

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Aderci de Freitas Filho

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO HÍBRIDO AJEDM COM PRESSÃO DE 30MPa**

Belo Horizonte

2016

**Aderci de Freitas Filho**

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO HÍBRIDO AJEDM COM PRESSÃO DE 30MPa**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

Belo Horizonte

2016

F866a Freitas Filho, Aderci de.  
Avaliação do processo híbrido AJEDM com pressão de 30MPa /  
Aderci de Freitas Filho. - 2016.  
100 f. : il.; tabs. ; grafs ; fotos. –  
Orientador: Ernane Rodrigues da Silva.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação  
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2016.

Bibliografia.  
1. Usinagem por eletroerosão. 2. Plasma de alta temperatura.  
3. Corte com jato de água. 4. Óxido de alumínio. I. Silva, Ernane  
Rodrigues da. II. Título.

CDD: 671.35

## **AVALIAÇÃO DO PROCESSO HÍBRIDO AJEDM COM PRESSÃO DE 30MPa**

Dissertação apresentada em 03 de outubro de 2016 por Aderci de Freitas Filho, ao Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, aprovada pela banca examinadora constituída pelos professores:

---

Prof. Ernane Rodrigues da Silva - orientador

Doutor, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

---

Prof. Ezequiel de Souza Costa Júnior

Doutor, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

---

Prof. Ivan José de Santana

Doutor, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Belo Horizonte, 03 de outubro de 2016

*“Tudo deve ser feito o mais simples possível,  
mas não mais simples do que isso.”  
Albert Einstein*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus que sempre esteve ao meu lado dando força nos momentos difíceis, me guiando pelo caminho certo e me orientando nas dúvidas diárias.

A minha esposa Sandra e meu filho Marcus pelo apoio incondicional nesta jornada que é mais uma etapa de muitas que virão.

Aos meus pais que me deram condições para almejar saltos maiores sempre com honestidade e respeito.

Ao meu orientador prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva que se propôs a ajudar nesta caminhada, acreditando no meu potencial.

A todos os professores da pós-graduação, por compartilharem seus conhecimentos e experiências.

A prof. Dra. Ivete Peixoto Pinheiro pelos ensinamentos na disciplina de metodologia de pesquisa.

A prof. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa pela colaboração nos laboratórios e ensinamentos nas disciplinas do mestrado.

Ao DEMAT pela oportunidade e estrutura oferecida para a realização de todos os ensaios.

Ao técnico do laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET-MG, Bruno Cordeiro Silva, pelas imagens de MEV.

Ao técnico Marceliny Nardi Torrecília do laboratório de Engenharia Mecânica e Mecatrônica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC/Minas.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho de pesquisa de forma gratuita e generosa.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade técnica do processo híbrido de usinagem por jato de água abrasivo e descargas elétricas (AJEDM - *Abrasive Jet Electrical Discharge Machining*), associando a usinagem por descargas elétricas (EDM- *Electrical Discharge Machining*) com a usinagem por jato de água abrasivo (AWJM- *Abrasive Water Jet Machining*). O trabalho avaliou a influência de alguns parâmetros no processo AJEDM: pressão do jato abrasivo, material do eletrodo ferramenta e fluido dielétrico, com a particularidade da utilização de água deionizada como substituição aos fluidos hidrocarbonetados comuns em EDM. Para a realização do processo híbrido, uma hidrojateadora foi adaptada ao equipamento EDM permitindo a aplicação de pressões de até 30MPa no jato abrasivo. O abrasivo (óxido de alumínio –  $Al_2O_3$  com granulometria de 600mesh) foi misturado ao jato de água por meio de bico *venturi* adaptado ao cabeçote do equipamento EDM. Os resultados apresentaram taxas de remoção de material superiores a 100% com o cobre eletrolítico e 150% com a grafita no processo AJEDM em comparação ao processo EDM tradicional, com desgaste mais acentuado no eletrodo ferramenta de grafita. A camada refundida apresentou redução significativa de espessura na entrada do jato abrasivo em relação à saída, indicando a influência do jato abrasivo na usinagem com pressão de 30MPa. O abrasivo ( $Al_2O_3$ ) manteve a integridade da forma e granulometria, não apresentando diferenças antes e após o uso com pressão de 30MPa.

Palavras-chave: Usinagem por Descargas Elétricas, AJEDM, Usinagem Híbrida, Óxido de Alumínio, Taxa de Remoção de Material.

## Abstract

The objective of this study was to evaluate the technical viability of the hybrid process abrasive jet electrical discharges machining (AJEDM), involving electrical discharge machining (EDM) with the abrasive water jet machining (AWJM). The study evaluated the influence of some parameters on AJEDM process: pressure abrasive jet, electrode tool material and dielectric fluid, with the particularity of using deionized water as a substitute for common hydrocarbon fluids in EDM. For the realization of the hybrid process, a high pressure pump was adapted to EDM equipment allowing the use of up to 30MPa pressure on the abrasive jet. The abrasive (aluminum oxide -  $Al_2O_3$  with a particle size of 600mesh) was mixed with the water jet through the venturi system placed in the EDM machine head. The results showed higher removal rate of 100% material with the copper electrode and 150% with graphite in AJEDM process compared to traditional EDM process with more pronounced wear on the electrode graphite tool. The remelted layer showed a significant reduction of thickness at the entrance of the abrasive jet in relation to output, indicating the influence of the abrasive jet in the machining the 30MPa pressure. The abrasive ( $Al_2O_3$ ) maintained the integrity of form and grain size, no differences before and after use with 30MPa pressure.

Keywords: Electrical Discharge Machining, AJEDM, Hybrid Machining, Aluminum Oxide, Material Removal Rate.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Peça de geometria complexa, eletrodo em cobre eletrolítico.....	22
Figura 2 - Cavidades de dimensões reduzidas usinadas por EDM.....	22
Figura 3 - Molde de escova em aço ferramenta e eletrodo ferramenta de cobre.....	22
Figura 4 - Fase de ignição com elétrons iniciando o deslocamento do catodo para o anodo (a) e evolução da corrente e tensão (b).....	24
Figura 5 - Formação de elétrons secundários (a) e evolução da corrente e tensão (b). .....	25
Figura 6 - Formação do canal de plasma (a) e evolução da corrente e tensão (b). ..	25
Figura 7 - Ruptura do canal de plasma (a) e evolução da corrente e tensão (b).....	26
Figura 8 - Representação das opções de limpeza da cavidade na usinagem EDM..	28
Figura 9 - Evolução da tensão e corrente elétrica durante a descarga, tempos de duração dos mesmos e parâmetros elétricos.....	31
Figura 10 - Erosão pelo impacto de partícula sólida. ....	36
Figura 11 - Princípio da usinagem por AJM .....	37
Figura 12 - Principais componentes do sistema AJM.....	38
Figura 13 - Esquema de funcionamento WJM. ....	39
Figura 14 - Mistura das partículas abrasivas com o jato de água na câmara de mistura do bico <i>venturi</i> usado no AWJM. ....	40
Figura 15 - Efeito do ângulo de impacto na taxa de remoção de material. ....	42
Figura 16 - Processo de erosão pelo impacto de partículas sólidas contra a superfície do material dúctil e frágil. Dúctil (a), formação de fendas frágil (b) e remoção de material frágil (c).....	43
Figura 17 - Princípio da usinagem híbrida EDM associado à AJWM (AJEDM).....	45
Figura 18 - Fluxo Abrasivo e região de desgaste do eletrodo ferramenta de cobre. .	46
Figura 19 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento experimental da pesquisa	47
Figura 20 - Geometria dos eletrodos ferramenta de grafita e cobre eletrolítico. ....	49
Figura 21 - Detalhe do canal no eletrodo de grafita e ponta do parafuso de fixação.	49
Figura 22 - Geometria dos corpos de prova em aço AISI M2 posicionamento e fixação no porta amostra.....	51
Figura 23 - Bico alimentador de abrasivo e recipiente. ....	52
Figura 24 - Desenho esquemático do bico <i>venturi</i> . ....	52

Figura 25 - Desenho esquemático do bico alimentador de abrasivo.....	53
Figura 26 - Aparelho deionizador de água (a) e condutivímetro (b). .....	53
Figura 27– Equipamento EDM com seus componentes principais. ....	54
Figura 28 - Cuba auxiliar instalada no tanque principal do equipamento EDM. ....	55
Figura 29 - Adaptação da mangueira não condutiva com malha de poliéster.....	56
Figura 30 - Desenho esquemático do porta amostra, suporte para posicionamento do bico <i>venturi</i> , eletrodo ferramenta e bomba centrifuga. ....	57
Figura 31 - Desenho esquemático do conjunto formado pelas máquinas, equipamentos e os acessórios no processo AJEDM. ....	58
Figura 32 - Manômetro e válvula reguladora de pressão da hidrojateadora. ....	59
Figura 33 - Desenho esquemático do suporte para fixação do eletrodo ferramenta no processo EDM.....	60
Figura 34 - Balança eletrônica <i>Bel Engineering</i> e balança <i>Balmak</i> . ....	62
Figura 35 - Microscópio óptico marca <i>Kontrol</i> e perfil com pontos de medição da camada refundida.....	64
Figura 36 - Microscopia óptica destaca rebarba solta durante o embutimento em (a) e detalhe transversal do eletrodo peça antes e após embutimento em (b). ....	65
Figura 37 - Embutidora automática <i>Struers</i> e amostra embutida. ....	65
Figura 38 - Microscópio eletrônico de varredura <i>Shimadzu</i> modelo SSX 550 e imagem identificando as superfícies de entrada, plano usinado e saída do jato abrasivo no corpo de prova. ....	67
Figura 39 - Microdurômetro <i>Shimadzu</i> e regiões analisadas. ....	68
Figura 40 - Evolução da taxa de remoção de material no processo AJEDM com eletrodo ferramenta cobre eletrolítico no aço AISI M2. ....	69
Figura 41 - Evolução da taxa de desgaste no processo AJEDM com eletrodo ferramenta cobre eletrolítico.....	70
Figura 42 - Evolução do desvio volumétrico relativo no processo AJEDM com eletrodo ferramenta cobre eletrolítico.....	71
Figura 43 - Evolução da taxa de remoção de material no processo AJEDM (30MPa) comparado ao processo EDM (1MPa) variando o material do eletrodo ferramenta (cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita). ....	72
Figura 44 - Evolução da taxa de desgaste no processo AJEDM com pressão de 30MPa comparado ao processo EDM (1MPa). ....	73

Figura 45 - Variação do desvio volumétrico relativo no processo AJEDM (30MPa) comparado ao processo EDM (1MPa). .....	74
Figura 46 - Imagem da amostra preparada para microscopia óptica. ....	75
Figura 47 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo AJEDM na pressão de 24MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e granulometria de 600mesh. ....	76
Figura 48 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo AJEDM na pressão de 26MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e granulometria de 600mesh. ....	76
Figura 49 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo AJEDM na pressão de 28MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e granulometria de 600mesh. ....	77
Figura 50 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo AJEDM na pressão de 30MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e granulometria de 600mesh. ....	77
Figura 51 - Espessura da camada refundida no processo AJEDM nas pressões de 24 a 30MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e granulometria de 600mesh. ....	79
Figura 52 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo AJEDM na pressão de 30MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e eletrodo de cobre cromo. ....	80
Figura 53 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo AJEDM na pressão de 30MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e eletrodo de grafita. ....	80
Figura 54 - Ângulo das paredes de entrada e saída das cavidades usinadas pelo processo AJEDM (30MPa) com eletrodo ferramenta de cobre cromo e grafita. ....	81
Figura 55 - Espessura da camada refundida no processo AJEDM variando o material do eletrodo ferramenta na pressão de 30MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e granulometria de 600mesh. ....	82
Figura 56 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo EDM eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico com água deionizada em baixa pressão (1MPa). ....	83
Figura 57 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo EDM eletrodo ferramenta de cobre cromo com água deionizada em baixa pressão (1MPa). ....	83
Figura 58 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo EDM eletrodo ferramenta de grafita com água deionizada em baixa pressão (1MPa). ....	84
Figura 59 - Espessura da camada refundida no processo EDM variando o material do eletrodo ferramenta em baixa pressão. ....	85
Figura 60 - Comparação da espessura da camada refundida nos processos AJEDM e EDM em função do material do eletrodo ferramenta. ....	86
Figura 61 - Variação da dureza no processo AJEDM em função da pressão. ....	87

Figura 62 - Variação da dureza Vickers nos processos AJEDM e EDM variando-se o material do eletrodo ferramenta. ....	87
Figura 63 - Variação da dureza Vickers nos processos AJEDM e EDM isoladamente, variando-se o material do eletrodo ferramenta.....	88
Figura 64 - Variação da microdureza Vickers entre as camadas nos processos AJEDM e EDM com pressão de 26 e 1MPa, respectivamente. ....	89
Figura 65 - Superfícies usinadas pelo processo AJEDM com eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita, abrasivo óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) na pressão de trabalho de 30MPa. ....	90
Figura 66 - Superfícies usinadas pelo processo AJEDM com eletrodo de cobre eletrolítico, abrasivo óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) nas pressões de 24 a 30MPa. ....	91
Figura 67 - Superfícies usinadas pelo processo EDM com eletrodo ferramenta de Cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita, fluido dielétrico água deionizada. ....	93
Figura 68 - Imagens de MEV do abrasivo óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) com granulometria de 600mesh: na coluna (a) abrasivo novo e na coluna (b) abrasivo usado na pressão de 30MPa.....	94
Figura 69 – Gráfico de distribuição granulométrica do abrasivo óxido de alumínio após o uso a 30MPa. ....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de propriedades físicas e químicas do cobre.....	33
Tabela 2 - Composição química do cobre eletrolítico e cobre cromo em percentual.....	48
Tabela 3 - Quantidade de eletrodos ferramentas por teste.....	50
Tabela 4 - Composição química do aço AISI M2 em percentual de massa.....	50
Tabela 5 - Informações técnicas do aparelho deionizador.....	54
Tabela 6 - Parâmetros de ajuste do equipamento EDM.....	61
Tabela 7 - Parâmetros de ajuste do equipamento MEV.....	66
Tabela 8 – Granulometria a laser do abrasivo óxido de alumínio novo e usado na pressão de 30MPa.....	95

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $i_e$ : corrente da descarga média [A]  
 $i_m$ : corrente da descarga máxima [A]  
 $m_f$ : massa final da peça e/ou ferramenta [g]  
 $m_i$ : massa inicial da peça e/ou ferramenta [g]  
SiC: carboneto, carbeto de silício  
T: tempo de usinagem [min]  
 $t_d$ : tempo de atraso da ignição [ $\mu$ s]  
 $t_e$ : duração da descarga [ $\mu$ s]  
 $T_f$ : ponto de fusão [ $^{\circ}$ C]  
 $t_{off}$ : tempo de intervalo do pulso [ $\mu$ s]  
 $t_{on}$ : tempo de duração do pulso [ $\mu$ s]  
 $t_p$ : tempo do ciclo [ $\mu$ s]  
U: tensão do circuito aberto [V]  
 $u_e$ : tensão de trabalho média [V]  
 $u_i$ : tensão da descarga [V]  
 $\alpha$ : ângulo de ataque da partícula abrasiva [ $^{\circ}$ ].  
 $\sigma$ : condutividade elétrica [S/m].  
 $\rho$ : peso específico do material do eletrodo-ferramenta [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ].  
 $\Delta_m$ : variação de massa da peça e/ou ferramenta [Kg].

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- AECDM: *Abrasive Electrical Chemical Discharge Machining* (Usinagem Eletroquímica por Descargas Elétricas com Abrasivos).
- AECM: *Abrasive Electrical Chemical Machining* (Usinagem Abrasivo eletroquímica).
- AEDM: *Abrasive Electrical Discharge Machining* (Usinagem Abrasiva por Descargas Elétricas).
- AHM: *Abrasive Hybrid Machining* (Usinagem Híbrida Abrasiva).
- AISI: *American Iron and Steel Institute*.
- AJEDM: *Abrasive Jet Electrical Discharge Machining* (Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo).
- AJM: *Abrasive Jet Machining* (Usinagem por Jato Abrasivo).
- AWJM: *Abrasive Water Jet Machining* (Usinagem por Jato de Água Abrasivo).
- CNC: *Computer Numeric Comand* (Comando Numérico Computadorizado).
- DEMAT: Departamento de Engenharia de Materiais.
- DT: *Duty time* (tempo de trabalho - relaciona o tempo de duração do pulso com o tempo do ciclo entre duas descargas consecutivas) [%].
- DVR: Desgaste Volumétrico Relativo [%].
- ECM: *Electrical Chemical Machining* (Usinagem Eletroquímica).
- ECDM: *Electrical Chemical Discharge Machining* (Usinagem Eletroquímica com Descargas Elétricas).
- EDM: *Electrical Discharge Machining* (Usinagem por Descargas Elétricas).
- GAP: Distância entre a ferramenta e a peça.
- MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura.
- REDM: *Rotary electrical discharge machining* (Usinagem Rotacional por Descargas Elétricas).
- TD: Taxa de Desgaste [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ].
- TRM: Taxas de Remoção de Material [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ].
- USM: *Ultrasonic Machining* (Usinagem Ultra Sônica).
- ZAC: Zona afetada pelo calor.
- WJM: *Water Jet Machining* (Usinagem com Jato de Água).

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	18
1.1. Justificativa .....	19
1.2. Objetivo geral.....	20
1.3. Objetivos específicos .....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.1. Usinagem por Descargas Elétricas.....	21
2.1.1. Princípios do processo EDM.....	23
2.1.2. Fluido dielétrico .....	27
2.1.3. Parâmetros do processo EDM .....	30
2.1.4. Materiais para eletrodos ferramenta.....	32
2.1.5. Materiais para eletrodos peça .....	34
2.2. Usinagem com abrasivos.....	36
2.2.1. Processo de Usinagem por Jato Abrasivo (AJM).....	37
2.2.2. Processo de Usinagem por Jato de Água (WJM).....	38
2.2.3. Processo de Usinagem por Jato de Água abrasivo (AWJM).....	39
2.3. Processo Híbrido de Usinagem .....	43
2.3.1. Processo de Usinagem Híbrido (AJEDM) .....	44
3. Metodologia.....	47
3.1. Material.....	48
3.1.1. Material e geometria do eletrodo ferramenta .....	48
3.1.2. Material e geometria do Corpo de prova (Cp).....	50
3.1.3. Material abrasivo e sistema de alimentação .....	51
3.1.4. Fluido dielétrico .....	53
3.2. Equipamento EDM.....	54
3.2.1. Adaptações do equipamento EDM.....	55
3.4. Parâmetros do processo híbrido AJEDM.....	60

3.5. Parâmetros avaliados .....	61
3.5.1. Taxa de remoção de material.....	62
3.5.2. Espessura da camada refundida.....	63
3.5.3. Integridade Superficial.....	66
3.5.4. Perfil de microdureza .....	67
3.5.5. Integridade do abrasivo.....	68
4. Resultados e discussão.....	69
4.1. Influência da variação de pressão do fluido dielétrico no processo AJEDM ...	69
4.2. Análise dos processos EDM e AJEDM com diferentes materiais .....	72
4.3. Avaliação da qualidade da superfície usinada.....	75
4.3.1. Análise da camada refundida.....	75
4.3.2. Avaliação da dureza das camadas.....	86
4.3.3. Morfologia da camada refundida.....	90
4.4. Avaliação da integridade do abrasivo .....	94
5. Conclusões.....	96
5.1. Sugestões para trabalho futuros.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	98

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria de transformação metal mecânica enfrenta grandes desafios, materiais avançados têm assumido papel importante na indústria moderna, especialmente na indústria aeroespacial e automobilística na fabricação de matrizes de corte e moldes para injeção de plásticos.

A utilização de processos híbridos não convencionais abre novas frentes de pesquisa no campo da usinagem e tem sido tendência mundial observada há mais de uma década.

A proposta desse trabalho é a modificação do processo de usinagem não convencional por descargas elétricas (EDM - *Electrical Discharge Machining*), introduzindo água deionizada abrasiva como fluido dielétrico e alterando sua pressão de trabalho, tornando o processo não convencional híbrido. Esse processo híbrido de usinagem, denominado usinagem por descargas elétricas e jato de água abrasivo (AJEDM - *Abrasive Jet Electrical Discharge Machining*), consiste na aplicação simultânea dos processos EDM e usinagem por jato de água abrasivo (AWJM - *Abrasive Water Jet Machining*) (RASLAN e ARANTES, 2009).

O processo AJEDM 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 (24 a 30MPa) às pressões nominais da máquina de EDM (1MPa). As partículas de pó formam a ponte para a corrente elétrica ao reduzirem a rigidez dielétrica do fluido entre a ferramenta e a peça, aumentando a distância entre as mesmas, e conseqüentemente, aumento na taxa de remoção de material. O jato do fluido dielétrico sob pressão promove a limpeza da cavidade, incrementando nas taxas de remoção de material e reduzindo a espessura da camada refundida em comparação ao processo EDM tradicional. (RASLAN e ARANTES, 2009).

## 1.1. Justificativa

O desenvolvimento de materiais para aplicações mais severas é crescente, exigindo desses materiais propriedades superiores as usuais: resistência mecânica, resistência térmica, estabilidade química, resistência ao desgaste, resistência a corrosão. Com esta tecnologia aplicada aos materiais, a usinagem convencional se tornou difícil e surgiu a necessidade do desenvolvimento de novos processos de usinagem que acompanhassem com eficiência esta demanda na fabricação de peças e componentes para a indústria metal mecânica.

