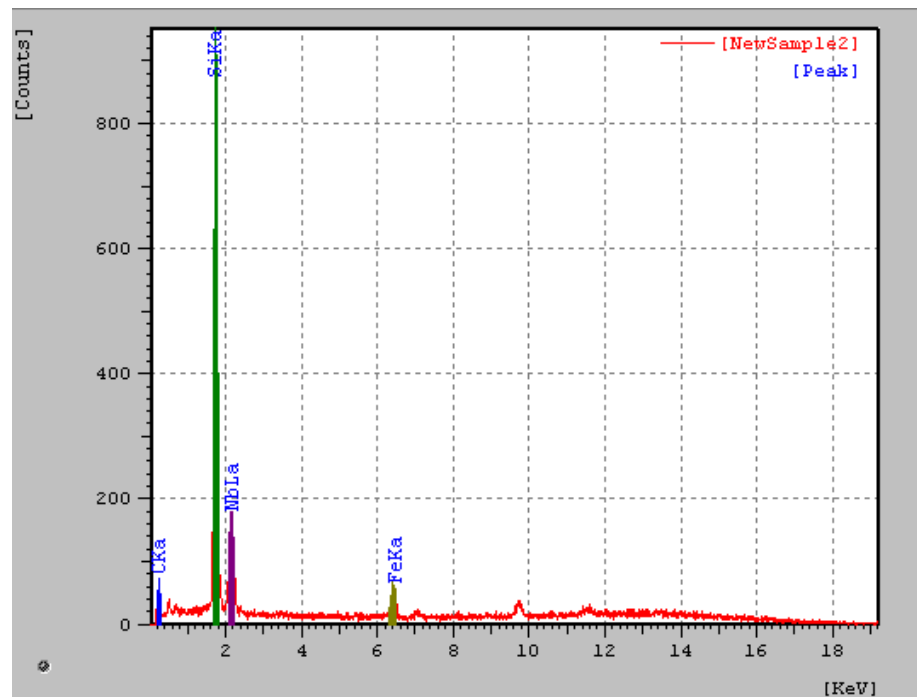


Figura 4.57 – Gráfico do espectro de EDS da imagem da Figura 4.56.

A Figura 4.58 ilustra imagem de MEV de uma partícula abrasiva de SiC de 320 mesh aderida à uma micro-partícula extraídas do aço AISI M2.

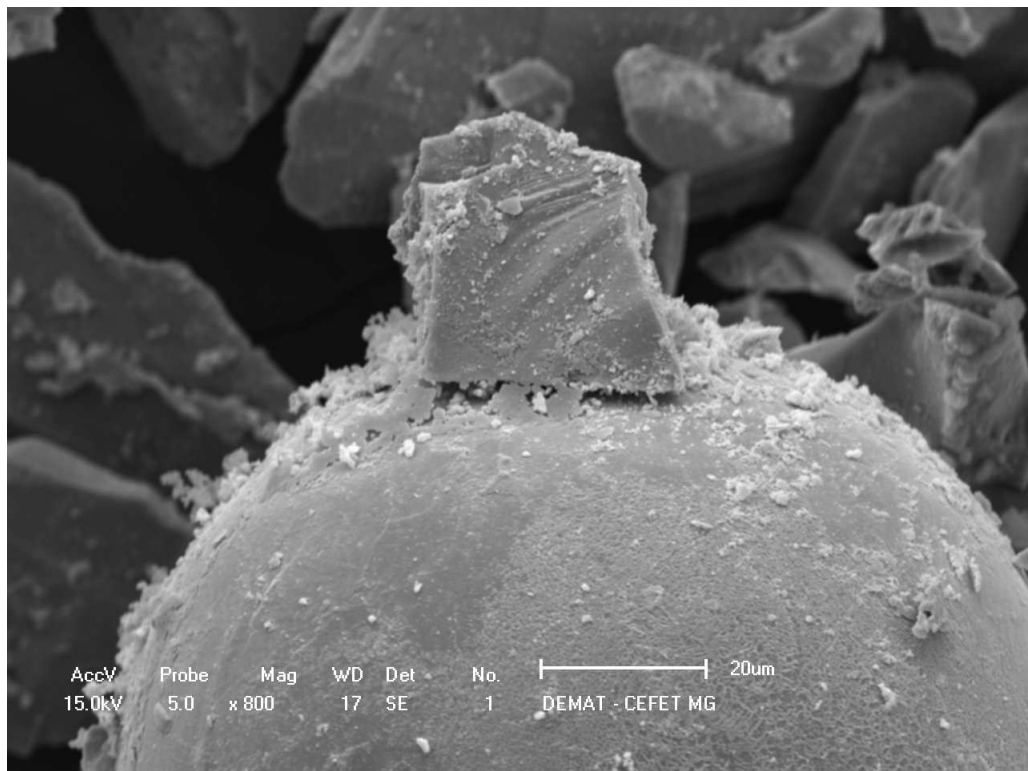


Figura 4.58 – Imagem de MEV de micro-partícula extraídas do aço AISI M2 com abrasivo SiC de 320 mesh aderido à mesma.

O mesmo fenômeno é observado com o titânio, como mostra a Figura 4.59.

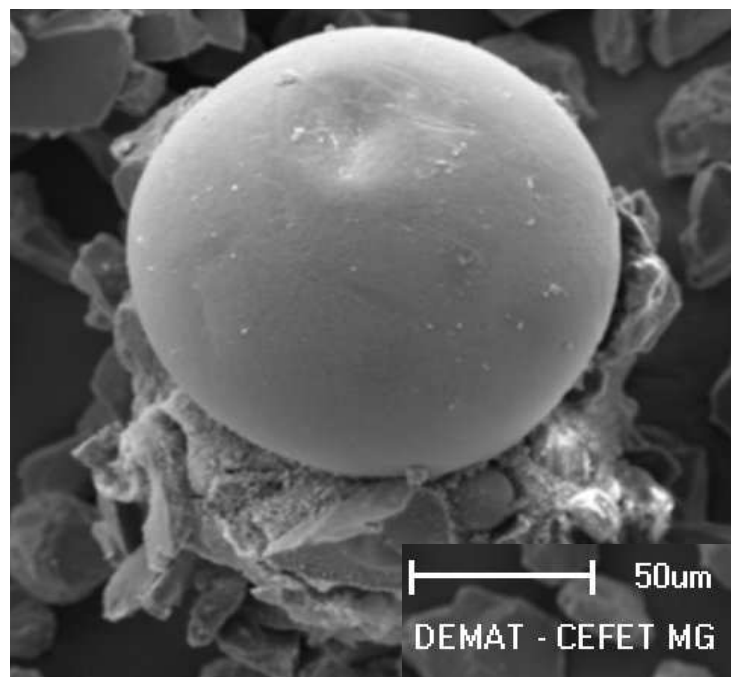


Figura 4.59 – Imagem de MEV de micro-partícula extraídas do titânio com abrasivo SiC de 320 mesh aderido à mesma.

Assim, fica evidenciada a ação das partículas abrasivas no processo AJEDM. Essas análises demonstram que o mecanismo de desgaste atuante não é propriamente erosivo. As partículas abrasivas não atuam sobre uma superfície sólida. A contribuição delas está relacionada a uma ação de arraste de metal líquido fundido pelas altas temperaturas geradas pelas descargas elétricas. Esse tipo de interação não tem uma classificação ou modelamento conhecido.

4.10. Avaliação da degradação dos abrasivos SiC e Al₂O₃ no AJEDM

Os gráficos das Figuras 4.60 a 4.62 apresentam os resultados de TRM, TD e DVR, respectivamente, referentes à avaliação da degradação dos abrasivos SiC e Al₂O₃ de granulometria 400 mesh no processo AJEDM.

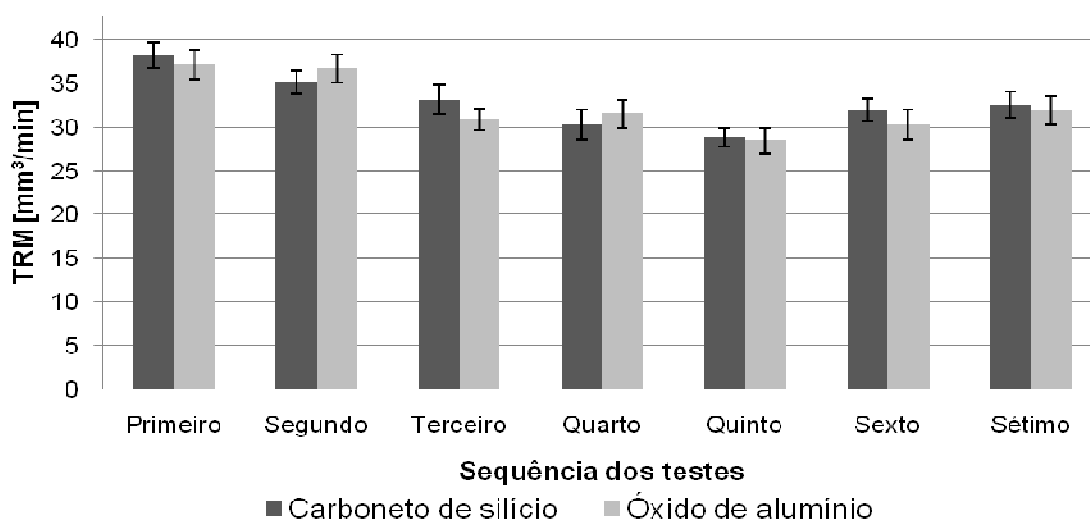


Figura 4.60 – TRM para avaliação da degradação dos abrasivos SiC e Al₂O₃ de 400 mesh com pressão de 240 bar no processo.

Observa-se que não ocorrem mudanças significativas, na média, nos valores da TRM entre as sequências de testes realizados.

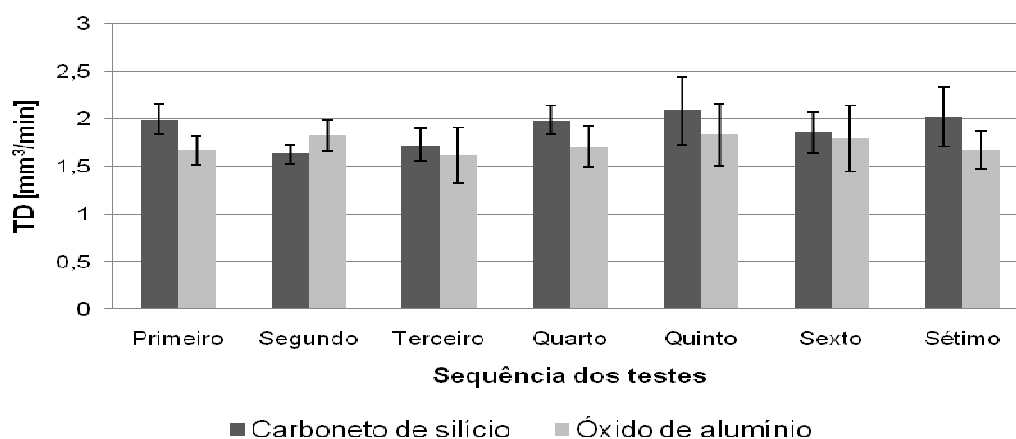


Figura 4.61 – TD para avaliação da degradação dos abrasivos SiC e Al_2O_3 de 400 mesh com pressão de 240 bar no processo.