O processo não convencional de usinagem por descargas elétricas EDM é um dos processos que não têm restrições quanto à usinabilidade de materiais com as novas propriedades exigidas, porém, mesmo com o aperfeiçoamento do processo EDM por meio da melhoria de suas máquinas, acessórios e sistemas de controle, a usinagem por descargas elétricas é lento e a taxa de remoção de material é inferior aos processos convencionais como torneamento e fresamento.

Segundo Erden e Kaftanoglu (1981) estima-se que apenas 10 a 15% do material fundido por descargas elétricas durante o processo EDM é removido da superfície, enquanto o restante ressolidifica-se, sendo esse fato responsável pelo baixo rendimento do processo. O processo EDM produz ainda alguns inconvenientes na superfície usinada como: formação de camada refundida, trincas e poros. Para melhorar o acabamento superficial e retirar imperfeições são necessárias intervenções posteriores. alternativa para melhorar o desempenho do processo EDM e amenizar os defeitos superficiais é a combinação do mesmo com outros processos de fabricação.

Novas tecnologias vêm sendo empregadas em diversos campos da fabricação. Uma dessas, afeta diretamente o desempenho do processo EDM, e que sem dúvida, tem ganhado impulso nos últimos anos é a adição de pós-metálicos ao fluido dielétrico. Várias são as vantagens desta nova tecnologia como: melhoria da taxa de remoção de materiais, acabamento superficial e estabilidade na geração dos pulsos de descargas elétricas.

A alternativa viável ao processo de usinagem convencional dos novos materiais é a utilização do processo não convencional EDM de forma mais eficiente que o tradicional, aliando as novas tecnologias disponíveis como a adição de pressão no fluido dielétrico e partículas abrasivas, convertendo o processo EDM no processo híbrido AJEDM.

## 1.2. Objetivo geral

Avaliar os materiais cobre e grafita como eletrodo ferramenta no processo híbrido AJEDM com pressões do jato de água abrasivo de 24 a 30MPa.

## 1.3. Objetivos específicos

- Adaptar o equipamento EDM com a introdução de hidrojateadora e sistema de alimentação de abrasivo por meio de bico *venturi*;
- aplicar jato de água abrasivo com pressões variáveis de 24 a 30MPa;
- avaliar o desempenho dos materiais cobre e grafita como eletrodo ferramenta;
- quantificar o desgaste dos eletrodos ferramenta em função do material removido;
- utilizar água deionizada em substituição ao fluido dielétrico a base de hidrocarbonetos;
- analisar a integridade do abrasivo óxido de alumínio por meio de MEV e granulometria a laser após usinagem a 30MPa;
- avaliar a morfologia da superfície usinada por meio de microscopia óptica e MEV;
- Mensurar a espessura da camada refundida por meio de microscopia óptica.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Usinagem por Descargas Elétricas

A usinagem por descargas elétricas ou EDM (*Electrical Discharge Machining*) ou como é conhecida ainda na indústria, usinagem por eletroerosão, é o processo usado na obtenção de formas complexas em materiais condutores elétricos, especialmente aqueles de alta dureza e de dimensões reduzidas, difíceis de serem usinados por processos convencionais de usinagem.

A erosão de metais por descargas elétricas foi inicialmente observada por Sir Joseph Priestley em 1768. Em 1943, dois russos, B.R. Lazarenko e N. I. Lazarenko, ao investigarem o desgaste de contatos de interruptores, chegaram à conclusão que as descargas por centelhas poderiam ser utilizadas para usinar metais recém desenvolvidos, os quais ofereciam dificuldades para usinagem pelos métodos convencionais (MCGEOUGH, 1988).

De acordo com McGeough (1988) o processo EDM ocorre entre dois materiais condutores de eletricidade, o eletrodo ferramenta e o eletrodo peça, por meio do arco elétrico que surge pela aplicação de diferença de potencial entre os mesmos na presença de fluido dielétrico. Durante o processo a ferramenta não entra em contato com a peça, que trabalha afastada da peça mantendo-se à distância de trabalho denominada *gap*.

Os eletrodos ferramenta e peça não podem entrar em contato, pois provocaria curto circuito não permitindo o funcionamento do processo. Por esse motivo, os mesmos ficam afastados e a distância de trabalho precisa ser mantida durante todo o processo. Na distância de trabalho ocorrem as descargas elétricas que promovem a remoção de material por meio do calor produzido pelo choque de elétrons e íons. Os eletrodos sofrem o efeito da erosão provocada pelas descargas elétricas, o polo positivo devido ao choque de elétrons e o polo negativo devido ao choque de íons positivos. Porém no processo EDM por penetração é retirado menor quantidade de metal do polo positivo, geralmente o eletrodo ferramenta, no processo de EDM por

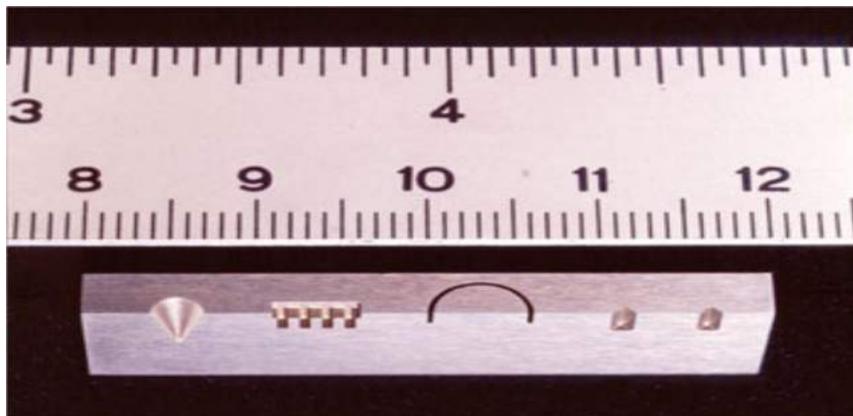
penetração (FULLER, 1989). As figuras 1 a 3 apresentam exemplos de peças usinadas por EDM.

Figura 1- Peça de geometria complexa, eletrodo em cobre eletrolítico.



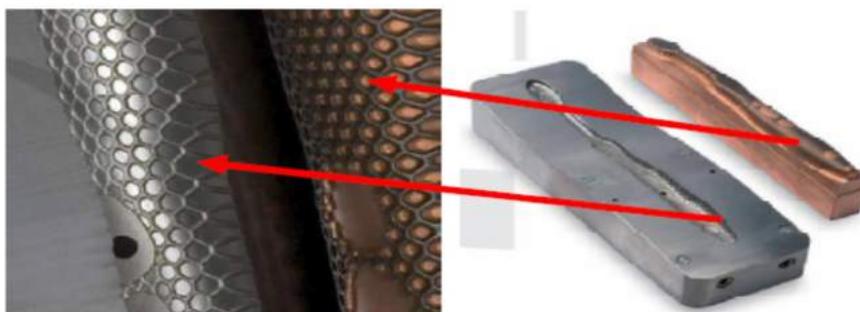
Fonte: Intech EDM (1996).

Figura 2 - Cavidades de dimensões reduzidas usinadas por EDM.



Fonte: Intech EDM (1996).

Figura 3 - Molde de escova em aço ferramenta e eletrodo ferramenta de cobre.



Fonte: Charmilles (2006).

### 2.1.1. Princípios do processo EDM

O processo EDM é bastante complexo e muito ainda se estuda sobre esse tema, pois, os parâmetros do processo ainda não estão totalmente esclarecidos. Uma das explicações aceitas pela maioria dos pesquisadores é a termoelétrica. Nesse processo, o mecanismo de remoção do material é feito pelo uso de energia elétrica modificada internamente para energia térmica. O calor gerado pela descarga elétrica na região próxima ao canal de plasma funde o material, que é removido e ejetado da poça fundida devido à evaporação (KLOCKE; KÖNIG, 2007).

Durante o processo, para que ocorra a fusão aplica-se a diferença de potencial (em corrente contínua) entre duas peças condutoras de eletricidade denominadas de eletrodo ferramenta e eletrodo peça, separadas por pequena distância (de 0,012mm a 0,050mm). O ciclo EDM inicia-se na pequena região de descarga elétrica próxima da superfície. A potência despendida por unidade de área pode chegar até 1000 W/m<sup>2</sup>, à temperatura acima de 5000°C, assim o fluido dielétrico evapora-se, tornando-se eletrolítico e no meio gasoso a pressão poderá alcançar até 20MPa (MCGEOUGH, 1988). Os espaços ocupados pelo gás são preenchidos pelo fluido dielétrico em temperatura menor que a região em usinagem, ocorrendo o choque térmico e a micro explosão, desagregando partículas fundidas da peça e dando início ao processo de usinagem (KAMINSKI; CAPUANO, 1999).

Quando ocorre a descarga elétrica o eletrodo e a peça não estão em contato devido ao meio dielétrico que os envolve. Para o perfeito funcionamento do processo, o eletrodo ferramenta deve se aproximar da peça de forma controlada, para isso, o servo mecanismo de avanço é necessário, ele assegura que a ferramenta se mova com taxa própria, mantendo a distância de trabalho apropriada para a abertura do arco elétrico.

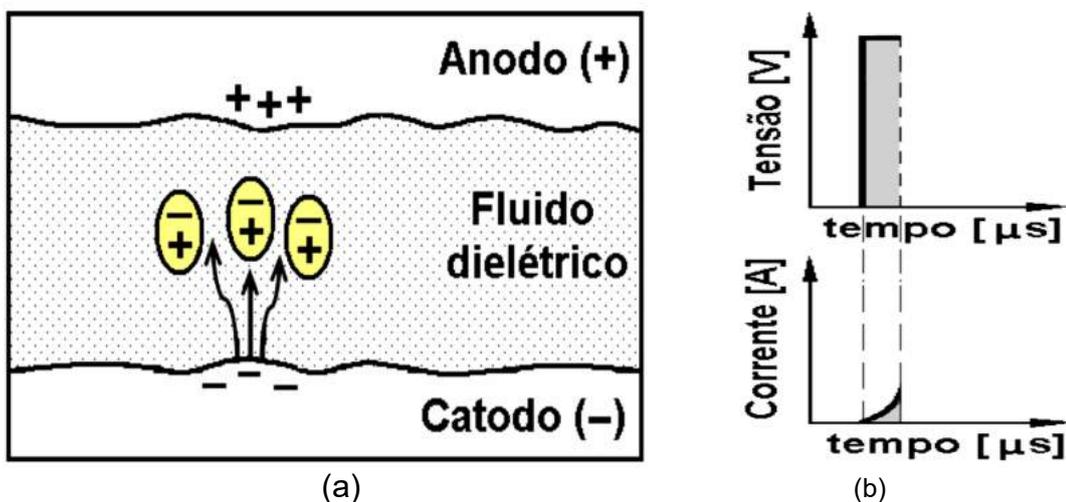
A partir da descarga elétrica entre eletrodo ferramenta e peça pode-se dividir o processo em quatro etapas sucessivas:

- fase de ignição;
- formação do canal de plasma;

- fusão e evaporação de pequena quantidade do material e
- ejeção do material.

Na fase de ignição uma diferença de potencial é aplicada entre os eletrodos ferramenta e peça. Um campo elétrico é criado nos locais onde o gradiente de tensão é máximo, normalmente nos pontos mais altos da superfície (picos provenientes da rugosidade e detritos na superfície) e assim, elétrons primários são emitidos pelo catodo em direção ao anodo. A figura 4 ilustra essa fase, bem como a variação de tensão e corrente durante a mesma.

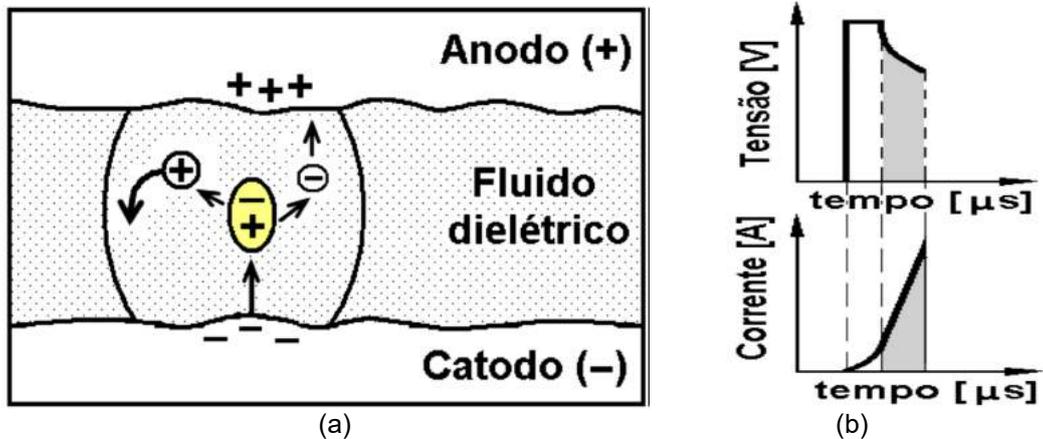
Figura 4 - Fase de ignição com elétrons iniciando o deslocamento do catodo para o anodo (a) e evolução da corrente e tensão (b).



Fonte: Stevens (1998 adaptada).

Esses elétrons primários são atraídos pelo anodo 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 5 ilustra esse movimento que inicia a formação do canal de plasma (STEVENS, 1998).

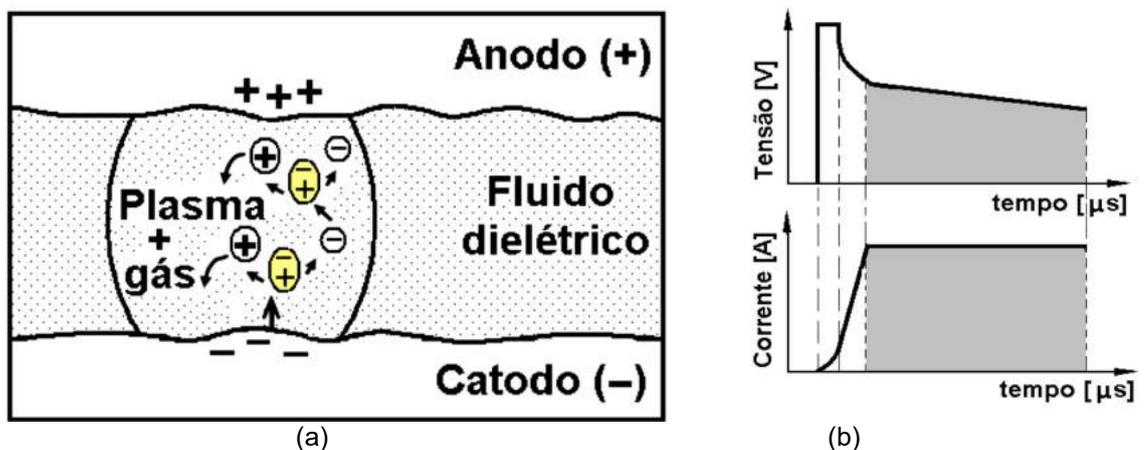
Figura 5 - Formação de elétrons secundários (a) e evolução da corrente e tensão (b).



Fonte: Stevens (1998 adaptada).

A formação do canal de plasma também é chamada de ruptura da resistência dielétrica, pois quando ele é criado, a tensão cai drasticamente. Na fase de formação do canal de plasma os íons positivos, provenientes do fluido dielétrico, são atraídos pelo catodo e ao colidirem contra o mesmo liberam mais elétrons. Os elétrons provenientes dessa emissão também avançam para o anodo e, no caminho colidem com 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 fluido dielétrico forma bolhas de vapor e o canal de plasma é criado (STEVENS, 1998). A figura 6 ilustra essa fase.

Figura 6 - Formação do canal de plasma (a) e evolução da corrente e tensão (b).

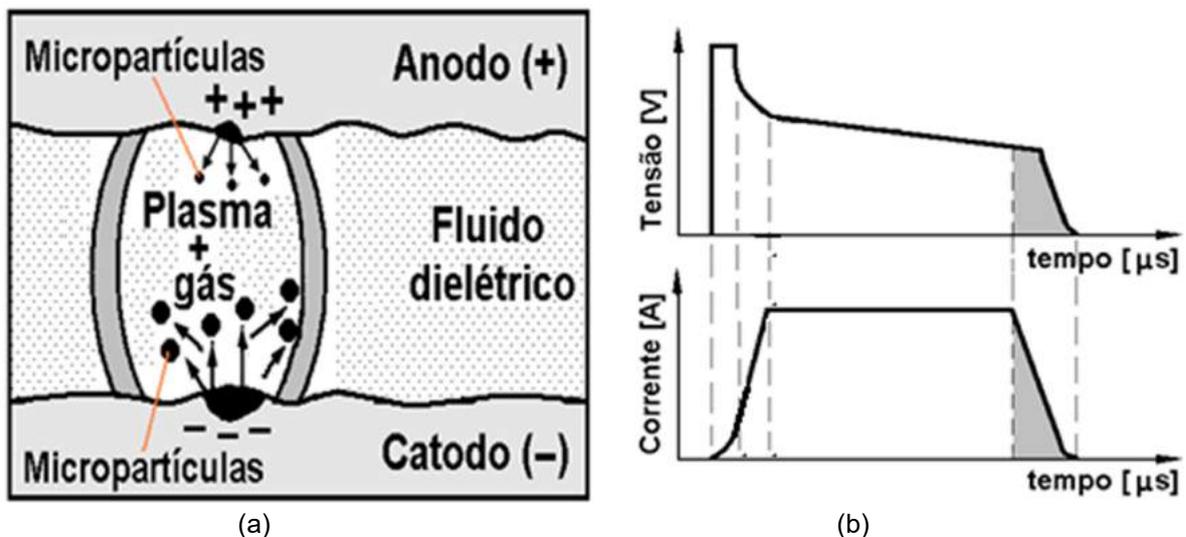


Fonte: Stevens (1998 adaptada).

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 anodo (eletrodo ferramenta) e do catodo (eletrodo peça) são bombardeadas por elétrons e íons respectivamente (STEVENS, 1998).

Segundo McGeough (1988) quando um elétron ou um íon colide com a superfície sua energia cinética é transformada em calor que pode atingir temperaturas acima de  $5.000^{\circ}\text{C}$ , esse calor induz à fusão e à evaporação parcial do material da superfície mostrada na figura 7. A quantidade de material que é fundido depende, entre outros fatores, do número de elétrons ou íons que colidem contra a superfície. Este número de elétrons e íons gerados pela descarga elétrica depende da corrente elétrica e do tempo de duração da descarga elétrica (STEVENS, 1998).

Figura 7 - Ruptura do canal de plasma (a) e evolução da corrente e tensão (b).



Fonte: Stevens (1998 adaptada).

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 20MPa, 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).

As condições iniciais do processo são retomadas e novamente se repetem as sequências para formação de novo canal de plasma. O processo é contínuo e só é interrompido ao final da formação da cavidade requerida.

### **2.1.2. Fluido dielétrico**

O fluido dielétrico é muito importante para o bom desempenho do processo EDM, pois atua diretamente em vários aspectos da usinagem. Pode ser querosene (muito utilizado no passado) ou hidrocarboneto aditivado – ambos derivados do petróleo – água deionizada e até mesmo certas soluções aquosas. Conforme Fuller (1989) o fluido dielétrico tem papel fundamental no processo controlando a potência de abertura da descarga elétrica.

O fluido dielétrico exerce ainda duas outras funções no processo:

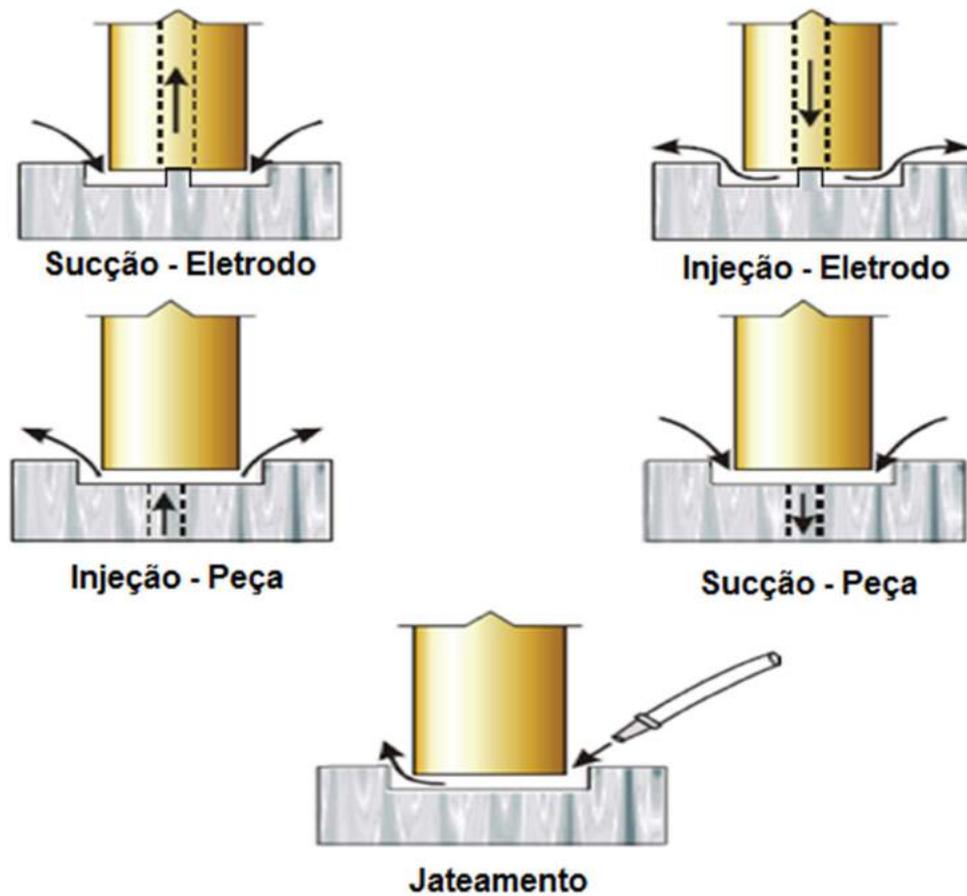
- promove a limpeza da interface ferramenta peça arrastando para fora as partículas fundidas e
  
- auxilia no arrefecimento do sistema.

A limpeza adequada da região usinada com o arrastamento das partículas solidificadas é muito importante para o desempenho do processo, sendo grande responsável pela presença da camada refundida mais ou menos profunda.

A capacidade de arrefecimento influencia também no desempenho do processo, pois o resfriamento relativamente rápido das partículas fundidas, evita o aumento de material que volta a se solidificar e se integra ao material constitutivo da camada refundida, o que é prejudicial à integridade superficial da peça (ARANTES, 2007).

No processo de limpeza da cavidade usinada, o equipamento EDM possibilita a configuração de algumas formas de posicionamento do fluido dielétrico, esse fluxo do dielétrico pode ser no eletrodo ou na peça, dependendo do tipo de cavidade, fixação da peça e forma do eletrodo ferramenta, conforme apresentado na figura 8.

Figura 8 - Representação das opções de limpeza da cavidade na usinagem EDM.



Fonte: Arantes (2007 adaptada).

Segundo Arantes (2007) para realizar suas funções o fluido dielétrico deve ser avaliado principalmente em relação às seguintes propriedades:

**Rigidez Dielétrica** - Rigidez Dielétrica, ou Resistividade elétrica é a medida da capacidade de isolamento elétrico de dado fluido para EDM. Maior rigidez dielétrica implica em menor distância entre ferramenta e peça, melhorando a precisão da usinagem e ajudando a minimizar o arco. É frequentemente vista como indicadora do desempenho do processo EDM (KOKHANOVSKAY, 2004).

**Tempo de Deionização** - Um dos fatores que implicam em altas taxas de remoção de material é o tempo de deionização. Este se refere ao tempo para íons e elétrons se recombinarem depois da descarga elétrica. Quanto menor o tempo de

deionização menor é o tempo necessário entre os pulsos subsequentes (ARANTES, 2007).

**Viscosidade** - Viscosidade é a medida da resistência característica ao escoamento do fluido. Quanto menor a viscosidade melhores serão as características de escoamento, particularmente em cavidades profundas e pequenos detalhes. O fluido de menor viscosidade circula com facilidade por folgas e pequenos orifícios, promovendo melhor limpeza da área usinada (INTECH EDM, 1996).

**Limite de Fluidez** - Limite de fluidez, ou ponto de fluidez, é o indicador da capacidade que o fluido tem de escoar livremente a baixas temperaturas. A temperatura indicada é a mais baixa na qual o fluido possa escoar. Muitos fluidos dielétricos tipicamente tornam-se opacos e mais viscosos quando a temperatura se aproxima do limite de fluidez (INTECH EDM, 1996).

**Odor** - O “odor” pode indicar, muitas vezes, evaporação excessiva do dielétrico, mas pode também indicar a qualidade do local de trabalho para o operador. A maioria dos fluidos de alta qualidade do mercado é desodorizada ou com odor suave e tolerável (INTECH EDM, 1996).

**Custo** - Obviamente o custo é fator importante em qualquer insumo usado no processo produtivo. Entretanto, é falsa economia tentar reduzir os gastos em produtos que não foram formulados para serem usados no processo EDM como fluido dielétrico. O risco de baixa expectativa de vida, potencial dano à saúde e baixo desempenho dielétrico são grandes. Por outro lado, alto custo não necessariamente corresponde ao melhor desempenho ou qualidade das superfícies usinadas (INTECH EDM, 1996).

**Perigo à saúde** - Fator muito importante nos dias atuais é o perigo à saúde causado por produtos químicos durante seu uso na indústria. Muitos esforços têm sido feitos para minimizar os riscos à saúde graças à legislação trabalhista mais rigorosa, no Brasil e no mundo, visando proteger sempre a integridade física do operador. (INTECH EDM, 1996).

### 2.1.3. Parâmetros do processo EDM

A escolha dos parâmetros EDM é importante para determinar a tolerância dimensional 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).

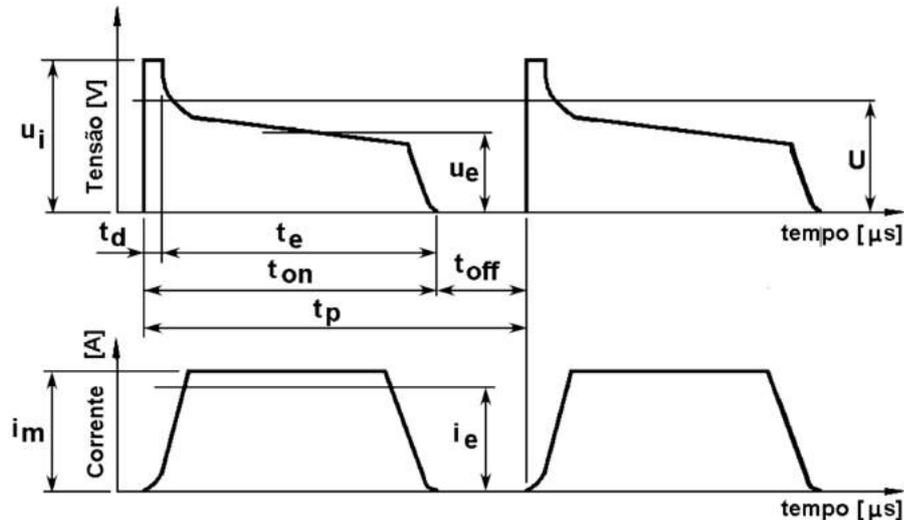
No processo de usinagem EDM por penetração a polaridade geralmente é positiva no eletrodo ferramenta e negativa na peça, sendo os íons positivos os principais responsáveis pela usinagem da peça, diminuindo assim, o desgaste no eletrodo ferramenta e potencializando a remoção de material na peça (MCGEOUGH, 1988).

Dois períodos de tempo 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  $\mu s$ . No tempo  $t_{on}$ , a tensão entre peça e ferramenta forma o canal de plasma. No instante em que a tensão cai, 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 o eletrodo ferramenta e os elétrons e íons se chocam contra as superfícies. Logo, em seguida, começa o tempo  $t_{off}$ , durante o qual as micropartículas 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 a descarga, é representada na figura 9, bem como alguns outros parâmetros elétricos. Os parâmetros elétricos principais são resumidos a seguir:

Figura 9 - Evolução da tensão e corrente elétrica durante a descarga, tempos de duração dos mesmos e parâmetros elétricos.



Fonte: Stevens (1998).

- $U$  = 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.

Segundo Silva (2013) as correntes de valores superiores criam maior queda de pressão no final da descarga e, portanto, mais material é removido. 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. Entretanto, o regime de desbaste tem

a desvantagem de induzir irregularidades superficiais na peça. A superfície fica mais áspera, além da camada refundida e da zona afetada pelo calor (ZAC) ficarem mais espessas.

A distância 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).

Uma das estratégias para diminuir o tempo de usinagem na EDM, melhorar a taxa de remoção de material no processo e conseguir superfícies com rugosidades menores, é usar eletrodos ferramenta distintos para desbaste e acabamento. O eletrodo ferramenta de desbaste com dimensões e formas menores, utiliza parâmetros de corrente e  $t_{on}$  elevados, não importando o resultado dimensional e rugosidade superficial da cavidade usinada, com isso, melhoram a taxa de remoção de material. Na sequência usa-se o eletrodo ferramenta de acabamento com dimensões próximas à medida final (as dimensões não devem ser iguais a forma final da peça, pois existe o sobrecorte), os parâmetros de corrente e  $t_{on}$  são menores e adequados a rugosidade da superfície requerida.

#### **2.1.4. Materiais para eletrodos ferramenta**

Segundo McGeough (1988) os materiais escolhidos para confecção do eletrodo ferramenta devem possuir algumas características:

- baixo custo,
- fácil fabricação pelos processos de usinagem convencionais,
- alto ponto de fusão e
- boa condutividade elétrica.

A grafita é usualmente o material mais utilizado como eletrodo ferramenta, devido à boa usinabilidade e baixo desgaste, sendo disponibilizada comercialmente para EDM em grande variedade de tamanhos e formatos. A densidade pode ser encontrada com grãos de tamanhos que variam entre 0,001 a 0,1mm. Eletrodos confeccionados com grãos menores têm maior resistência à flexão e dureza com

redução do desgaste, além de produzir melhor acabamento superficial. Contudo, quanto menor o grão mais elevado é o custo (FULLER, 1989; BENEDICT, 1987).

Outro material usado em larga escala para a confecção do eletrodo ferramenta é o cobre e suas ligas que também possuem bom desempenho no regime de desbaste, sendo usado tanto quanto a grafita, pois tem características como condutibilidade elevada e custo relativamente baixo quando comparado a grafita (FULLER, 1989).

O cobre eletrolítico é o mais usado na confecção de eletrodo ferramenta depois da grafita. É encontrado comercialmente em diferentes formas e medidas. A tabela 1 ilustra algumas propriedades, formas e dimensões do cobre eletrolítico e cobre cromo.

Tabela 1 - Valores de propriedades físicas e químicas do cobre.

<b>COBRE ELETROLÍTICO e COBRE CROMO</b>			
<b>Característica</b>	<b>Valores</b>		<b>Unidade</b>
<b>Material</b>	<b>Eletrolítico (Cu)</b>	<b>Cromo (CuCr)</b>	
Composição química	99,9 mín. cobre	97,8 cobre/0,4 a 1,2 Cr	%
Dens. a 20°C/peso específico	8920	8890	Kg/m <sup>3</sup>
Ponto de fusão	1083	1080	°C
Resistividade Elétrica a 20°C (Material Recozido)	1,71x10 <sup>-2</sup>	2,1x10 <sup>-2</sup>	μΩm
Módulo de Elasticidade a 20°C	117	157	Gpa
Módulo de Rigidez a 20°C	44	58	Gpa
Preço Médio Barras redondas kg	25	31	R\$
<b>FORMAS e DIMENSÕES COMERCIAIS</b>			
Barras Redondas 3 e 6m	φ2,38 a φ228,60		mm
Barras Retangulares 3 a 6m	≠1,52 x ≠9,52 a ≠6,35 x ≠304,8		mm
Tubos 3 e 6m	φ3,17 a φ101,60 parede 0,053 a 8,72		mm

Fonte: Coppermetal (1988 adaptada).

A liga cobre e tungstênio também pode ser viabilizada como eletrodo ferramenta, sendo muito eficaz na taxa de remoção de material e com baixo desgaste. Porém, é uma liga de custo muito superior ao cobre eletrolítico e apresenta dificuldades de usinagem. O seu uso é indicado na usinagem de cavidades com tolerâncias dimensionais reduzidas da ordem de 0,02mm (MCGEOUGH, 1988).

A liga cobre-cromo é muito similar ao cobre eletrolítico nas principais características físico-químicas e custo.

O resultado final com o uso de cobre pode ser o mesmo da grafita, tanto em regime de desbaste como acabamento, porém o custo para obtê-lo é diferente. A escolha do material do eletrodo 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 grafita. Porém, eles sofrem desgaste 15% superior quando usado na usinagem grosseira de aço, assim como o latão, que embora, o material seja altamente estável quando sujeito às descargas elétricas, tem desgaste relativamente alto, restringindo sua utilização (MCGEOUGH, 1988).

#### **2.1.5. Materiais para eletrodos peça**

Quanto aos materiais usinados por EDM, os aços ferramenta se destacam, pois são ligas complexas usadas em diversas aplicações na indústria de fabricação de ferramentas para trabalho a quente e a frio. Esse tipo de aço se caracteriza pela elevada dureza e resistência à abrasão. Tem boa tenacidade e mantém as propriedades de resistência mecânica mesmo sob elevadas temperaturas. Tais características são obtidas com a adição de elementos de liga como tungstênio, molibdênio, vanádio, manganês e cromo. A maior parte dos aços ferramenta é forjada. Outra parte é produzida por fundição de precisão ou por metalurgia do pó (CALLISTER, 2000).

A fusão deste tipo de aço é realizada, geralmente, em quantidades pequenas em fornos elétricos. A seleção de matéria-prima é fator de grande importância para o processo. Esse cuidado também pode ser verificado na utilização de sucata. Há ainda atenção especial com as tolerâncias de composição química e homogeneidade do produto final. Estas e outras particularidades tornam o aço

ferramenta material de custo mais elevado em comparação com os aços comuns (HOYLE, 1998).

A influência da composição da liga sobre a habilidade do aço em se transformar em martensita pelo tratamento de têmpera, está relacionada ao parâmetro que é conhecido por endurecibilidade. Para cada liga de aço diferente, existe uma relação específica entre as propriedades mecânicas e a taxa de resfriamento (CALLISTER, 2000).

Apesar de existirem mais de 100 tipos de aços ferramenta normalizados internacionalmente, para as mais diversas aplicações e solicitações, a indústria trabalha com gama relativamente reduzida de opções. São preferidos aqueles que possuem suas propriedades e desempenhos consagrados ao longo do tempo, como, por exemplo, os aços AISI H13, AISI D2 e AISI M2. De qualquer forma a escolha do aço requer análise detalhada de toda a gama de fatores incluindo ainda parâmetros como volume de produção, vida útil da ferramenta e custos associados (VILLARES, 2014).

Aço rápido - desenvolvido para aplicação de usinagem em elevadas velocidades. Podem ser ao molibdênio (grupo M) e ao tungstênio (grupo T). Ambos possuem performances semelhantes, entretanto os do grupo M apresentam menor custo.

Aplicação: ferramentas, brocas, perfuratrizes, alargadores de furos, machos para abertura de roscas e fresas helicoidais. Alguns tipos podem ser utilizados para determinadas aplicações a frio, como laminadores de rosca, punções e matrizes para corte de discos.

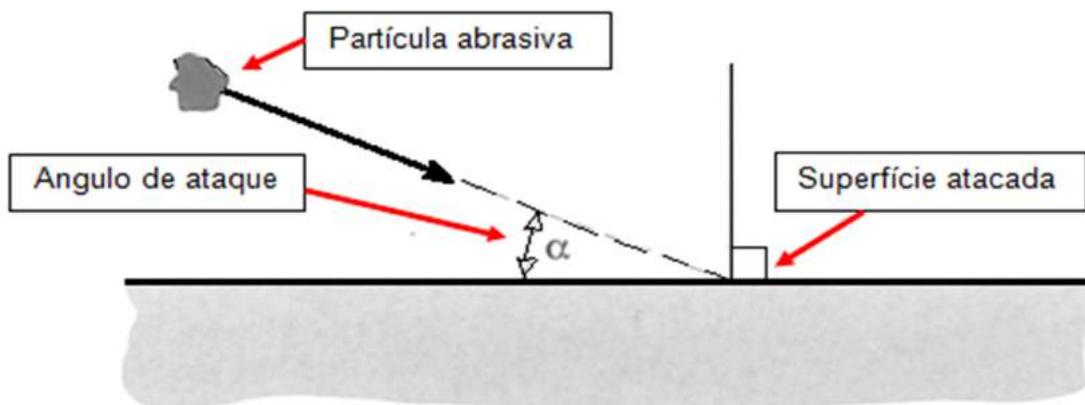
O aço AISI M2 é comumente usado como ferramenta de corte na indústria para confecção de estampos de corte, dobra, repuxo. Os aços rápidos recebem esta denominação devido a sua capacidade de reter elevadas durezas (1000 HV ou 65-70 HRC) mesmo se utilizados no corte rápido de materiais (HOYLE, 1988).

Além disso, essa característica promove a capacidade de manter durezas elevadas se submetidos a temperaturas de até 600°C, por exemplo, 48 HRC em temperaturas de 593°C (ROBERTS, 1980).

## 2.2. Usinagem com abrasivos

Segundo Hutchings (1992) em algumas situações, o impacto de partículas sólidas transportadas pela corrente de gás ou líquido causa desgaste quando atinge a superfície (Figura 10). 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 10 - Erosão pelo impacto de partícula sólida.



Fonte: Hutchings (1992 adaptada).

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 dureza, tamanho e forma devem ser observadas. A dureza da partícula envolvida na erosão influencia a taxa de desgaste. A 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

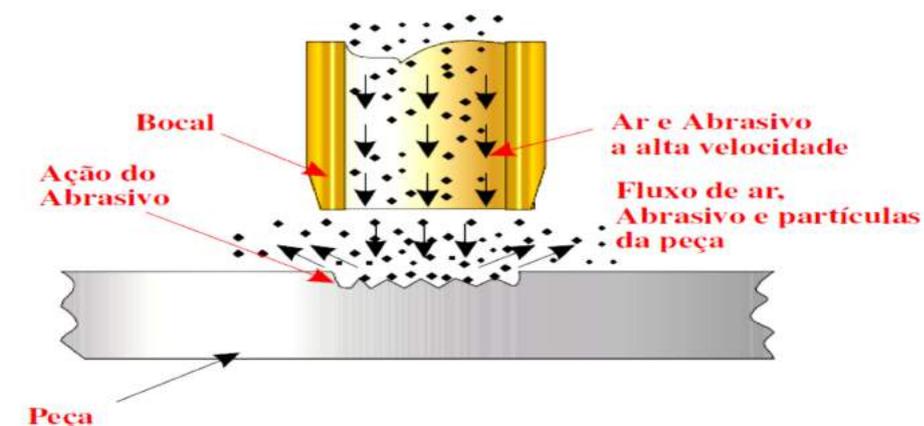
desgaste dependem fortemente das formas das partículas. Partículas angulares causam maior desgaste que as partículas arredondadas (SILVA, 2013).

### 2.2.1. Processo de Usinagem por Jato Abrasivo (AJM)

A Usinagem por Jato Abrasivo (AJM) é o processo de remoção de material da superfície por meio da ação erosiva de partículas de grãos abrasivos que se chocam contra a mesma a alta velocidade. Para se obter altas velocidades as partículas são forçadas a passar pelo bico com gás comprimido, usualmente ar. Quanto ao tamanho do abrasivo, pesquisas mostram que com seu aumento ocorre o aumento da taxa de remoção de material. O mesmo efeito é observado para o acabamento superficial, ou seja, quanto maiores às partículas abrasivas maior também a rugosidade da superfície usinada. Entretanto, segundo Arantes (2007) existe o ponto máximo, a partir desse ponto (aproximadamente  $75\mu\text{m}$ ) a taxa de remoção de material começa a declinar. Quanto maior a pressão do jato maiores serão as taxas de remoção de material, pois a velocidade das partículas estão diretamente vinculadas a pressão e portanto, à energia liberada no impacto das partículas na superfície da peça.

Para a Usinagem por Jato abrasivo a taxa de remoção de material é máxima para valores de ângulo do jato abrasivo em torno de  $65^\circ$ , Arantes (2007). A figura 11 ilustra a representação esquemática do jato abrasivo.

Figura 11 - Princípio da usinagem por AJM

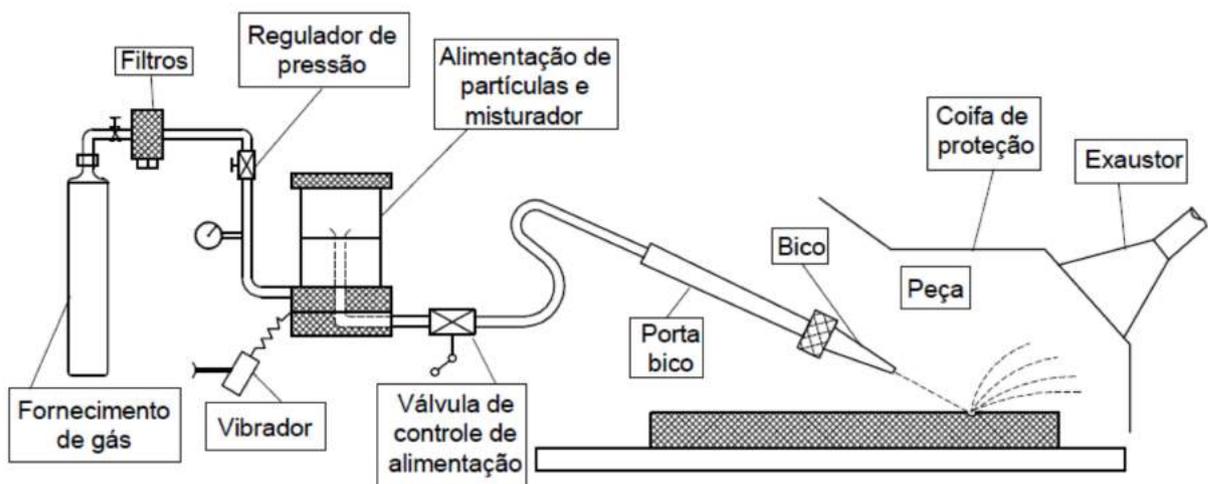


Fonte: Tuersley et al. (1994).