Nota-se que a TD também não sofreu alterações significativas, na média, ao longo da sequência de testes.

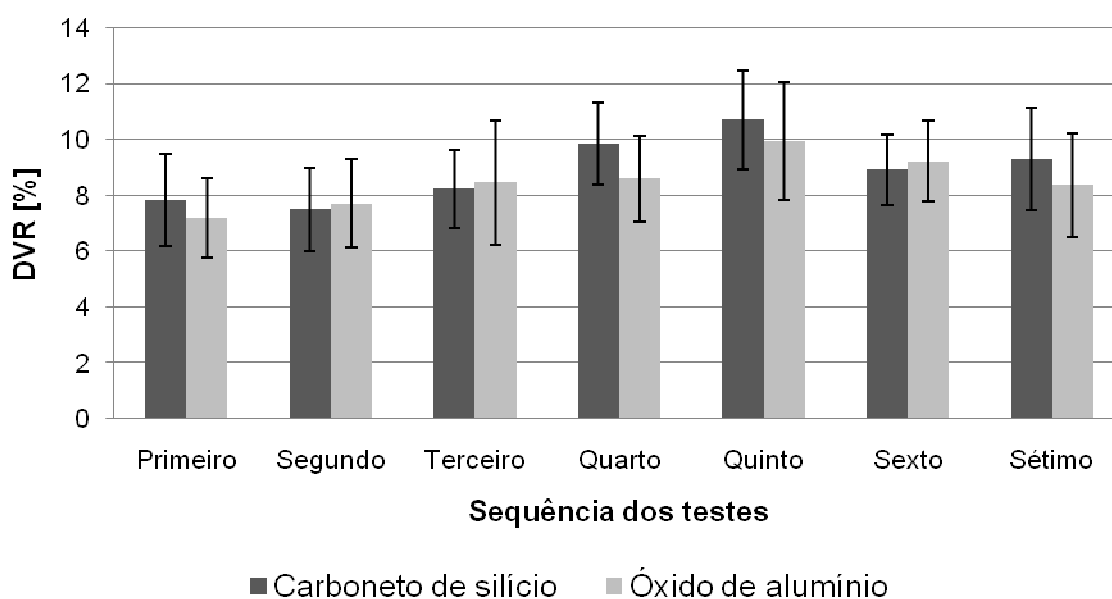


Figura 4.62 – DVR para avaliação da degradação dos abrasivos SiC e Al_2O_3 de 400 mesh com pressão de 240 bar no processo.

Nota-se que o comportamento do DVR mantém os mesmos aspectos em relação à TRM e TD, não sofrendo mudanças significativas, na média, ao longo das séries de testes.

As Figuras 4.63 a 4.66 ilustram imagens de MEV dos abrasivos SiC e Al_2O_3 de granulometria 400 mesh antes de serem aplicados no processo e após o 7º teste.

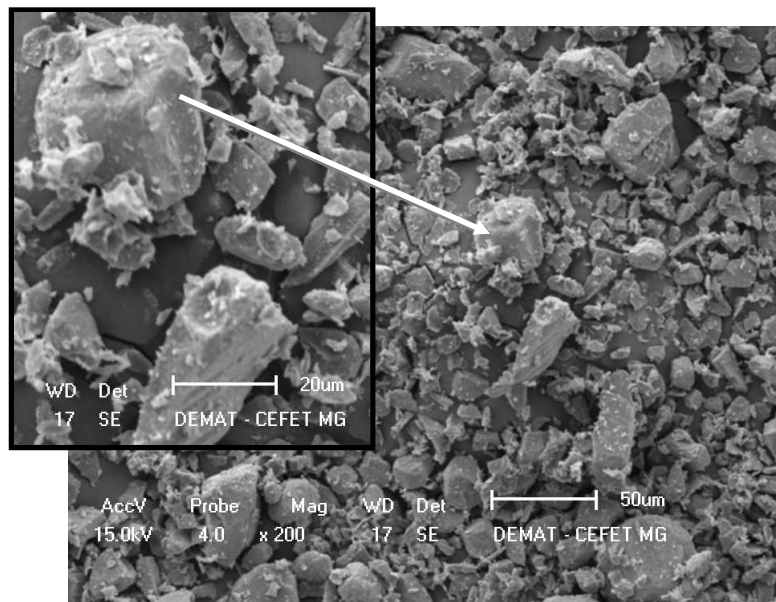


Figura 4.63 – Imagem de MEV do abrasivo SiC de granulometria 400 mesh novo.

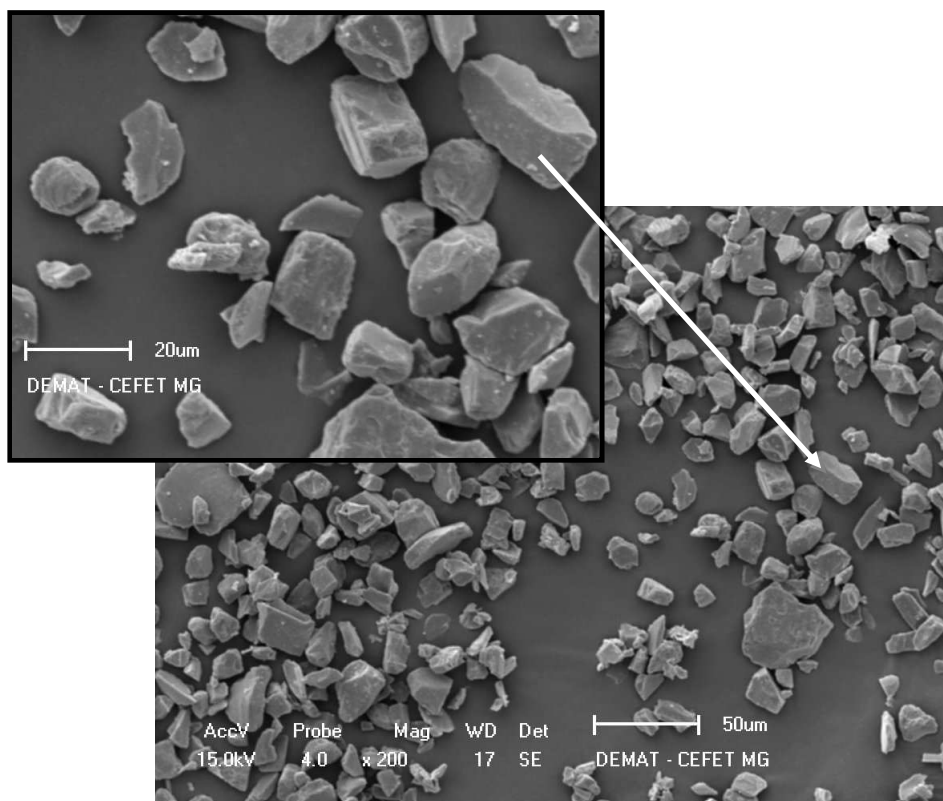


Figura 4.64 – Imagem de MEV do abrasivo SiC de granulometria 400 mesh após 7º teste.

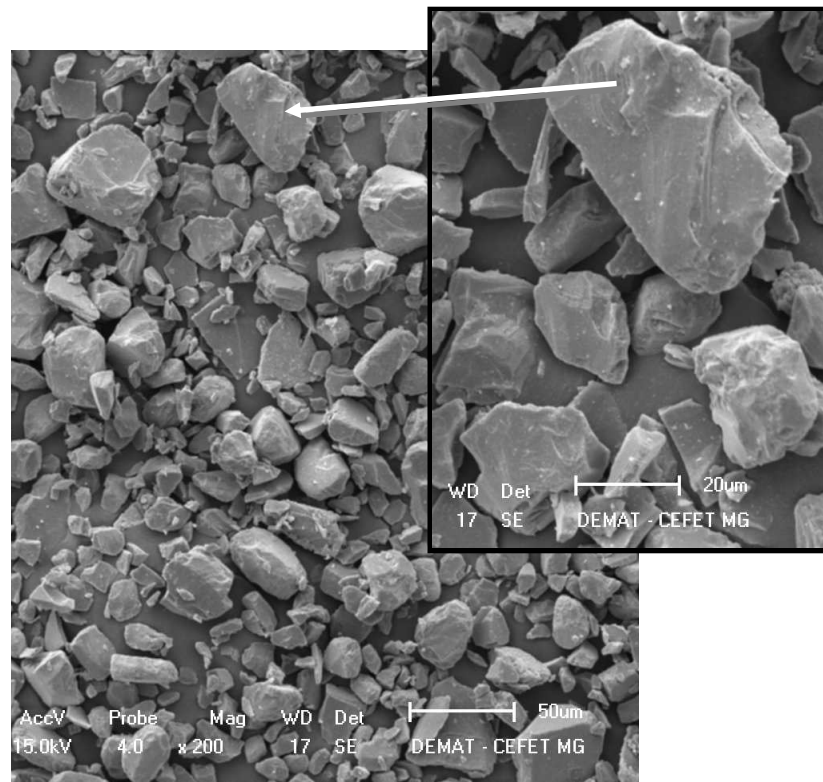


Figura 4.65 – Imagem de MEV do abrasivo Al_2O_3 de granulometria 400 mesh novo.