O abrasivo carboneto de silício e a alumina são os mais utilizados para corte, ambos eficazes para as mesmas aplicações. Os abrasivos estão disponíveis em vários tamanhos, sendo que, os abrasivos com maiores granulometrias removem maiores quantidades de material e são mais indicados para operações de corte e os abrasivos de menor tamanho são mais úteis para polimento e limpeza (BENEDICT, 1987).

A figura 12 ilustra os principais componentes do sistema AJM. A entrada de gás é necessária para pressurizar o sistema. O gás pode ser ar comprimido industrial ou gás inerte (FULLER, 1989).

Figura 12 - Principais componentes do sistema AJM.



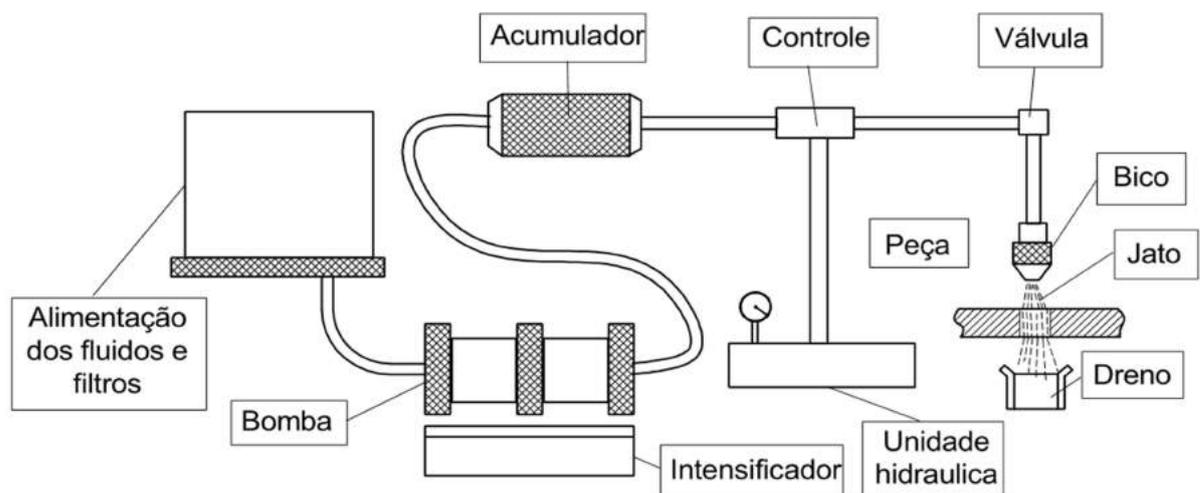
Fonte: Fuller (1989 adaptada).

### 2.2.2. Processo de Usinagem por Jato de Água (WJM)

O processo de Usinagem com Jato de Água (WJM) foi implementado nos últimos 150 anos, sendo que dois momentos podem ser citados. O primeiro foi o desenvolvimento da mineração hidráulica como a maior ferramenta de extração de ouro na “Califórnia do Ouro” durante os anos de 1853 a 1886 (LONGRIDGE, 1910). O segundo foi o desenvolvimento da tecnologia da mineração, onde jatos de água são utilizados para a limpeza do minério. A confiabilidade e a eficiência da técnica atingiram níveis satisfatórios apenas na década de 80 do século passado. O

elemento chave do processo é o jato de água sob pressão extremamente alta, produzida por intensificador e acumulador (Figura 13) com velocidade de aproximadamente 900m/s. Quando o fluxo atinge a superfície do alvo o material é rapidamente removido pela ação da água. Com o aparecimento de equipamentos portáteis em lava-jatos e de uso doméstico aplicações similares se espalharam rápido, e demonstram as vantagens dessa ferramenta.

Figura 13 - Esquema de funcionamento WJM.



Fonte: Fuller (1989 adaptada).

### 2.2.3. Processo de Usinagem por Jato de Água abrasivo (AWJM)

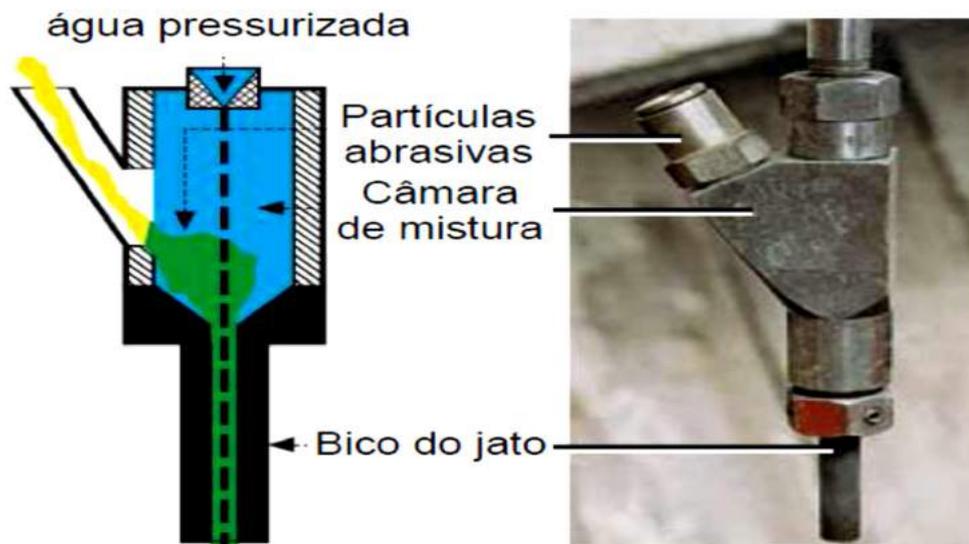
De acordo com Benedict (1987) o processo de Usinagem por Jato de Água Abrasivo (*Abrasive Water Jet Machining – AWJM*) é a combinação dos processos AJM e WJM. Eles unem a ação erosiva da água com o efeito abrasivo das partículas carregadas pelo jato de água sob pressão.

O processo AWJM envolve o poder de impacto de partículas abrasivas na remoção de material da superfície da peça (JUNKAR *et al*, 2006). Geralmente, esse processo é muito utilizado em operações de corte, limpeza de superfícies já usinadas por outros processos e abertura de furos largos. Mas vários trabalhos em diferentes materiais têm mostrado que também pode ser utilizado como ferramenta de corte

para operações de torneamento, fresamento e furação com razoável sucesso (BABU; CHETTY, 2003).

Na integração dos processos AJM e WJM a corrente de pequenas partículas abrasivas é introduzida e arrastada pelo jato de tal maneira que as partículas misturam-se com o fluxo de água. A figura 14 ilustra o movimento citado. O fluxo da mistura de água com partículas abrasivas que saem do bico *venturi*, possibilita o corte de diversos materiais, tais como metais, vidro, cerâmica e compósitos (BENEDICT, 1987).

Figura 14 - Mistura das partículas abrasivas com o jato de água na câmara de mistura do bico *venturi* usado no AWJM.



Fonte: Woma (2010).

Alguns dos parâmetros de maior influência no processo AWJM são:

- pressão do jato de água,
- distância entre bico e peça,
- ângulo de ataque do jato abrasivo,
- bocal de injeção,
- geometria do bocal de jateamento
- tipo e tamanho do abrasivo e
- fluxo do jato.

A seguir, o detalhamento dos principais parâmetros do processo:

**Pressão do Jato** - A pressão da água utilizada na usinagem de materiais cerâmicos é geralmente da ordem de 200 a 300MPa. O trabalho reportado por Hashish (1989) foi exceção, pois utilizou pressões acima de 400MPa e avaliou uma variedade de compósitos. Nessas pressões, os valores de taxa de remoção de material foram até quatro vezes maiores que quando utilizadas as pressões de 200MPa.

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

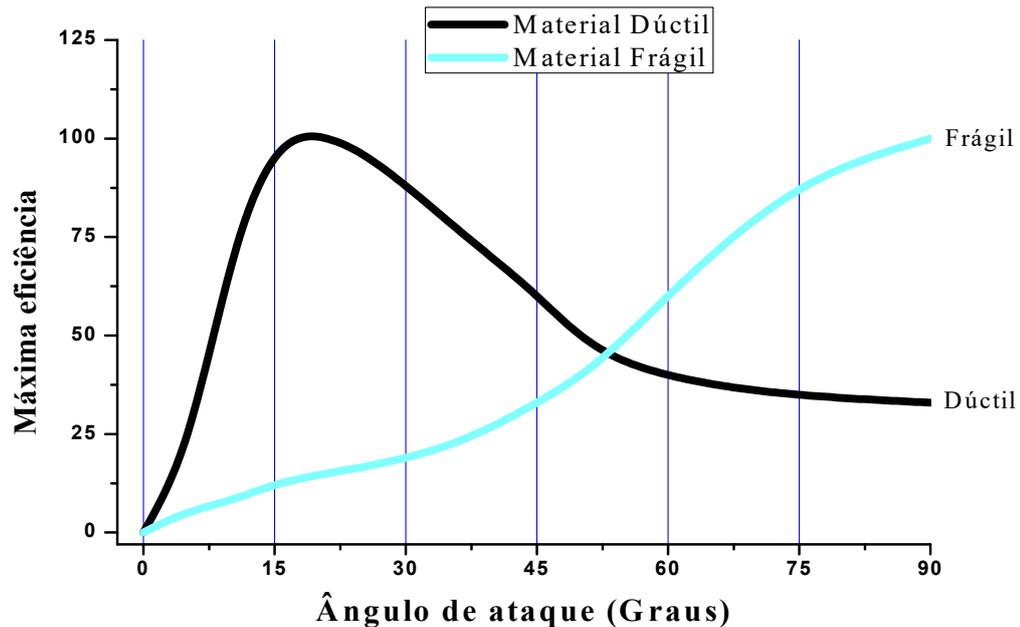
**Material do Abrasivo** - A especificação do material do abrasivo tem a maior influência no processo. Para os cerâmicos de menor resistência, alumina e carboneto de silício são igualmente efetivos. Para materiais cerâmicos mais avançados, muitas vezes, o melhor abrasivo pode ser o carbeto de boro por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

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

**Ângulo de Ataque** - A influência do ângulo de ataque vai depender do material a ser usinado. A figura 15 apresenta o comportamento da taxa de remoção de material em relação ao ângulo de ataque para materiais dúcteis e frágeis. Sua influência no processo vai depender do tipo de comportamento do material usinado. Para o material cujo comportamento é de material dúctil, a resposta ao ângulo de ataque é

próximo de 20°. Já para material com comportamento frágil a máxima taxa de remoção de material é atingida com ângulo de 90° (OCZOS, 1996; KOZAK *et al*, 2001).

Figura 15 - Efeito do ângulo de impacto na taxa de remoção de material.



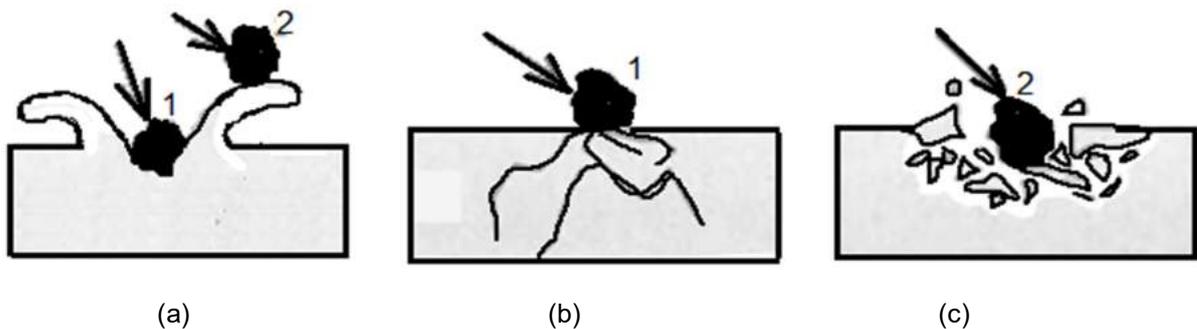
Fonte: Summers (1995 adaptada).

Nos materiais dúcteis 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 16(a). Essas rebarbas são removidas quando atingida por outra partícula, posição da partícula 2 na figura 16(a) (ZUM GAHR, 1987). O material será arrancado somente se o deslocamento e movimento das partículas forem significantes. O material dúctil é removido por meio do processo que une fluxo de material e corte, depois da transição para o estado plástico (SUMMERS, 1995).

Segundo Summers (1995) o mecanismo de falha do material frágil, quando sujeito ao impacto, pode ser equiparado ao que ocorre quando o indentador pressiona a superfície. Primeiramente, a 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

e fissuras radiais são geradas na região deformada em torno do perímetro do material de contato. 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 16(b)). A força sobre a superfície continua a produzir as fissuras. As trincas laterais continuam a alargar-se e se unem, o que promove a remoção do material (Figura 16(c)). Deste modo, danos mais intensos em materiais frágeis, ocorrem quando as partículas de impacto atuam perpendicularmente à superfície.

Figura 16 - Processo de erosão pelo impacto de partículas sólidas contra a superfície do material dúctil e frágil. Dúctil (a), formação de fendas frágil (b) e remoção de material frágil (c).



Fonte: Summers (1995).

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. Processo Híbrido de Usinagem

Segundo Arantes (2007) um dos métodos mais eficientes de se obter alto desempenho em usinagem consiste na combinação de vários processos físicos e químicos agindo na peça num único processo de usinagem, definido como “Processo Híbrido de Usinagem”. A combinação de processos como cisalhamento, calor, fusão, evaporação, dissolução, dentre outros, modificando as condições físico-

químicas dos processos mencionados e as propriedades do material da peça, que devem ser fatores decisivos nos resultados do mecanismo particular de usinagem (WANG *et al*, 2003). Por essas razões, o desempenho dos processos híbridos pode ser consideravelmente diferente do desempenho isolado daqueles processos que os compõem. Por exemplo, a produtividade do processo híbrido associando a usinagem por descargas elétricas (EDM) e usinagem eletroquímica (ECM) formando o processo (ADCM) que consiste no uso das descargas elétricas em eletrólito pode gerar taxa de remoção de material de 5 a 50 vezes maior que a dos processos ECM e EDM em separado (KOZAK; OCZOS, 2001).

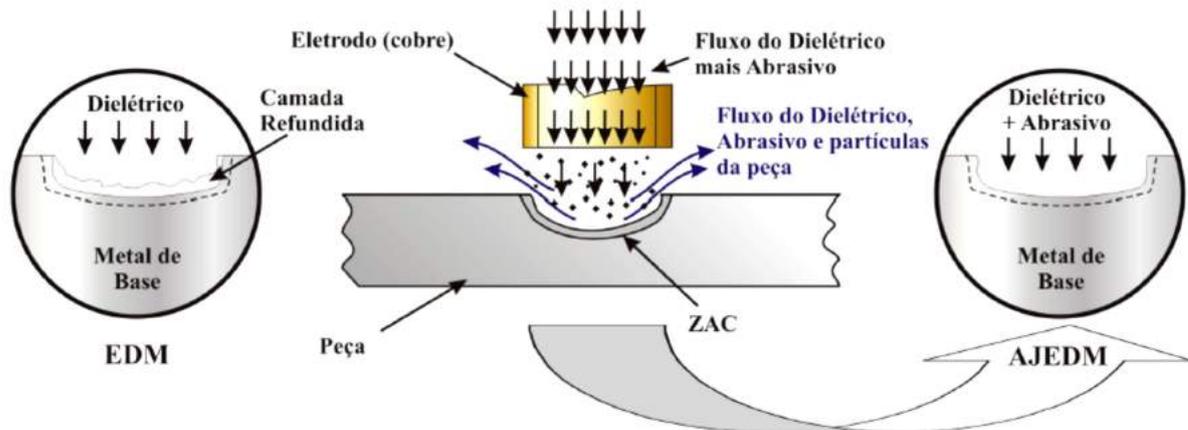
A maioria dos processos híbridos na indústria são os processos de usinagem híbrida abrasiva (AHM). Eles podem ser divididos em três grandes grupos: Usinagem Abrasiva por Descargas Elétricas (AEDM), Usinagem Abrasiva Eletroquímica (AEEM) e Usinagem Eletroquímica por Descargas Elétricas com Abrasivo (AEEDM).

### **2.3.1. Processo de Usinagem Híbrido (AJEDM)**

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

No processo EDM sempre ocorre formação de “camada branca”, ou camada refundida, pois como a velocidade do fluido dielétrico nesse caso é pequena não se consegue evitar que algum material fundido volte a se solidificar por sobre a superfície usinada. Essa camada refundida é prejudicial à peça, pois afeta as propriedades mecânicas da superfície gerada. Com a aplicação do jato abrasivo simultaneamente ao processo de eletroerosão, mesmo que ocorra deposição de material na superfície usinada, esse material será quase que instantaneamente removido pela ação erosiva do abrasivo ilustrada na figura 17 (ARANTES, 2007).

Figura 17 - Princípio da usinagem híbrida EDM associado à AJWM (AJEDM).



Fonte: Arantes (2007 adaptada).

Segundo Arantes (2007) as vantagens esperadas do processo AJEDM são:

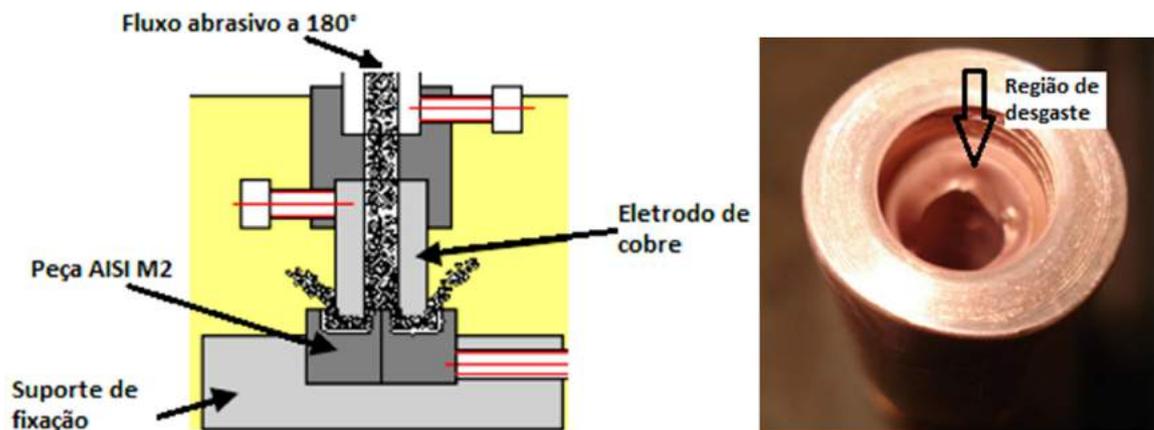
- O processo híbrido pode ser até três vezes mais rápido que o processo EDM isoladamente, não somente pela aceleração causada pelos impactos das partículas abrasivas, mas também, pela eficiência do sistema de lavagem do material fundido e pelas partículas dispersas no fluido que melhoram a concentração das descargas elétricas (FERNANDES, 1999).
- O processo híbrido pode utilizar água deionizada misturada com partículas abrasivas. A água tem a desvantagem de não concentrar as descargas elétricas, o que diminui a eficiência do processo deixando-o muito lento. A presença do abrasivo diminui consideravelmente esse problema, tornando o processo mais rápido e diminuindo muito os custos com fluidos dielétricos (FERNANDES, 1999).
- A utilização de água deionizada constitui uma das fontes de economia do processo AEDM, pois os fluidos dielétricos são muito caros e, dependendo das condições de operação do equipamento EDM, se degradam rapidamente.

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

Segundo Arantes (2007) entre a desvantagens do processo destacam-se duas:

- As partículas abrasivas podem danificar partes importantes do equipamento EDM. Portanto, as máquinas devem estar protegidas e o sistema de filtragem do fluido dielétrico e abrasivo deve ser adequado.
- A ferramenta (cobre/grafita) deve ser protegida internamente, provavelmente com algum revestimento, pois mesmo com o ângulo de ataque de  $0^\circ$  o desgaste pode ser considerável conforme figura 18. O desgaste do eletrodo é verificado na entrada do fluxo abrasivo e nas bordas de saída, ocorrendo neste último caso, desgaste abrasivo devido às partículas em alta pressão e erosivo pelo choque de elétrons do processo EDM.

Figura 18 - Fluxo Abrasivo e região de desgaste do eletrodo ferramenta de cobre.