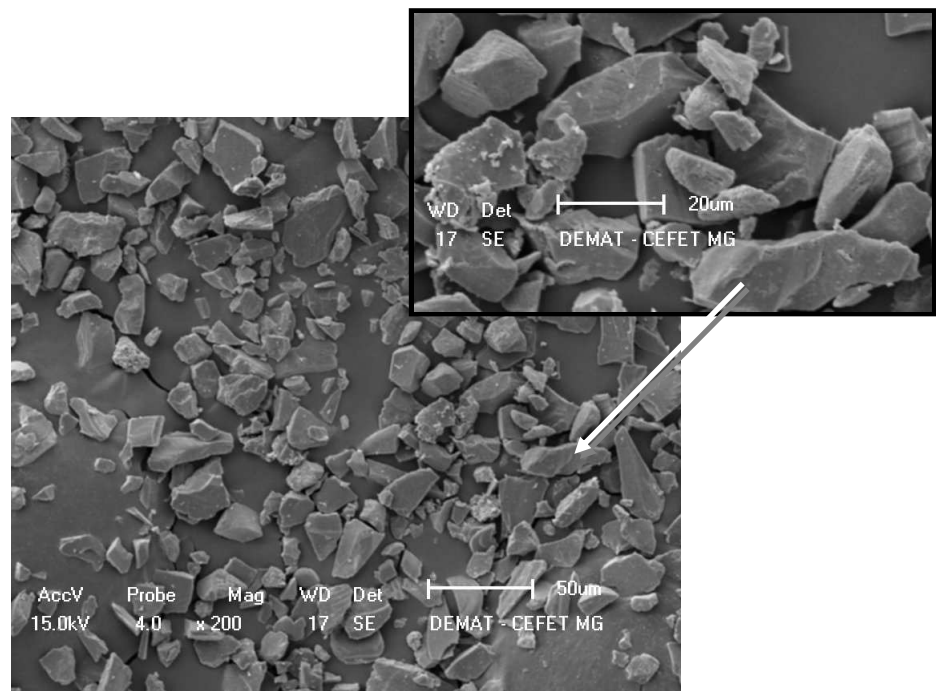


Figura 4.66 – Imagem de MEV do abrasivo Al_2O_3 de granulometria 400 mesh após 7º testes.

Nota-se, em ambos os casos, que, aparentemente, não ocorreram variações significativas na granulometria e nem no formato das partículas abrasivas. Pode-se admitir, no máximo, que pode ter havido uma ligeira queda na granulometria entretanto não houve reflexos nos resultados de TRM, TD e DVR.

4.11. Reciclagem da água deionizada e dos abrasivos

A Tabela 4.5 apresenta os resultados da análise de fluorescência por energia dispersiva de raio-x da água deionizada nova, usada no processo antes e após a filtragem.

Tabela 4.5 – Elementos detectados na análise de fluorescência por energia dispersiva de raio-x da água deionizada.

| Condição da água deionizada | Elemento(s) detectados na análise | Condutividade elétrica, μS |
|---|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Antes do processo de usinagem | nenhum | 2 |
| Usada no AJEDM com SiC 400 mesh | silício | 6 |
| Usada no AJEDM com Al_2O_3 400 mesh | ferro e cobre | 8 |
| Filtrada após AJEDM com SiC | nenhum | 7 |
| Filtrada após AJEDM com Al_2O_3 | nenhum | 10 |

Os resultados da Tabela 4.5 mostram que ocorre aumento da condutividade elétrica da água com a presença de abrasivo e não houve redução da condutividade após a filtragem. A fluorescência detectou a presença de silício quando se usou SiC, mas não registrou, com era de se esperar, a presença ferro e cobre. Por outro lado, o ferro e cobre foram detectados quando se usou Al_2O_3 , entretanto não se detectou a presença de alumínio, provavelmente devido ao tamanho das partículas liberadas e/ou a pequena quantidade. O que reforça essa hipótese é o fato do processo de filtragem não as ter eliminado, já que a condutividade elétrica continua elevada. Isso indica que a técnica de fluorescência não foi suficiente para detectadas as micro-partículas. A variação da condutividade elétrica da água deionizada, usada no processo e filtrada, não afeta o processo EDM por penetração. Em processo EDM, a água deionizada não é competitiva com óleos minerais. Entretanto, a sua aplicação no processo AJEDM mostrou-se viável e satisfatória, já que a mesma produziu valores de TRM de até 50% do valor da usinagem com óleo sem pressão. Seu baixo custo em relação ao óleo mineral, bem como as questões ambientais com armazenamento e

saúde do operador justificam sua utilização. Além disso, fica demonstrada a viabilidade da sua reciclagem no processo AJEDM.

A reutilização dos abrasivos também é viável, pois Não ocorreram mudanças significativas nos abrasivos, como fragmentação ou perda de angulosidade das partículas de SiC e Al_2O_3 . A baixa degradação dos abrasivos SiC e Al_2O_3 viabiliza a reciclagem dos mesmos.

4.12. Análise de custos das implementações do sistema *Venturi*

O anexo apresenta tabelas com um levantamento detalhado dos custos para implementação do sistema *venturi* no processo AJEDM.

As implementações visaram a preservação dos componentes internos da máquina de EDM contra a oxidação provocada pela água deionizada. Além disso, evitou-se a contaminação de 420 litros de óleo mineral contidos no reservatório da máquina.

A bomba de alta pressão de 250 bar comportou-se adequadamente durante o processo de usinagem combinada com a máquina EDM. A mesma foi escolhida devido ao seu menor preço, em relação às outras máquinas de maior capacidade, porém de maior custo. Outro aspecto que levou-se em consideração foi a disponibilidade de assistência técnica do equipamento.

Os custos totais com a implementação do sistema *venturi* representam aproximadamente 15% do valor de uma máquina de EDM nova. A utilização do sistema de *venturi* no processo de usinagem híbrido AJEDM mostrou-se viável já que o mesmo promoveu TRM de aproximadamente 4 vezes maior do que a usinagem com água deionizada sem pressão.

Outra possibilidade, é a aplicação do sistema *venturi* com a aplicação de óleo vegetal com fluido dielétrico.

O trabalho de pesquisa possibilitou ao doutorando administrar recursos financeiros concedidos por órgão de fomento (FAPEMIG), por meio de levantamento de orçamentos e estudos de viabilidade econômica para aquisição de máquinas e equipamentos.