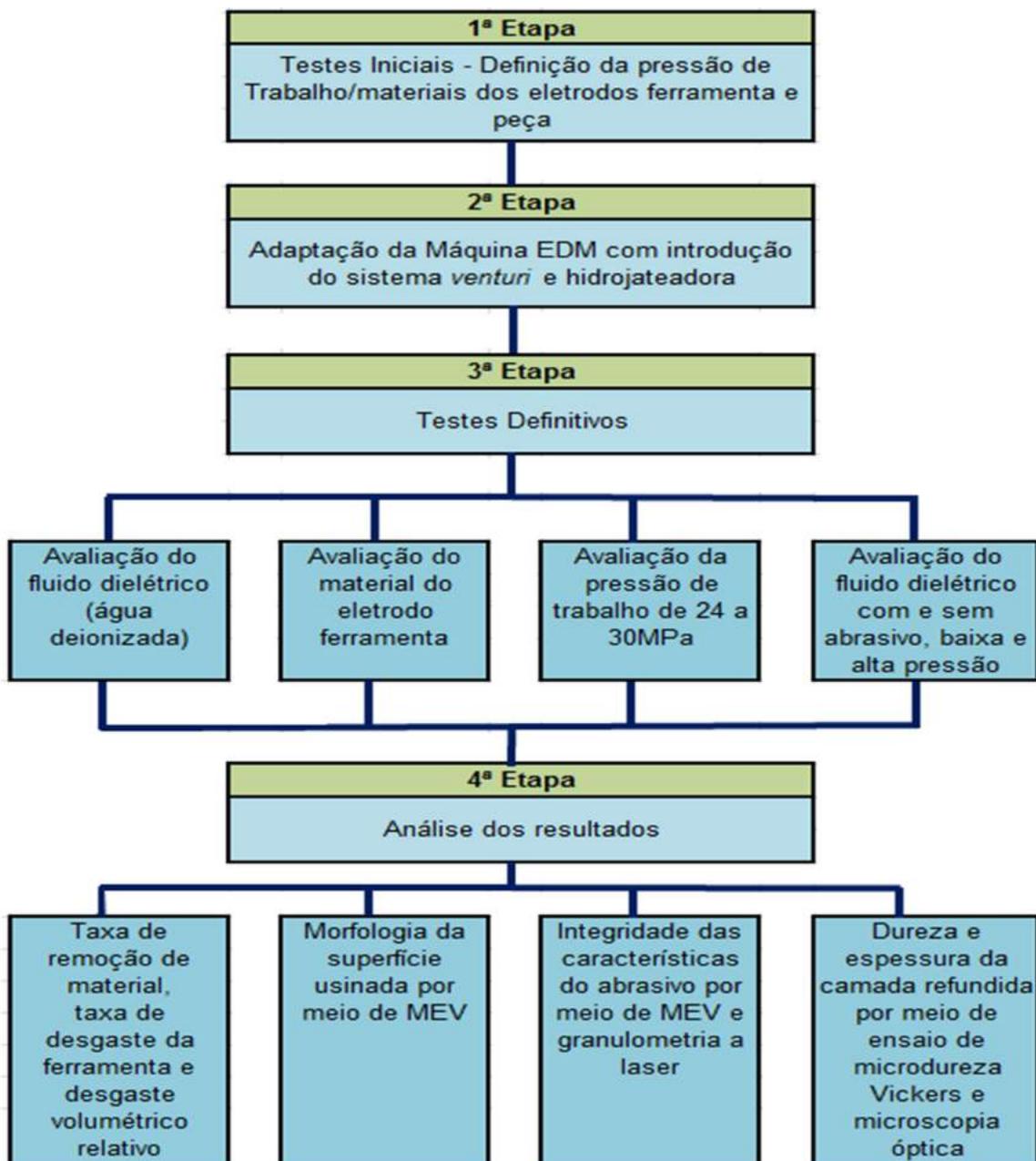


Fonte: Silva (2013 adaptada).

### 3. Metodologia

Para o início dos testes foram definidos materiais e pressões de trabalho em função do equipamento disponível. Seguiu-se com a adaptação do equipamento EDM integrando-o ao sistema de alta pressão (bomba hidrojetadora), além de bico *venturi* para a mistura das partículas abrasivas no fluxo de água. A figura 19 ilustra o fluxograma de desenvolvimento do trabalho.

Figura 19 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento experimental da pesquisa.



Fonte: autor.

### 3.1. Material

A seleção dos materiais para a pesquisa seguiu as características mais usuais na indústria: custo, geometria e desempenho na taxa de remoção de material e referências de trabalhos anteriores (SILVA, 2013).

#### 3.1.1. Material e geometria do eletrodo ferramenta

Pelo fato do processo AJEDM ser misto e exigir do material do eletrodo ferramenta características de boa condutividade elétrica, elevado ponto de fusão e resistência mecânica (desgaste erosivo), selecionou-se materiais para confecção dos eletrodos ferramenta que apresentassem essas características: cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita.

O cobre eletrolítico e cobre cromo foram caracterizados por meio de espectrometria de emissão óptica no instrumento marca *Oxford* modelo *Foundry-Master Xpert*. Os valores encontrados são apresentados na tabela 2.

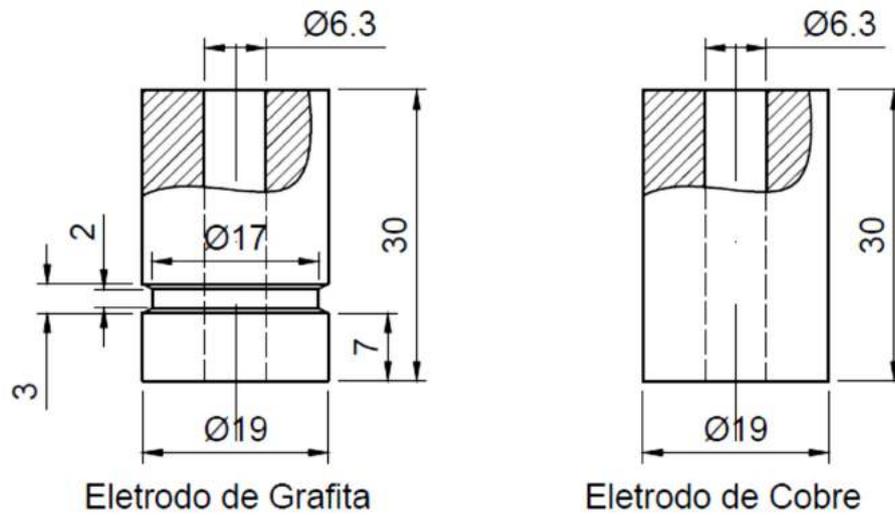
Tabela 2 - Composição química do cobre eletrolítico e cobre cromo em percentual.

<b>COBRE ELETROLÍTICO e COBRE CROMO</b>			
Característica	Valores		Unidade
Material	Eletrolítico (Cu)	Cromo (CuCr)	
Composição química Referência	99,9 cobre	97,8 cobre/0,4 a 1,2 Cr	%
Composição medida	99,8 cobre	98,8 cobre/0,77 Cr	%

Fonte: autor.

Os eletrodos ferramenta foram confeccionados em torno horizontal convencional marca Nardini mod. 500II no formato tubular com diâmetro externo de  $\phi 19,0\text{mm}$  e furo central com  $\phi 6,3\text{mm}$  por  $30,0\text{mm}$  de comprimento. Pois neste formato aproveita-se a bitola comercial de  $\phi 19,05\text{mm}$  e tem-se melhor posicionamento do jato abrasivo no centro da cavidade usinada, melhorando a retirada da camada refundida figura 20 (SILVA, 2013).

Figura 20 - Geometria dos eletrodos ferramenta de grafita e cobre eletrolítico.



Tolerância geral  $\pm 0,1\text{mm}$

Fonte: autor

Para facilitar a fixação e evitar o arraste do eletrodo ferramenta de grafita pelo fluido abrasivo foi usinado no corpo do eletrodo um canal e rebaixo na ponta do parafuso. Nos testes iniciais, mesmo com o fluxo de jato abrasivo paralelo ao furo central, a força de arrasto foi superior a fixação do eletrodo ferramenta no suporte (a grafita é frágil não resistindo ao aperto necessário) desprendendo o eletrodo do suporte e inviabilizando os testes iniciais figura 21.

Figura 21 - Detalhe do canal no eletrodo de grafita e ponta do parafuso de fixação.



Fonte: autor



Foram usinados quinze eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico, sendo três para cada pressão de trabalho (24, 26, 28, 30MPa e 1MPa), seis eletrodos de cobre cromo e seis eletrodos de grafita. Os eletrodos de cobre cromo e grafita foram testados apenas nas pressões de 30MPa do processo AJEDM e 1MPa no processo EDM. A tabela 3 apresenta a quantidade de eletrodos usinados para cada pressão de teste.

Tabela 3 - Quantidade de eletrodos ferramentas por teste.

Eletrodos Ferramentas						
Material	Processo AJEDM				Processo EDM	Total
	24MPa	26MPa	28MPa	30MPa	1MPa	
Cobre eletrolítico	3	3	3	3	3	15
Cobre Cromo				3	3	6
Grafita				3	3	6
Total	3	3	3	9	9	27

Fonte: autor

### 3.1.2. Material e geometria do Corpo de prova (Cp)

Para os Corpos de prova (Cp<sub>s</sub>) foi utilizado o aço AISI M2 temperado e revenido com dureza de 63HRC  $\pm$  2, aço ferramenta para trabalho a frio, conhecido comercialmente como “aço rápido”. A tabela 4 ilustra a composição química de referência e a obtida por meio de espectrometria de emissão óptica do aço AISI M2.

Tabela 4 - Composição química do aço AISI M2 em percentual de massa.

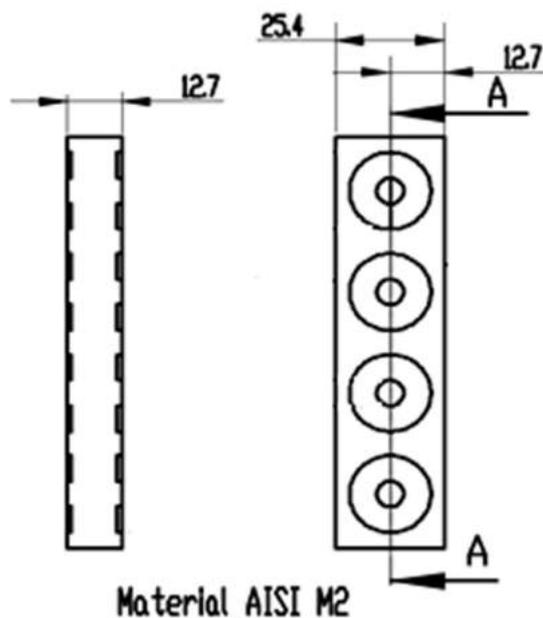
Elemento	Carbono	Cromo	Vanádio	Tungstênio	Molibdênio	Ferro
Referência	0,83	4,30	1,90	6,40	5,00	81,55
Medido	0,88	3,95	2,05	6,49	4,94	80,50

Fonte: Bayer (1990 adaptada).

Os corpos de prova foram adquiridos em bastões quadrados de 12,7mm por 101,6mm de comprimento (dimensões comerciais). Estes bastões, num total de oito, foram montados no porta amostras de dois em dois com as faces encostadas

conforme mostrado na figura 22. Após quatro testes do lado de cima, os corpos de prova foram virados 180° para utilização da parte inferior. As distâncias entre os testes foram ajustadas de forma que as cavidades não se encontrassem. Todos os corpos de prova foram secos e pesados antes e após cada teste três vezes para cálculo da média e desvio padrão.

Figura 22 - Geometria dos corpos de prova em aço AISI M2 posicionamento e fixação no porta amostra.



Fonte: autor.

### 3.1.3. Material abrasivo e sistema de alimentação

Quanto ao abrasivo, foi utilizado o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) com granulometria de 600mesh. O abrasivo foi colocado em recipientes cilíndricos, os quais foram numerados de um a quatro e a cada quatro testes o abrasivo foi completado para nova sequência de testes. A massa inicial de abrasivos em cada recipiente foi de 1,5Kg em média e a massa final variou conforme a pressão de trabalho e a posição do bico alimentador que aspirava o pó abrasivo de dentro do recipiente. A pressão negativa gerada pelo bico *venturi* era constante em cada pressão de trabalho, e a posição do bico alimentador no recipiente foi realizada manualmente conforme a figura 23 ilustra.

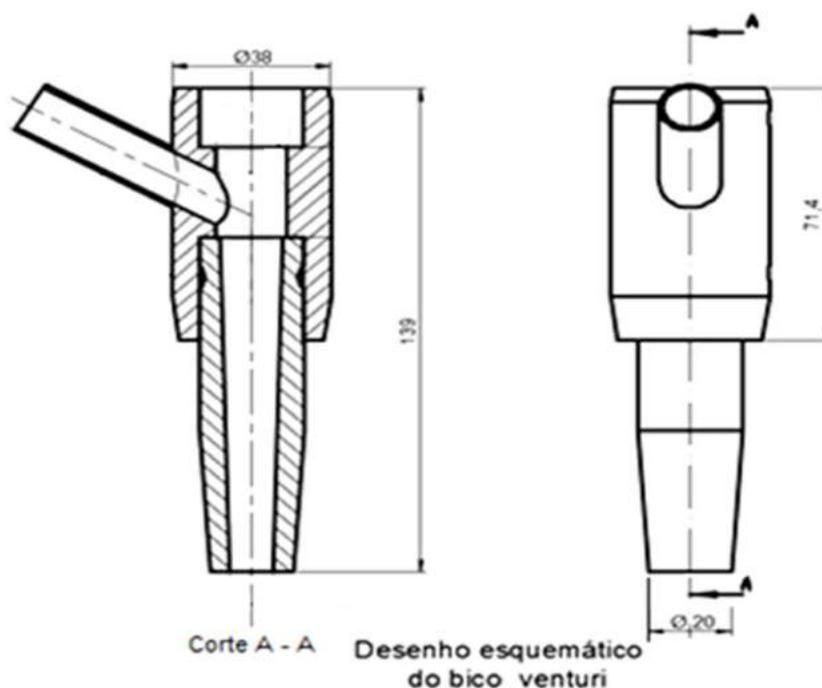
Figura 23 - Bico alimentador de abrasivo e recipiente.



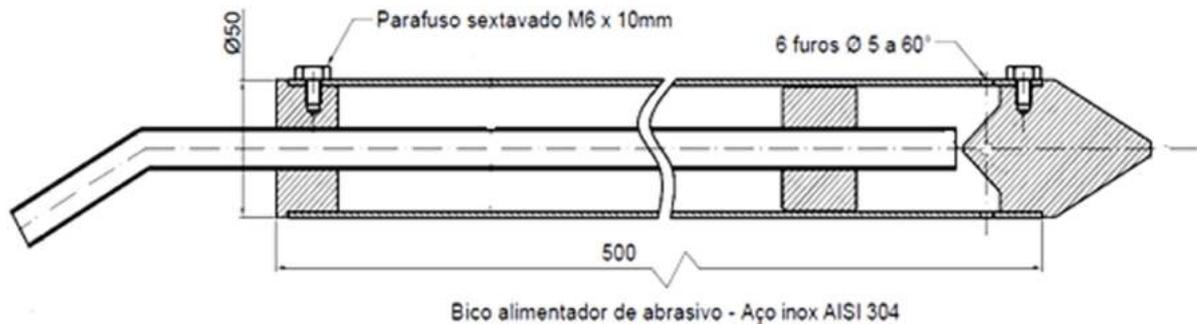
Fonte: autor.

O sistema de alimentação de abrasivo foi composto de bico alimentador, mangueira transparente  $\phi 15,0\text{mm}$  interno por 2m de comprimento e bico *venturi*. Todo o sistema de alimentação de abrasivos foi adquirido comercialmente. As figuras 24 e 25 apresentam os principais detalhes do bico *venturi* utilizado e bico alimentador de abrasivos.

Figura 24 - Desenho esquemático do bico *venturi*.



Fonte: autor.  
 Figura 25 - Desenho esquemático do bico alimentador de abrasivo.



Fonte: autor.

### 3.1.4. Fluido dielétrico

Para obter água deionizada foi utilizada água potável com condutividade elétrica média de  $160\mu\text{S}/\text{cm}$ . Após passar pelo aparelho deionizador marca *Acqua Dellta* ( $\phi 150\text{mm} \times 850\text{mm}$  de comprimento) a condutividade elétrica média adquiriu valores da ordem de  $3\mu\text{S}/\text{cm}$ . A água deionizada foi armazenada em dois tambores plásticos de 200L cada para início dos testes. O aparelho deionizador pode ser regenerado por meio da troca da resina armazenada na coluna central do deionizador. Cada carga (troca) de resina produz em média 2000L de água deionizada com condutividade elétrica inferior a  $3\mu\text{S}/\text{cm}$ , conforme informações do fabricante. O monitoramento da rigidez dielétrica foi acompanhado por meio de condutímetro portátil marca PHTEK mod. CD-203 com faixa de operação de 0 a 1999  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e incerteza de  $\pm 2\%$ . Os aparelhos são mostrados na Figura 26.

Figura 26 - Aparelho deionizador de água (a) e condutímetro (b).



(a)

Fonte: autor.



(b)

A tabela 5 relaciona as características do aparelho deionizador utilizado para produção da água deionizada.

Tabela 5 - Informações técnicas do aparelho deionizador.

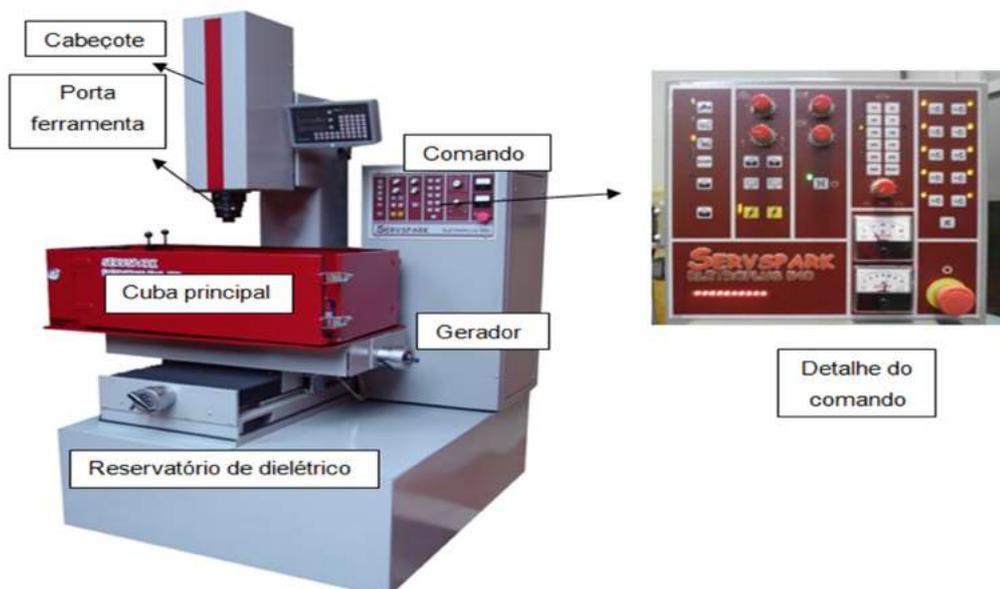
Característica	Valor	Unidade
Produção de água deionizada	50	L/h
Produção de água deionizada por carga de resina	2000	L
Quantidade de resina por troca	5	Kg
Custo da resina por troca	300	R\$
Condutividade dielétrica da água produzida por troca	< 3	$\mu\text{S/cm}$

Fonte: Silva (2013).

### 3.2. Equipamento EDM

O equipamento EDM utilizado foi o modelo Eletroplus 540 da Servspark por penetração com potência máxima de 40A. Esse equipamento tem gerador de controle de pulso que opera automaticamente após a seleção dos níveis de operações possíveis e seleção das funções disponíveis no painel gerador. A figura 27 apresenta o esquema do equipamento com os principais componentes antes da adaptação da bomba hidrojateadora.

Figura 27– Equipamento EDM com seus componentes principais.



Fonte: autor.

### 3.2.1. Adaptações do equipamento EDM

A primeira etapa da adaptação foi montar a cuba auxiliar no tanque de trabalho para que não ocorresse contaminação do fluido dielétrico (óleo mineral) da máquina EDM. A cuba foi confeccionada em aço inoxidável AISI 304 para resistir ao ataque corrosivo da água e em chapa 1,25mm de espessura nas dimensões internas de 350x400x750mm. Foram instaladas, também, tampas em aço inoxidável de chapa 1,25mm para evitar os respingos provocados pelo jato de alta pressão. Pode-se observar na figura 28 como ficou a cuba auxiliar posicionada no interior do tanque de trabalho do equipamento EDM.

Figura 28 - Cuba auxiliar instalada no tanque principal do equipamento EDM.

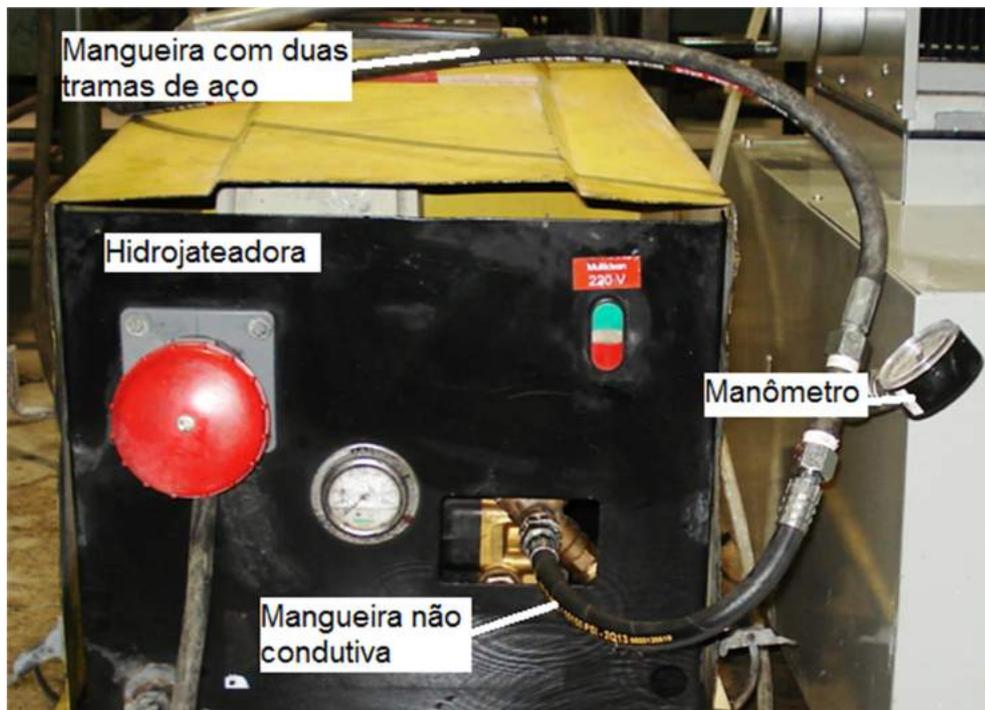


Fonte: Silva (2013).

Ao equipamento EDM foi adaptada uma bomba hidrojateadora de alta pressão marca *Cinomatic*®, modelo *Cinojet*® 400/22 de 30MPa com motor trifásico de 220V e 15kW de potência. Para a conexão da bomba hidrojateadora ao equipamento EDM foi utilizada a mangueira de alta pressão marca *Balflex*®, modelo *2-Max Jack* de  $\phi 9,5\text{mm}$  x 2m de comprimento (com duas tramas de aço) e pressão de trabalho de 50MPa.

Para evitar que a mangueira utilizada gerasse curto-circuito na operação do equipamento EDM, devido à estrutura da mangueira de alta pressão permitir fuga de corrente pelas duas tramas de aço, houve a necessidade de adaptar outra mangueira resistente a pressão de 30MPa e que não tivesse malha de aço na sua estrutura, ao custo duas vezes maior que à mangueira comum. Por isso, a adaptação foi apenas na saída da hidrojateadora. Foi utilizado a mangueira hidráulica termoplástica não condutiva marca *Balflex*<sup>®</sup> modelo EM-855-R7 de  $\phi 9,5\text{mm} \times 500\text{mm}$  de comprimento (com duas tramas de poliéster) e pressão de trabalho de 32MPa. Na união entre as duas mangueiras de alta pressão foi instalado o manômetro com faixa de escala de 0 a 70MPa e resolução de 1MPa usado no ajuste e medição da pressão de teste regulada na hidrojateadora, conforme observado na figura 29.

Figura 29 - Adaptação da mangueira não condutiva com malha de poliéster.

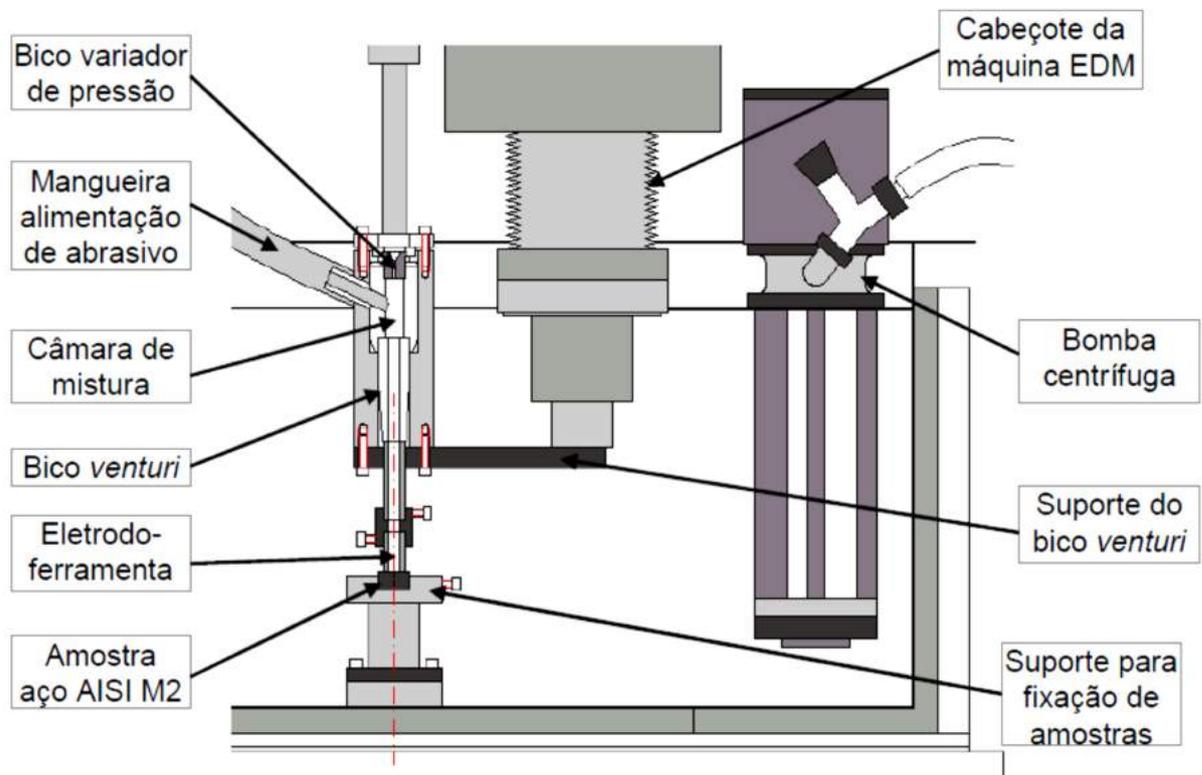


Fonte: autor.

Para fixação e posicionamento dos corpos de prova foi instalado no fundo da cuba auxiliar, um suporte porta amostra e outro suporte para adaptação do bico *venturi* e posicionamento do eletrodo ferramenta fixado no cabeçote da EDM. Na tampa da cuba auxiliar foi adaptada a bomba centrífuga vertical de 120W de potência e vazão

de 50L/min, acionada manualmente assim que o volume da mistura de fluido dielétrico com abrasivo aproximava-se do volume máximo da cuba auxiliar, evitando que a água deionizada transbordasse da cuba auxiliar, conforme ilustrado na figura 30.

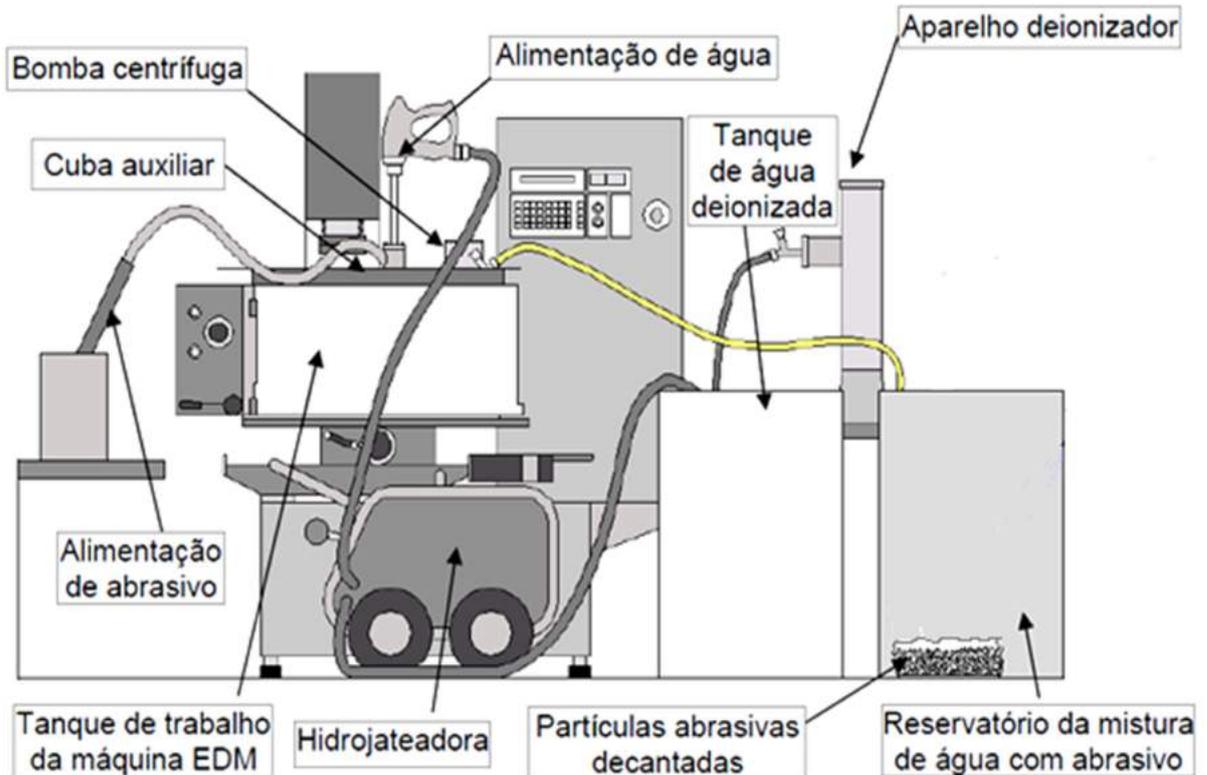
Figura 30 - Desenho esquemático do porta amostra, suporte para posicionamento do bico venturi, eletrodo ferramenta e bomba centrífuga.



Fonte: Silva (2013).

A mistura de água com abrasivos foi armazenada em tambores de plástico para decantação das partículas abrasivas. Este procedimento teve como objetivo auxiliar na reutilização das partículas abrasivas usadas no processo AJEDM sem descarte para a rede pública desta mistura. Após aplicação no processo de usinagem o abrasivo decantado foi separado da mistura manualmente e colocado em recipiente para secagem ao ar livre e avaliação posterior. A figura 31 ilustra o esquema do conjunto formado pelas máquinas, equipamentos e acessórios necessários para realização do processo de usinagem AJEDM.

Figura 31 - Desenho esquemático do conjunto formado pelas máquinas, equipamentos e os acessórios no processo AJEDM.

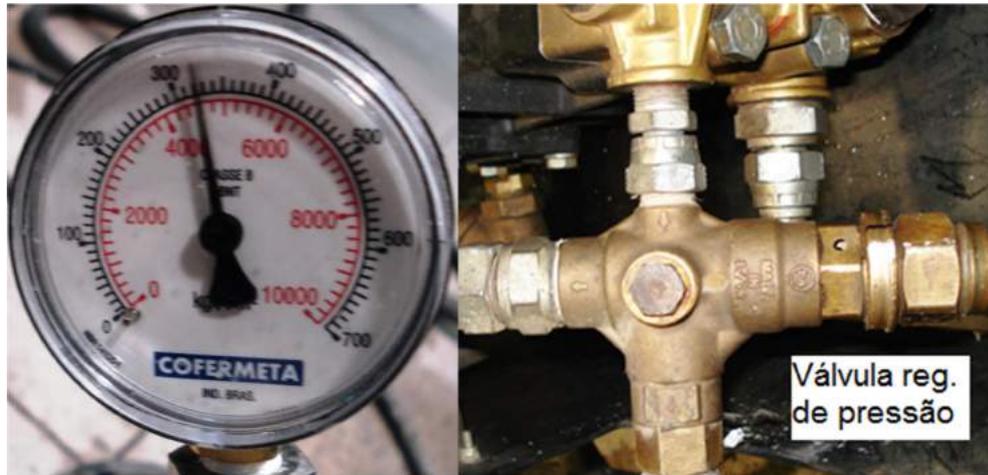


Fonte: Silva (2013 adaptada).

Cada teste teve duração de 5min e foram aplicadas pressões de 24, 26, 28 e 30MPa. Essas pressões foram reguladas mediante abertura ou fechamento da válvula reguladora de pressão localizada no interior da hidrojateadora e medida por meio do manômetro instalado na mangueira de saída da máquina hidrojateadora. A pressão do jato d'água abrasivo aumentava ao girar a válvula no sentido horário e vice-versa. No aperto máximo a pressão foi de 30MPa.

A regulagem foi aproximada até atingir a estabilidade na pressão desejada e em todas as regulagens a pressão do jato abrasivo foi medida com o eletrodo ferramenta próximo da superfície do corpo de prova para garantir os mesmos parâmetros de trabalho. A figura 32 ilustra o manômetro e a válvula reguladora de pressão.

Figura 32 - Manômetro e válvula reguladora de pressão da hidrojateadora.



Fonte: autor.

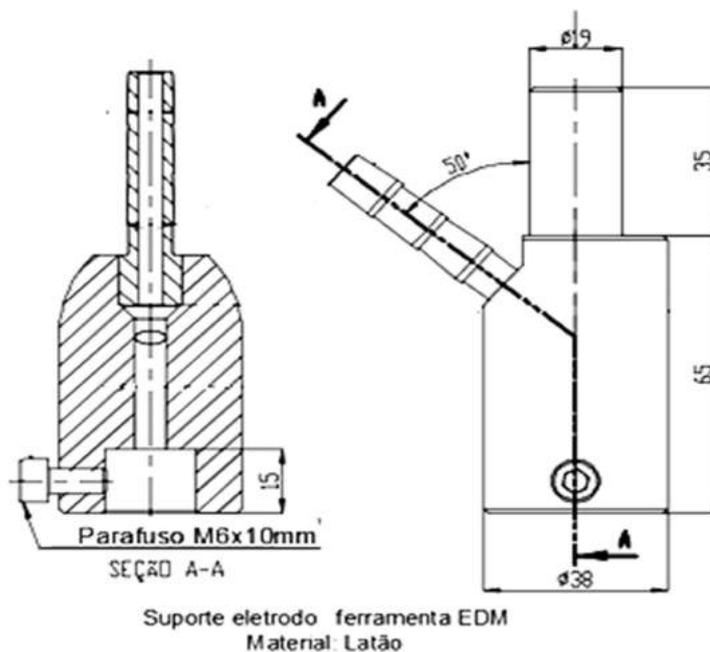
Os testes foram executados três vezes para cada condição de pressão (24, 26, 28 e 30MPa) somente para o eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico. A vazão de trabalho da hidrojateadora é de 22L/min na pressão de 30MPa, com consumo de 110L de água deionizada por teste. No caso deste trabalho o deionizador foi mantido trabalhando durante todos os testes, pois a capacidade de produção do deionizador de 50L/min era consumida em menos de 3min de teste. No caso do processo industrial, a água deionizada poderia ser recuperada por meio de filtros e recircularia infinitamente (apenas com reposição das perdas). Um exemplo desta aplicação é o processo de eletroerosão a fio (WEDM – *Wire Electrical Discharge Machining*) do fabricante Agie-Chamilles.

A condutividade da água deionizada foi verificada com condutímetro, mantendo-se inferior a 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em todos os testes. O consumo das partículas abrasivas foi medido com a pesagem antes e após cada teste no processo AJEDM.

Para uma avaliação do aumento da eficiência do processo AJEDM com o fluido dielétrico água deionizada, foram realizados testes com os materiais de eletrodo ferramenta (cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita) nas condições de baixa pressão (pressão normal do equipamento EDM) com água deionizada e sem abrasivos também com três testes de 5 minutos cada.

A realização dos ensaios em baixa pressão exigiu a confecção de suporte de fixação diferente para o eletrodo ferramenta que garantiu as mesmas condições de limpeza da cavidade trabalhada no ensaio em alta pressão (entrada do fluido dielétrico pelo centro do eletrodo ferramenta) conforme desenho esquemático na figura 33.

Figura 33 - Desenho esquemático do suporte para fixação do eletrodo ferramenta no processo EDM.



Fonte: autor.

### 3.4. Parâmetros do processo híbrido AJEDM

Os parâmetros de trabalho escolhidos para as séries de testes foram de desbaste severo. Foi aplicado o ajuste da corrente limite da máquina de EDM 40A. A corrente da descarga elétrica consumida no processo exerce influência direta na qualidade da superfície e no rendimento da operação. Melhorar a qualidade implica em corrente baixa e pequena quantidade de material removido com tempo de usinagem maior. Nesse caso, a qualidade da superfície dependerá das pressões de trabalho e da variação do material do eletrodo ferramenta (cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita), pois foi priorizada a taxa de remoção de material. Os demais parâmetros de EDM foram definidos no desenvolvimento dos testes iniciais do processo AJEDM. A tabela 6 apresenta esses parâmetros.

Tabela 6 - Parâmetros de ajuste do equipamento EDM.

Parâmetro	Valor	Unidade
Polaridade do eletrodo ferramenta (cobre/grafita)	Positiva	
Tensão	40 a 70	V
Corrente	40	A
T <sub>on</sub>	200	µs
T <sub>off</sub>	20	µs
DT (Duty Time)	91	%
Gap	1,1	-----
Afastamento periódico da ferramenta ou retração	2	-----
Velocidade do servo	3	-----

Fonte: autor.

O ajuste do DT (*Duty Time*) é o parâmetro que relaciona os tempos de pausa ( $t_{off}$ ) e duração do pulso ( $t_{on}$ ) seguindo a equação (1) e seu valor é expresso em porcentagem [%].

$$DT = \frac{t_{on}}{(t_{on} + t_{off})} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

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

Os parâmetros foram ajustados de acordo com o rendimento do erosímetro do equipamento EDM e visualizados no painel. A polaridade positiva foi definida para eletrodo ferramenta e polaridade negativa para o corpo de prova, de forma a conseguir maior taxa de remoção de material na peça e menor desgaste do eletrodo ferramenta.

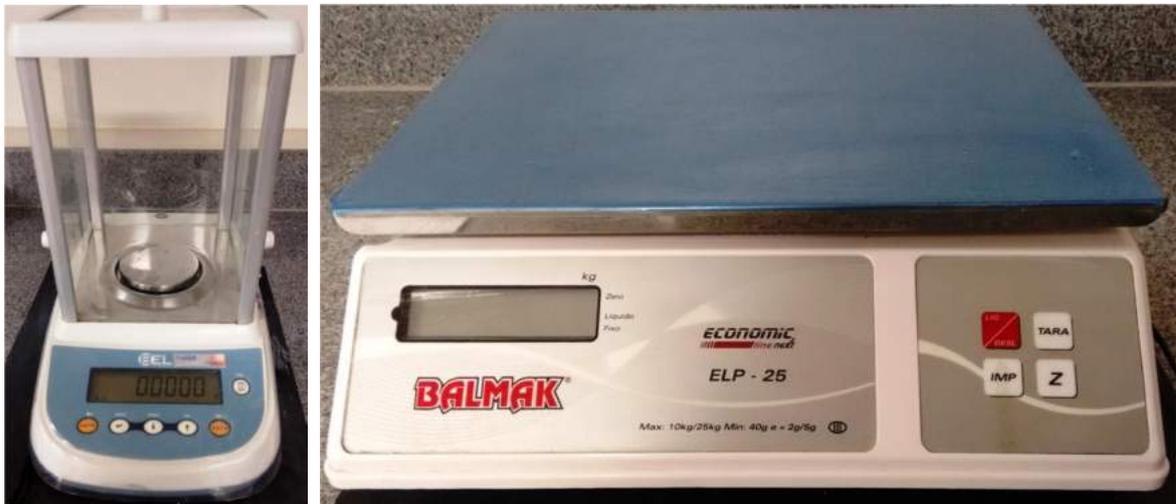
### 3.5. Parâmetros avaliados

Os parâmetros seguiram os critérios usados em trabalhos anteriores (SILVA, 2013; ARANTES, 2007) de forma que os resultados pudessem ser comparados e avaliados com bases estudadas.

### 3.5.1. Taxa de remoção de material

O parâmetro mais importante avaliado nos experimentos foi a taxa de remoção de material. Para esse controle o eletrodo peça foi pesado antes e após cada teste três vezes e a taxa de desgaste do eletrodo ferramenta da mesma forma. Foi utilizada balança eletrônica marca *Bel Engineering* modelo M162 com capacidade máxima de 120g e resolução de  $10^{-4}$ g para pesagem dos eletrodos ferramentas e corpos de prova e a balança marca *Balmak* mod. ELP 25 para pesagem do abrasivo. Ambas são ilustradas na figura 34.

Figura 34 - Balança eletrônica *Bel Engineering* e balança *Balmak*.



Fonte: autor.

O eletrodo ferramenta de grafita foi seco em forno durante 4 horas à temperatura de 300°C antes de cada pesagem, pois o mesmo é umedecido pelo fluido dielétrico após o teste (SILVA, 2013).

A variação de massa foi determinada pela diferença entre as massas inicial e final, obtida da equação (2) expressa em gramas [g].

$$\Delta_m = m_i - m_f \quad (2)$$

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

Para quantificar a taxa de remoção de material (TRM) foi utilizada a equação (3) expressa em milímetro cúbico por minuto [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ].

$$TRM = \frac{\Delta_m}{(0,00768).t} \quad (3)$$

onde:  $\Delta_m$  = variação de massa da peça [g],  $t$  = tempo de usinagem [min] e a constante  $0,00768 \text{ g/mm}^3$  corresponde ao peso específico do aço AISI M2. Para quantificar a taxa de desgaste (TD) do eletrodo ferramenta foi utilizada a equação (4) expressa em milímetro cúbico por minuto [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ].

$$TD = \frac{\Delta_m}{\rho.t} \quad (4)$$

Onde:  $\Delta_m$  = variação de massa da ferramenta [g],  $t$  = tempo de usinagem [min] e  $\rho$  [ $\text{g/mm}^3$ ] corresponde ao peso específico do material do eletrodo ferramenta que para o cobre eletrolítico  $\rho = 0,008920 \text{ g/mm}^3$ , para o cobre cromo  $\rho = 0,008890 \text{ g/mm}^3$  e para a grafita  $\rho = 0,001672 \text{ g/mm}^3$ .