CAPÍTULO V

5.1. Conclusões

A partir dos ensaios realizados e dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A aplicação do sistema de *venturi* apresentou um avanço no AJEDM, já que a utilização do mesmo preserva a vida dos componentes internos da bomba auxiliar de pressão (80 a 250 bar);
- As modificações realizadas na máquina EDM possibilitaram a proteção e prevenção da contaminação dos componentes e do óleo mineral armazenado na máquina;
- As implementações para viabilizar o processo AJEDM demandaram um custo adicional da ordem de 15% em relação ao custo da máquina EDM;
- Entre os materiais avaliados como eletrodo-ferramenta, o cobre eletrolítico e a grafite tiveram melhor desempenho na usinagem pelo processo AJEDM;
- O aumento da pressão do jato de água deionizada no processo AJEDM provoca aumento na taxa de alimentação de abrasivo, bem como na TRM, TD e DVR;
- Os resultados da condição de aplicação do fluido dielétrico demonstraram que o mecanismo de desgaste provocado pelas partículas abrasivas atua no material líquido que forma a camada refundida;
- A aplicação do jato abrasivo com diferentes ângulos de ataque não promoveu variações significativas nos valores de TRM, TD e DVR;
- A camada refundida produzida pelo processo AJEDM, ao longo da seção transversal da cavidade usinada, não é uniforme. A menor espessura ocorre na região de entrada do jato sob pressão, enquanto a maior espessura está na periferia da cavidade, na região de saída do jato;

- A superfície usinada pelo processo AJEDM apresentou poros, micro-trincas, adesão de micro-partículas refundidas e incrustação de partículas abrasivas;
- Ocorreu uma redução na quantidade de micro-trincas que se formam na camada refundida obtida pelo processo AJEDM em relação a usinagem com água deionizada e óleo mineral sem pressão e sem abrasivo. Porém, não ocorreu variação significativa nos comprimentos dessas micro-trincas;
- O abrasivo SiC de 600 mesh foi promoveu o menor valor do DVR;
- As TRM, TD e DVR dos dois tipos de abrasivos (SiC e Al_2O_3) avaliados foram semelhantes para abrasivo de 600 mesh na pressão de 240 bar;
- Os abrasivos SiC, Al_2O_3 e B_4C de granulometria 320 mesh e pressão de 240 bar tiveram um comportamento semelhante nas TRM, TD e DVR;
- Durante o processo de reciclagem dos abrasivos SiC e Al_2O_3 , não ocorreram mudanças significativas na granulometria dos mesmos;
- A água deionizada usada no processo AJEDM pode ser reutilizada, após ser descontaminada de partículas metálicas;
- Não houve enriquecimento da superfície por liga, já que as partículas abrasivas não são fragmentadas no processo AJEDM e
- Constatou-se que a presença de partículas abrasivas exerce efeito no espalhamento das descargas.

5.2. Sugestões para trabalho futuros

- Utilizar o processo AJEDM para viabilizar o processo simultâneo de usinagem com nitretação por NDE (nitretação por descargas elétricas);
- Aplicar o processo AJEDM com pressões superiores a 250 bar;
- Avaliar o rendimento da reutilização da água deionizada filtrada e seu desempenho em relação os parâmetros de TRM, TD e DVR;
- Utilizar eletrodo-ferramenta com furos para alimentação de fluido dielétrico na ferramenta assimétrico com movimento rotativo no processo AJEDM;
- Verificar a influência da taxa de alimentação de abrasivos no processo, controlando a quantidade de abrasivo alimentado por meio de um sistema de fornecimento com aparelho dosador;
- Implementar um sistema pressurizado para injeção de abrasivo;
- Utilizar o processo AJEDM combinado com a usinagem ultra-sônica para promover aumento na TRM;
- Avaliar a degradação dos abrasivos usados no processo AJEDM;
- Usar pós finos, acima de 1000 mesh, e fazer tratamento térmico de recozimento na peça para promover um eventual processo difusional de elementos para o metal de base;
- Aplicar óleo vegetal extra fino como dielétrico no processo AJEDM;
- Fotografar o canal de plasma usando a alimentação do fluido dielétrico com pressão (FJEDM) e fluido dielétrico com pressão na presença de abrasivo (AJEDM) e
- Estudar a interação da partícula sólida em movimento com superfície do metal liquefeito.

6. Referências Bibliográficas

ALI, Y. M.; WANG, J. Impact Abrasive Machining. In: JACKSON, M. J.; DAVIM, J. P. **Machining With Abrasives**. London, Springer, 2011. p. 385-419.

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. 147f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis.

ARANTES, L. J. **Avaliação de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas**. 2001. 74f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

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

ARANTES, L. J.; RASLAN, A. A. **Utilização de água deionizada e carboneto de silício (SiC) no processo híbrido de Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo**. V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação Belo Horizonte, 2009.

ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. Engenharia de Materiais. Rio de Janeiro: Editora Campus, v. II, 2007.

ASM METALS HANDBOOK - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. v. 2, 1992.

BABU, K.; CHETTY, K. A Study on Recycling of Abrasives in Abrasive Water Jet Machining. **Wear**, v. 254, p. 763–773, feb. 2003.

BENEDICT, G. F. **Nontraditional manufacturing processes**. New York: Marcel Dekker, 1987. p.207-229.

CIDREIRO, P. H.; TELES, V. C.; SANTOS, R. F.; SILVA, E. R.; RASLAN, A. A. Avaliação de Materiais usados como Eletrodo Ferramenta na Usinagem do Aço AISI M2 pelo Processo

Híbrido AJEDM. In: **14º COLÓQUIO DE USINAGEM**, dez. 2010, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

ERDEN, A.; KAFTANOGLU, B. Thermo-Mathematical Modelling and Optimization of Energy Pulse Forms in Electric Discharge Machining (EDM). **Int. J. Math. Tool Des. Res.** v. 21, n.1, p. 11- 22, 1981.