A equação (5) foi usada para determinar o desgaste volumétrico relativo (DVR), que é a relação entre taxa de desgaste e taxa de remoção de material expresso em porcentagem [%].

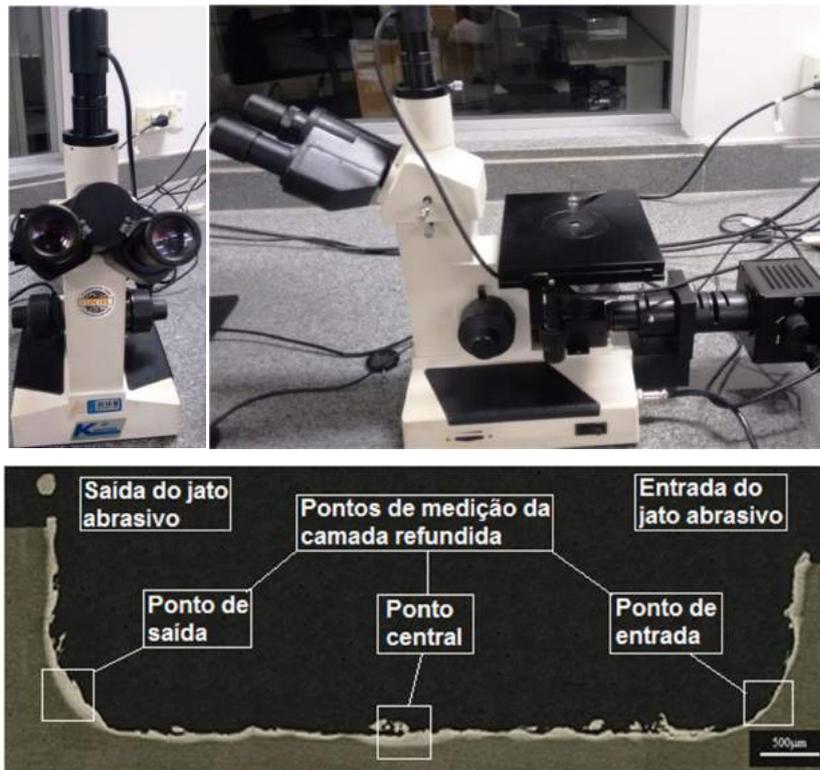
$$DVR = \frac{TD}{TRM} \cdot 100 \quad (5)$$

### 3.5.2. Espessura da camada refundida

As medições da espessura da camada refundida foram feitas três vezes em cada ponto de maior espessura, sendo o primeiro ponto na curvatura de entrada do jato abrasivo, o segundo ponto no plano médio da cavidade usinada e o terceiro ponto na curvatura de saída do jato abrasivo. Com esse critério (ponto de maior espessura) procurou-se mostrar as espessuras máximas para possíveis comparações futuras. Pois se o critério fosse pelo mínimo, não refletiria a realidade, uma vez que sempre há pontos onde a camada refundida foi destacada, e por isso, sem valores para mensurar.

Foi utilizado o perfil retirado por meio de microscópio óptico marca *Kontrol* modelo IM-713 com aumento de 100 vezes. Na medição foi utilizado também o *software* de imagem do equipamento que é ilustrado na figura 35.

Figura 35 - Microscópio óptico marca *Kontrol* e perfil com pontos de medição da camada refundida.

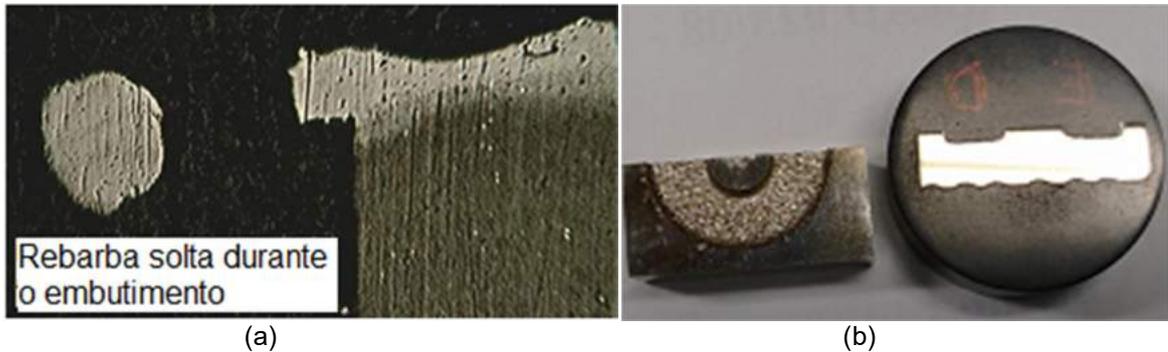


Fonte: autor.

Na preparação das amostras para microscópio óptico, uma característica importante analisada foi à rebarba formada na saída da cavidade do corpo de prova gerada pela camada refundida retirada em alta pressão. Para garantir esta visualização dois aspectos foram observados: o primeiro foi o corte do perfil da amostra e o segundo o embutimento da amostra.

Segundo Silva (2013) para evitar a quebra da rebarba (Figura 36(a)) a amostra deve ser cortada antes do ensaio para que a secção transversal mantenha a rebarba intacta. Assim a solução foi usar o corpo de prova bipartido nas dimensões de 12,7mm por 25mm de comprimento, figura 36(b).

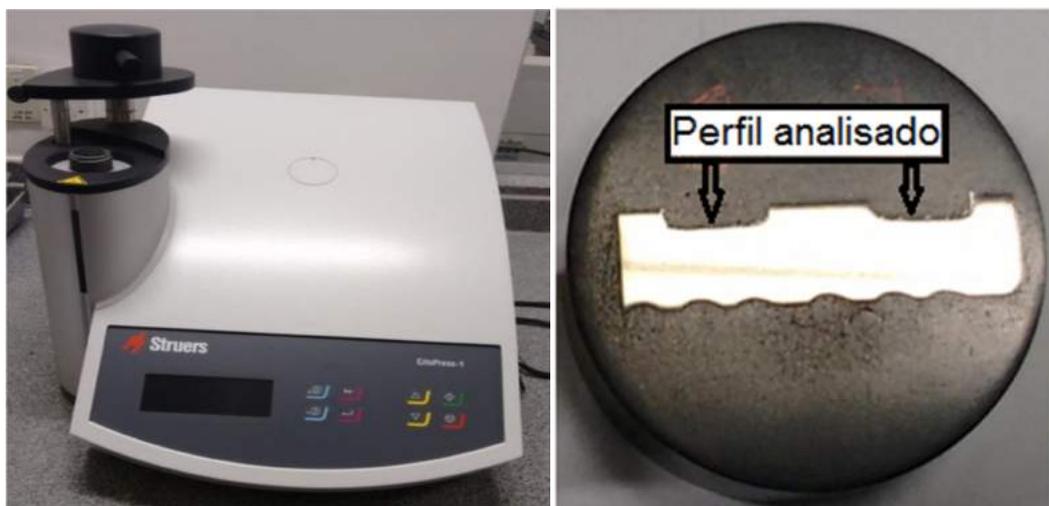
Figura 36 - Microscopia óptica destaca rebarba solta durante o embutimento em (a) e detalhe transversal do eletrodo peça antes e após embutimento em (b).



Fonte: autor.

A preparação das amostras para MEV e microscopia óptica foi constituída de corte das amostras no Discoton com disco abrasivo e refrigeração a água. O embutimento foi realizado na embutidora marca *Struers* modelo *Cito-Press1* com tempo de 8 minutos para cada embutimento. Foi utilizada resina epóxi termo-polimerizado carregada com minerais, com baixa contração e boa aderência. Além disso, por possuir dureza relativamente mais elevada que as resinas comuns, ela é recomendada para a preservação de bordas e manutenção de planicidade evitando que a camada refundida se desprenda durante o lixamento. A embutidora e corpo de prova são mostrados na figura 37.

Figura 37 - Embutidora automática *Struers* e amostra embutida.



Fonte: autor.

As amostras embutidas foram submetidas a processo de lixamento em politriz utilizando lixas d'água 220, 320, 400, 600, 1200 e 1600, respectivamente. Após o lixamento, as amostras passaram por processo de polimento utilizando o primeiro pano com pasta diamantada de 15 $\mu$ m e o segundo pano com pasta diamantada de 3 $\mu$ m. Para aços ferramenta, o ataque químico deve ser com solução de Nital a 2%. Concentrações muito fortes aumentam a velocidade do ataque dificultando o controle.

### 3.5.3. Integridade Superficial

Foi utilizado microscópio eletrônico de varredura marca *Shimadzu* modelo SSX 550 para visualização da morfologia das superfícies usinadas nos corpos de prova do processo AJEDM (variando-se a pressão entre 24 a 30MPa) e do processo EDM (1MPa). Foram feitas imagens com aumento de 50x, 100x e 200x. A tabela 7 apresenta os parâmetros regulados no MEV.

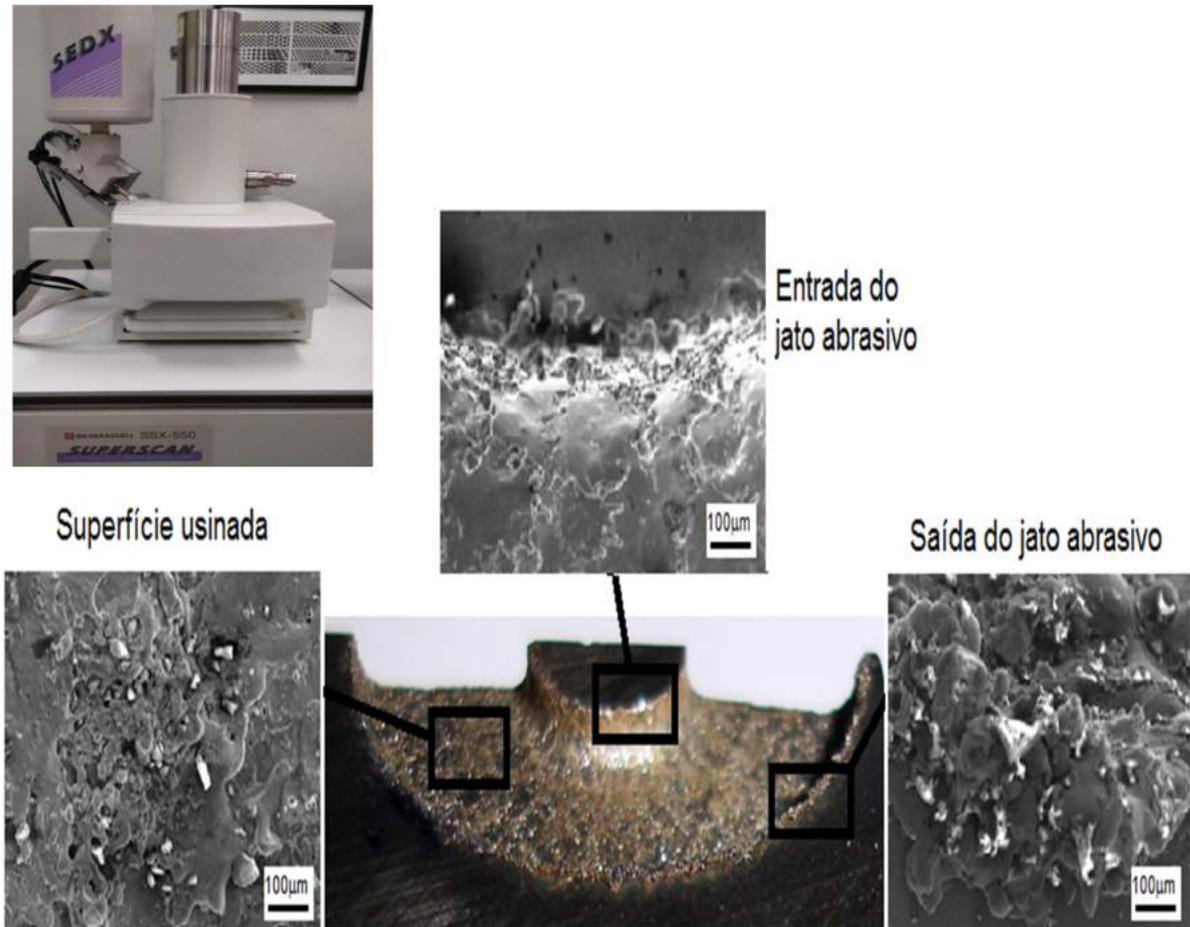
Tabela 7 - Parâmetros de ajuste do equipamento MEV.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Tensão (AccV)	15	<b>kV</b>
Sonda (Probe)	4	<b><math>\mu</math>m</b>
Ampliação (Mag.)	50/100/200	<b>vezes</b>
Distância de trabalho (WD)	16	<b><math>\mu</math>m</b>
Detecção (Det.)	SE	

Fonte: autor.

O equipamento microscópio eletrônico de varredura (MEV) e a posição em que as imagens foram realizadas nos corpos de prova são ilustrados na figura 38, identificando a entrada do jato abrasivo, superfície usinada e saída do jato abrasivo.

Figura 38 - Microscópio eletrônico de varredura *Shimadzu* modelo SSX 550 e imagem identificando as superfícies de entrada, plano usinado e saída do jato abrasivo no corpo de prova.

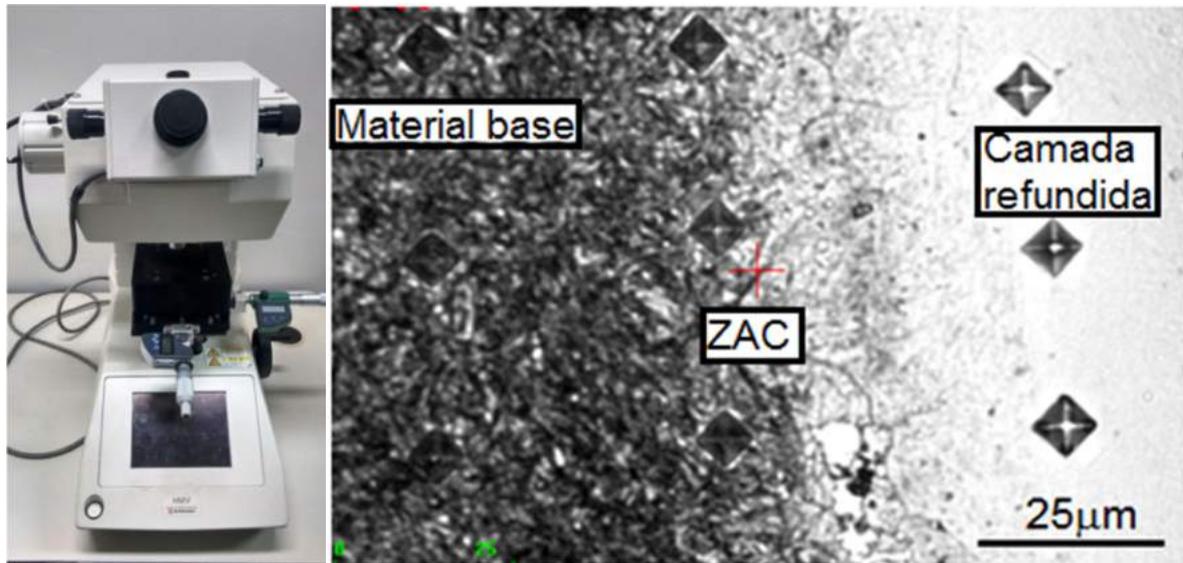


Fonte: autor.

#### 3.5.4. Perfil de microdureza

A microdureza da camada refundida, zona afetada pelo calor (ZAC) e material base foram determinadas com o auxílio de microdurômetro marca *Shimadzu* modelo HMV-2TE. Foram realizadas três medições de microdureza Vickers com carga de 25gf e tempo de 15s em cada região das amostras usinadas no processo AJEDM com a pressão de 30MPa e processo EDM com pressão de 1MPa. O equipamento e as regiões analisadas são ilustrados na figura 39.

Figura 39 - Microdurômetro *Shimadzu* e regiões analisadas.



Fonte: autor.

### 3.5.5. Integridade do abrasivo

O abrasivo usado nos testes a 30MPa do processo de usinagem AJEDM foi comparado com abrasivo novo por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e granulometria a laser no equipamento marca CILAS modelo 1090. Para o procedimento de microscopia eletrônica de varredura (MEV) as amostras tiveram que ser metalizadas antes da visualização.

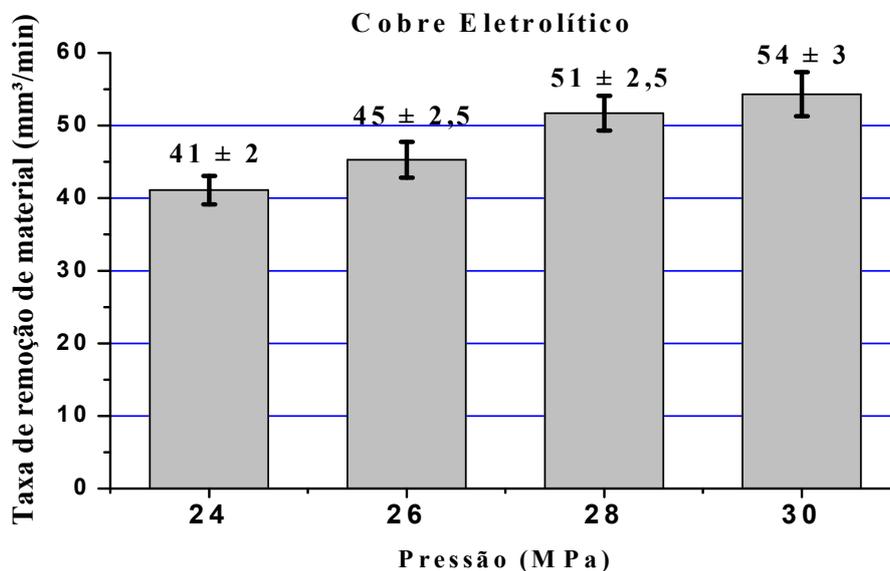
## 4. Resultados e discussão

Esse capítulo apresenta os resultados obtidos na usinagem de peças pelo processo AJEDM e EDM. As variáveis avaliadas são: taxa de remoção de material, taxa de desgaste, desvio volumétrico relativo, espessura da camada refundida, microdureza e superfície usinada com eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico, cobre-cromo e grafita, avaliados nos mesmos parâmetros de regulagem do equipamento EDM.

### 4.1. Influência da variação de pressão do fluido dielétrico no processo AJEDM

A variação da pressão nos ensaios foi realizada somente nos eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico. Os resultados de taxa de remoção de material, taxa de desgaste e desvio volumétrico relativo são apresentados nas figuras 40 a 42, respectivamente, demonstrando o desempenho desse material no processo AJEDM.

Figura 40 - Evolução da taxa de remoção de material no processo AJEDM com eletrodo ferramenta cobre eletrolítico no aço AISI M2.



Fonte: autor.

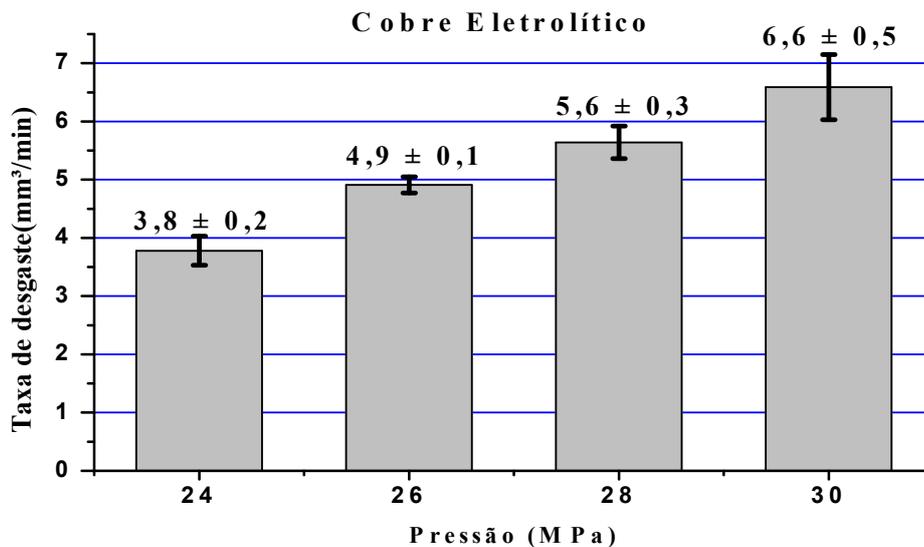
A variação da pressão exerce influência direta na taxa de remoção de material, comprovando resultados obtidos por Silva (2013) onde os valores à 24MPa (limite da pesquisa) são muito próximos aos obtidos nesse estudo. É possível avaliar que o

aumento da taxa de remoção de material é bem linear e a dispersão dos valores ficou abaixo de 5%, demonstrando que o processo está controlado.