FERNANDES, A. L. **Efeito de Adição de Pó de Carboneto de Silício nos Fluidos Dielétricos sobre o Desempenho da Usinagem por Descargas Elétricas do Aço Rápido ABNT M2**. 1999. 72f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FINNIE I. Erosion of Surfaces by Solid Particles. Emeryville, **Wear**, v. 3, p. 87-103, 1960.

FINNIE, I.; STEVICK, G. R.; RIDGELY, J. R. The influence of impingement angle on the erosion of ductile metals by angular abrasive particles. **Wear**. Berkeley. v. 152 p. 91-98, 1992.

FINNIE, I. Some Reflections on the Past and Future of Erosion. **Wear**. Berkeley, Elsevier. v. I, n. 10, p.186-187, 1995.

FORD, J. F. S. Ciência dos materiais. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 2008.

FULLER, J. E. **Electrical Discharge Machining, Metals Handbook**. 9.ed. 1989. v.16, p.557-564.

HUTCHINGS, I. M., **Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials**, 1ª ed. Arnold, London, 1992. 273 p.

JAHAN, M. P.; WONG, Y. S.; RANMAN, M. A Comparative Experimental Investigation of Deep-Hole Micro-EDM Drilling Capability for Cemented Carbide (WC-Co) Against Austenitic Stainless Steel (SUS 304). **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** v. 46, p. 1145–1160, 2010.

JUNKAR, M.; CORAY, P. S.; HEINIGER, K. C.; JURISEVC, B. Tool Formation Process in Abrasive Water Jet Machining. **Proceedings of the 6th International Conference on Management of Innovative Technologies**. Slovenia. p. 73-85, Oct. 2003.

KANSAL, H. K.; SINGH, S.; KUMAR, P. Technology and research developments in powder mixed electric discharge machining (PMEDM). **Journal of Materials Processing Technology**. India, v. 184, p. 34-41, oct. 2006.

KAR, R. J.; HORN, R. M.; ZACKAY, V. F. The Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties in 52100 Steel. American Society for Metals and the Metallurgical Society of AIME. v. 10A, Nov. 1979.

KHANRA, A. K.; PATHAK, L.C., GODKHINDI, M. M. Microanalysis of Debris Formed During Electrical Discharge Machining (EDM). **J. Mater. Sci.**, v. 42, p. 872–877, 2007.

KLOCKE, F.; LUNG, D.; ANTONOGLIOU, G.; THOMAIDIS, D. The Effects of Powder Suspended Dielectrics on the Thermal Influenced Zone by Electrodischarge Machining with Small Discharge Energies. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 149, p. 191–197, 2004.

KLOCKE, F.; KÖNIG, W. Fertigungsverfahren 3. 2007. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/9783540234920#section=326632&page=2&locus=3>>. Acesso em: 27 jun. 2012.

KOZAK, J.; RAJURKAR, K. P. **Hybrid Machining Process Evaluation and Development**. Disponível em: <http://www.mrl.columbia.edu/ntm/CrossProcess/hybrid_machining.htm>. Acesso em: 20 set. 2008.

KUMAR, A.; MAHESHWARI, S.; SHARMA, C.; BERI, N. Research Developments in Additives Mixed Electrical Discharge Machining (AEDM): A State of Art Review. **Materials and Manufacturing Processes**. London, v. 25, p. 1166-1180, dec. 2010.

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.

LIMA, R. M.; RASLAN, A. A. Utilização de Fluídos Dielétricos à Base de Óleos Vegetais na Usinagem por Descargas Elétricas por Penetração. **5º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Belo Horizonte, abr. 2009.

LONARDO, P. M.; BRUZZONE, A. A. Effect of Flushing and Electrode Material on Die Sinking EDM. **Annals of the CIRP**. Genova, v. 48, jan.1999.

MATWEB. Disponível em: <<http://www.matweb.com>>. Acesso em: 20 outubro. 2012.

MCGEOUGH, J. A. **Advanced methods of machining**. London: Chapman and Hall, p. 128-152, 1988.

MOHAMED, H. Experimental Studies of Cutting with Abrasives Waterjets. **Proceedings of the Second U.S. WATER JET CONFERENCE**. Missouri. p. 402-416, May, 1983.

MOMBER, A. W.; KOVACEVIC, R. **Principles of Abrasive Water Jet Machining**. London: Springer, 394 p. 1998.

NORASETTHEKUL, S.; EUBANK, P. T.; BRADLEY, W. L.; BOZKURT, B.; STUCKER, B. Use of Zirconium Diboride-Copper as an Electrode in Plasma Applications. **Journal of Materials Science**, v. 34, p. 1261–1270, 1999.

PANDEY, A.; SINGH, S. Current Research Trends in Variants of Electrical Discharge Machining: A Review. **International Journal of Engineering Science and Technology**. v. 2, p. 2171-2191, 2010.

RASLAN, A. A.; ARANTES, L. J.; FAPEMIG, Fundação de Amparado a Pesquisa de Minas Gerais (Belo Horizonte, MG); UFU, Universidade Federal de Uberlândia (Uberlândia, MG). **Método de Usinagem Híbrida Combinando Descargas Elétricas e Erosão Abrasiva**. BR n. PI0703468-7, 06 set. 2007, 24 mar. 2009.

SAHA, S. K. 125 p. **Experimental Investigation of the Dry Electric Discharge Machining (Dry EDM) Process**. Thesis Master of Technology. 2008. 125 p. Department of Mechanical Engineering. Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur.

SANTOS, R. F.; SILVA, E. R.; TELES, V. C.; RASLAN, A. A. Avaliação do Efeito da Variação da Pressão do Jato de Água no processo Híbrido de Usinagem AJEDM. **6º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Caxias do Sul, abr. 2011.

SHEWMON, P.; SUNDARARAJAN, G. The Erosion of Metals. **Annual Reviews Inc.** Columbus. v. 13, p. 301-318, 1983.

SIDHOM, H.; GHANEM, F.; AMADOU, T.; GONZALEZ, G.; BHAHAM, C. Effect of Electro Discharge Machining (EDM) on the AISI316L SS White Layer Microstructure and Corrosion Resistance. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 13 p. apr. 2012.

SILVA, E. R.; SANTOS, R. F.; CIDREIRO, P. H.; SOUSA, L. B. F.; RASLAN, A. A. Otimização de Equipamento para uso em Processo AJEDM. **6º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Caxias do Sul, abr. 2011.

SILVA, E. R.; SANTOS, R. F.; TELES, V. C.; RASLAN, A. A. Influência da Granulometria do Abrasivo SiC no Processo Híbrido AJEDM. **6º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Caxias do Sul, abr. 2011.

SILVA, E. R.; SANTOS, R. F.; PEREIRA, G. C. S.; RASLAN, A. A. Use of Hybrid Process AJEDM in Steel AISI M2. **COBEM – Brazilian Congress of Mechanical Engineering**. Natal, oct. 2011.

SINGH, S.; BHARDWAJ, A. Review to EDM by Using Water and Powder-Mixed Dielectric Fluid. **Jornal of Minerals & Materials Characterization & Engineering**. India, v. 10, n. 2, p. 199-239, 2011.

SOMMER, C.; SOMMER, S.; SOMMER P. **Complete EDM Handbook**. Disponível em: <<http://www.ReliableEDM.com>>. Acesso em: 01 maio. 2007.

STEVENS, L. **Improvement of Surface Quality in Die-sinking EDM**. Doctoral Thesis. 1998. 181 p. Department of Mechanical Engineering. Katholieke Universiteit Leuven. Leuven.

SUMMERS, D. A. **Waterjetting Technology**. London: Chapman & Hall, 1995. 882 p.

TELES, V. C. **Construção e Avaliação de um Erosímetro com Jato de Água Abrasivo**. TCC. 2012. 31f. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

UNO, Y.; OKADA, A.; CETIN, S. Surface Modification of EDMed Surface with Powder Mixed Fluid. **2º International Conference on Desing and Production of Dies and Molds**. Japan, 2001.

ZHAO, W. S.; MENG, Q. G.; WANG, Z. L. The application of Research on Powder Mixed EDM in Rough Machining. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 129, p. 30-33, 2002.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials**, Amsterdam, Elsevier, 1987. 560p.

WANG, J. J.; LIU, K. C. An Innovative Technique for Evaluating Fracture Toughness of Graphite Materials. 2008.

WOMA Apparatebau GmbH. Disponível em: <<http://www.woma.de>>. Acesso em: 27 julho. 2010.

WONG, Y. S.; LIM, L.C.; LEE, L. C. Effects of Flushing on Electro-Discharge Machining Surface. **Journal of Material Processing Technology**. Singapore. Elsevier. v. 48, p. 299-305, 1995.

7. Anexo

1. Custo de máquinas, equipamentos e acessórios da aplicação do bico *venturi*

A Tabela 1.1 relaciona o preço das máquinas, equipamentos e acessórios necessários para a implementação do sistema de bico *venturi*.

Tabela 1.1 – Custo das máquinas, equipamentos e acessórios para implementação do bico *venturi* no processo de usinagem híbrido AJEDM.

| Máquina / equipamento / acessório | Unidade monetária |
|---|-------------------|
| EDM modelo 440NC | 1600 |
| Hidrojateadora modelo HD 10/25 acompanhada de pistola de alimentação, bico <i>venturi</i> , dosador de abrasivo e bicos variadores de pressão | 174 |
| Aparelho deionizador | 10 |
| Bomba centrífuga | 9 |
| Manômetro | 1 |
| Reservatório para armazenamento de água (tambores de plástico) | 1 |
| Bomba submersa | 3 |
| Filtros de carvão ativado (preço 2 unidades monetárias cada) | 4 |
| Mangueiras e conexões | 6 |

A Tabela 1.2 relaciona o custo das adaptações realizadas na máquina de EDM. Deve-se observar ainda, o custo da troca da resina do deionizador para produção de água deionizada, cada troca para produzir 2000 litros de água custa 3 unidades monetárias.

Tabela 1.2 – Custo das adaptações implementadas na máquina de EDM e características construtivas das peças.

| Adaptação | Dimensões (mm) | Material | Unidade monetária* |
|---------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| Cuba auxiliar e tampas | 350x400x750 (internas) | Aço AISI 304 – chapa18 | 14 |
| Porta amostras | Ø 76,2x200 | Aço AISI 304 | 3 |
| Suporte de fixação | 19x76,2x152,4 | Cobre eletrolítico | 1 |
| Porta bico <i>venturi</i> | Ø 76,2x200 | Cobre eletrolítico | 3 |

* Neste preço estão incluídos os custos do material e da mão de obra.