Segundo Arantes (2007) quanto maior a pressão maior será a remoção das partículas erodidas, o que aumenta a velocidade de usinagem. Este aumento da pressão tornou mais efetiva a ação da limpeza das micropartículas fundidas e ressolidificadas.

A figura 41 avalia os resultados de taxa de desgaste do cobre eletrolítico como material do eletrodo ferramenta com a variação da pressão de trabalho entre 24 e 30MPa com intervalos de 2MPa do processo híbrido AJEDM.

Figura 41 - Evolução da taxa de desgaste no processo AJEDM com eletrodo ferramenta cobre eletrolítico.



Fonte: autor.

A variação na taxa de desgaste do eletrodo ferramenta cobre eletrolítico demonstra que a pressão do jato d'água abrasivo é um dos fatores que influenciam no desgaste do eletrodo.

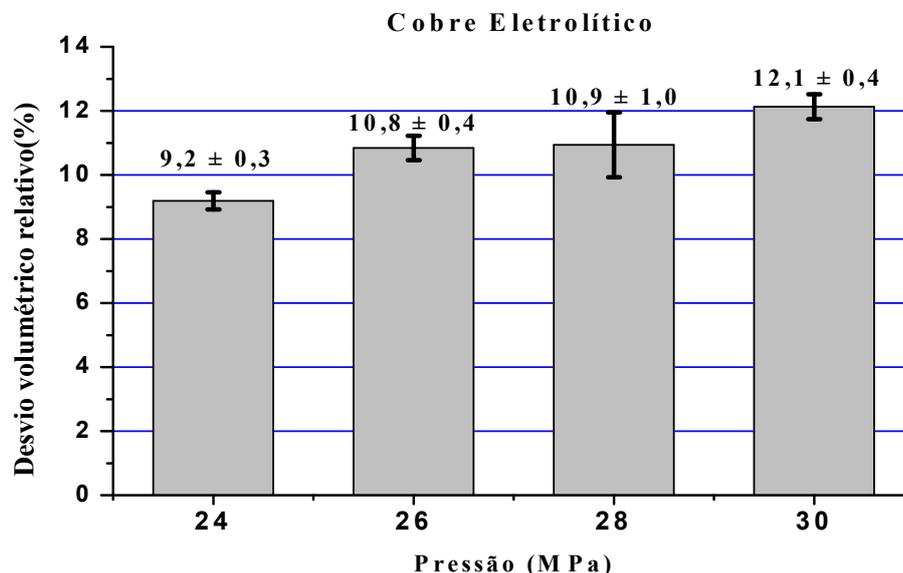
Arantes (2007) estudou o efeito das partículas abrasivas no processo AJEDM com pressão de trabalho de 10MPa e concluiu que essa pressão é insuficiente para

provocar erosão sem o auxílio das descargas elétricas. Verificou-se que no caso de pressões superiores a 10MPa e com uso de descargas elétricas há sim uma tendência ao desgaste mais acentuado, resultando em valores 75% maiores entre o processo EDM e AJEDM.

A adição de partículas abrasivas ao processo AJEDM modifica a densidade do fluido dielétrico, aumenta a pressão no arco de plasma, melhora a dispersão das descargas e aumenta a energia de impacto do fluido dielétrico contra a superfície, melhorando a velocidade de usinagem e, conseqüentemente, a taxa de remoção de material aumenta (ARANTES, 2007).

A figura 42 possibilita avaliar os resultados do desvio volumétrico relativo do cobre eletrolítico como material do eletrodo ferramenta com a variação da pressão de trabalho entre 24 e 30MPa com intervalos de 2MPa do processo híbrido AJEDM.

Figura 42 - Evolução do desvio volumétrico relativo no processo AJEDM com eletrodo ferramenta cobre eletrolítico.



Fonte: autor.

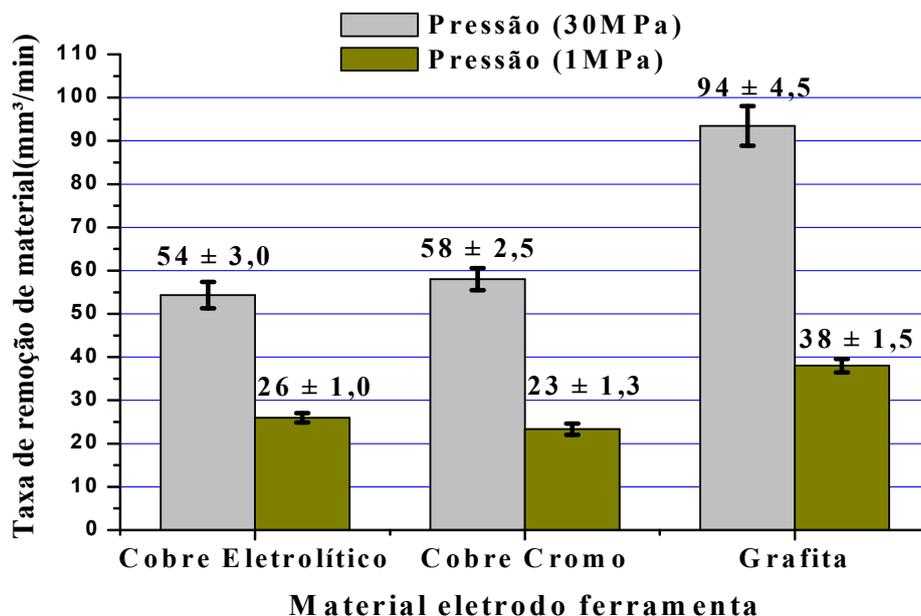
O gráfico do desvio volumétrico relativo mostra que o aumento da pressão exerce influência sobre o desgaste relativo de modo a aumentá-lo à medida que a pressão aumenta, mas com valores de 9 a 12% ainda é viável o uso do processo híbrido AJEDM para operações de desbaste. Nas pressões trabalhadas não se pode afirmar

estatisticamente aumento considerável o que se pode concluir é que há tendência de aumento no desvio volumétrico relativo.

#### 4.2. Análise dos processos EDM e AJEDM com diferentes materiais

Para mensurar o real ganho proporcionado pelo processo híbrido AJEDM nos parâmetros analisados: taxa de remoção de material, taxa de desgaste e desvio volumétrico relativo foram realizados gráficos comparativos do processo EDM e AJEDM. Os resultados da taxa de remoção de material, taxa de desgaste e desvio volumétrico relativo são apresentados nas figuras 43 a 45 respectivamente, mostrando elevado desempenho do processo híbrido AJEDM em relação ao processo EDM nas mesmas condições: corpo de prova em AISI M2, fluido dielétrico água deionizada e parâmetros de regulagem do equipamento EDM idênticos.

Figura 43 - Evolução da taxa de remoção de material no processo AJEDM (30MPa) comparado ao processo EDM (1MPa) variando o material do eletrodo ferramenta (cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita).



Fonte: autor.

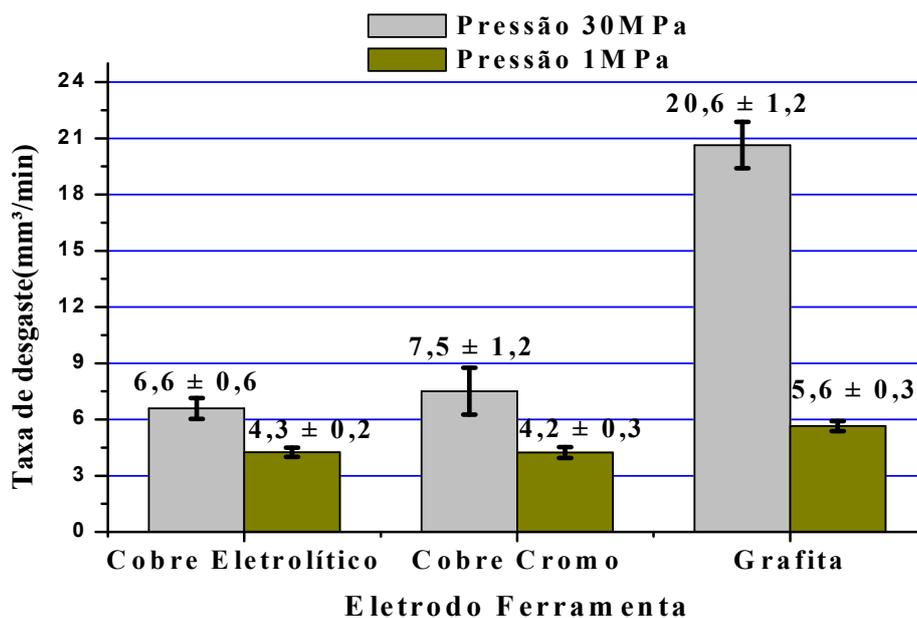
O processo híbrido AJEDM configurado com os mesmos parâmetros do processo EDM teve ganho superior a 100% em todos os materiais de eletrodo ferramenta

avaliados, com destaque para a grafita. Entre o cobre eletrolítico e cobre cromo não há grande diferença no rendimento quando analisado em alta pressão (30MPa) e baixa pressão (1MPa), separadamente, mantendo-se dentro do limite de dispersão. Segundo Silva (2013) entre o cobre e a grafita como eletrodos ferramenta, a grafita supera muito o desempenho do cobre no processo de desgaste, cabendo a análise da taxa de desgaste entre os dois para melhor avaliar os resultados e aplicabilidade do processo híbrido AJEDM na grafita.

As principais propriedades que influenciam o desempenho dos materiais para eletrodo ferramenta continuam sendo os parâmetros tradicionais de seleção, ou seja, o ponto de fusão elevado (grafita) e alta condutibilidade elétrica (cobre) (MCGEOUGH, 1988).

Os resultados da taxa de desgaste obtidos na usinagem com água deionizada como fluido dielétrico, abrasivo óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de 600mesh, nas pressões de 30MPa (limite da hidrojateadora usado nesta pesquisa) e pressão de trabalho normal do equipamento EDM (1MPa), variando-se o material do eletrodo ferramenta, cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita, são apresentados na figura 44.

Figura 44 - Evolução da taxa de desgaste no processo AJEDM com pressão de 30MPa comparado ao processo EDM (1MPa).

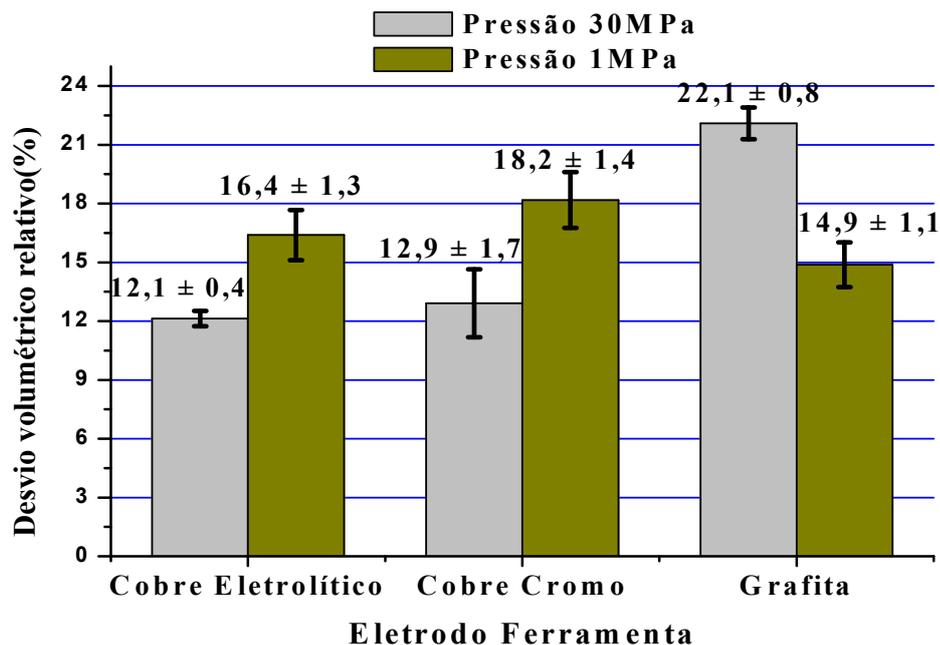


Fonte: autor.

Nos materiais analisados para eletrodo ferramenta a taxa de desgaste seguiu a mesma tendência da taxa de remoção de material sendo muito próxima no cobre eletrolítico em relação ao cobre cromo, tanto em alta como em baixa pressão (analisados separadamente) e muito superior na grafita quando se compara à baixa e alta pressão. A grafita por ser mais frágil que o cobre sofre maior ação do impacto do jato abrasivo.

Segundo McGeough (1988) cobre e grafita tem desgaste parecido no processo EDM, justificando os resultados em baixa pressão e sendo extremamente diferentes no processo AJEDM. Os resultados dos desvios volumétricos relativos obtidos na usinagem híbrida AJEDM e EDM estão ilustrados no gráfico da figura 45.

Figura 45 - Variação do desvio volumétrico relativo no processo AJEDM (30MPa) comparado ao processo EDM (1MPa).



Fonte: autor.

O desvio volumétrico relativo em baixa pressão teve pouca variação nos valores nominais, mas muito elevado se comparado a pressão de 30MPa. Na alta pressão o desgaste do eletrodo ferramenta é compensado pela velocidade de usinagem, pois melhora a taxa de remoção de material. Já o eletrodo ferramenta de grafita sofre desgaste erosivo superior aos demais materiais, este desgaste é explicado por sua

fragilidade, e o valor de 22,1% na pressão de 30MPa ainda é aceitável, pois o cobre mesmo em baixa pressão (1MPa) também tem desvio volumétrico relativo próximo com valores entre 16 e 18,2%. A análise anterior é viabilizada por se tratar de operação de desbaste, sendo necessária a operação de acabamento final para corrigir a cavidade usinada.

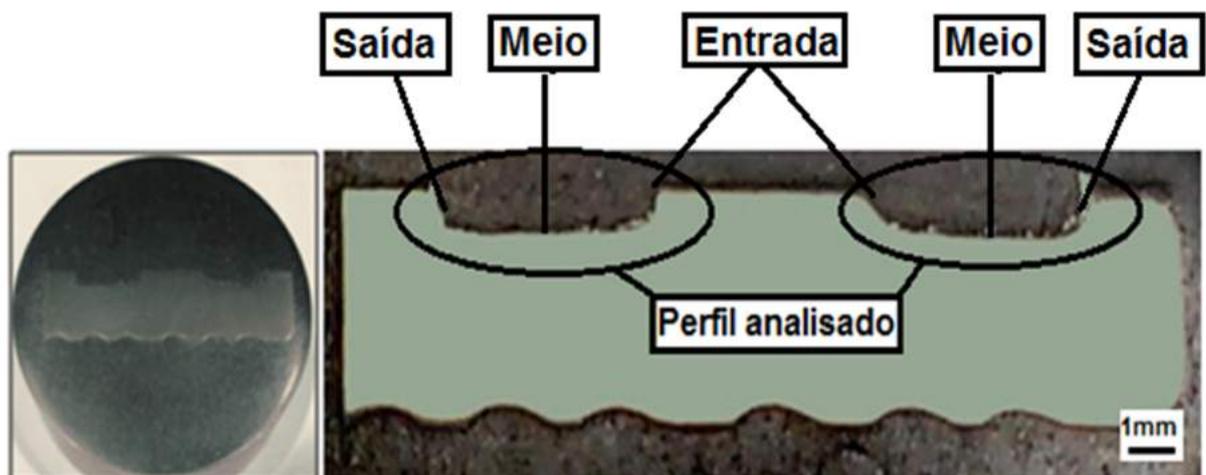
### 4.3. Avaliação da qualidade da superfície usinada

A qualidade da superfície foi verificada com a análise metalográfica, MEV e microdureza Vickers.

#### 4.3.1. Análise da camada refundida

Para análise do perfil da cavidade usinada as amostras foram preparadas conforme figura 46 e visualizadas por microscopia óptica. Em destaque a região da amostra que é visualizada nas próximas figuras.

Figura 46 - Imagem da amostra preparada para microscopia óptica.

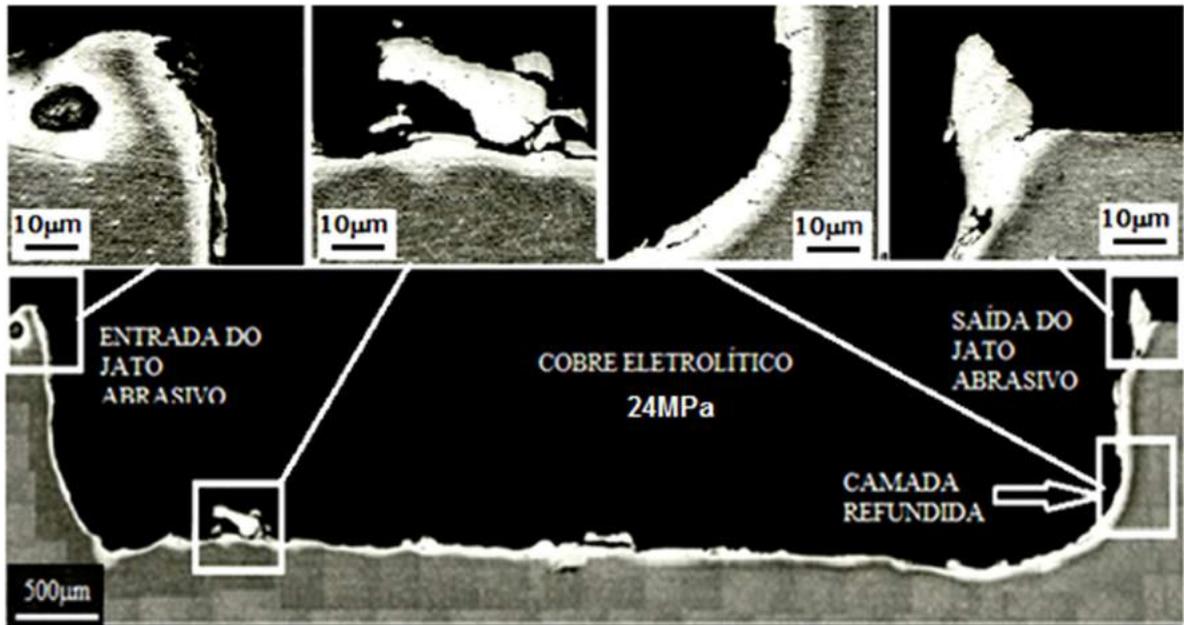


Fonte: autor.

A sequência de imagens mostra a seção transversal dividida em quatro partes, o que significa que apenas um lado da amostra embutida é destacado nas imagens. A cavidade usinada pelo processo híbrido AJEDM com eletrodo ferramenta de cobre

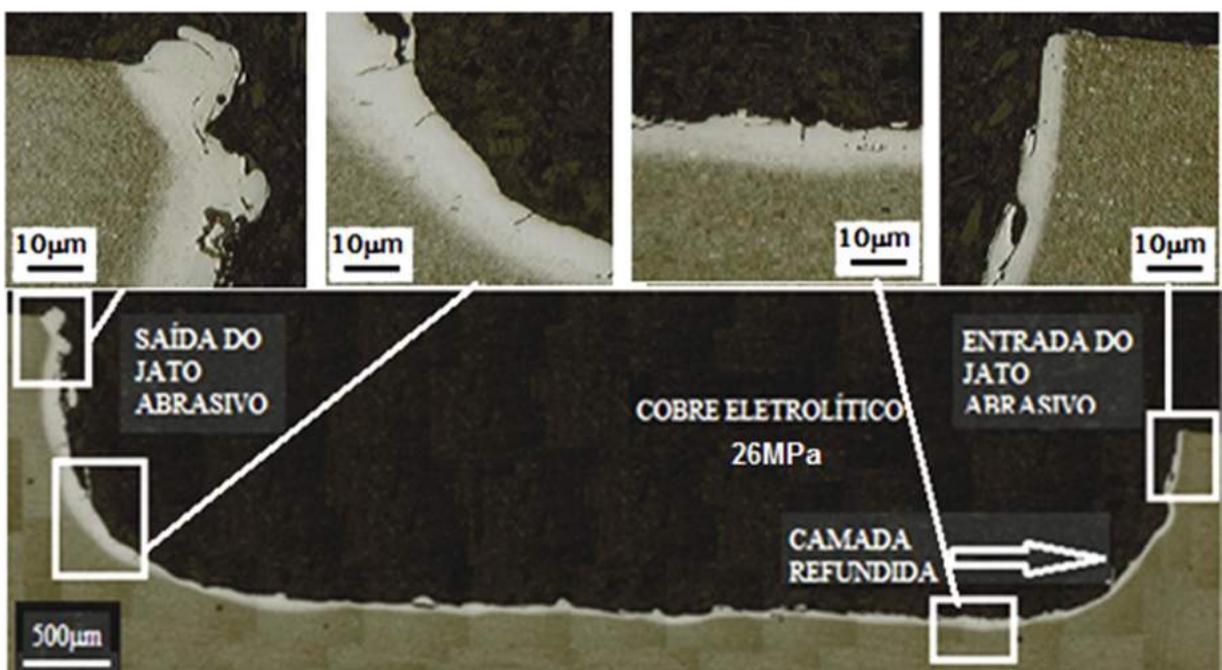
eletrolítico e jato abrasivo nas pressões de 24, 26, 28 e 30MPa são ilustradas nas figuras 47 a 50, respectivamente.

Figura 47 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo AJEDM na pressão de 24MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e granulometria de 600mesh.



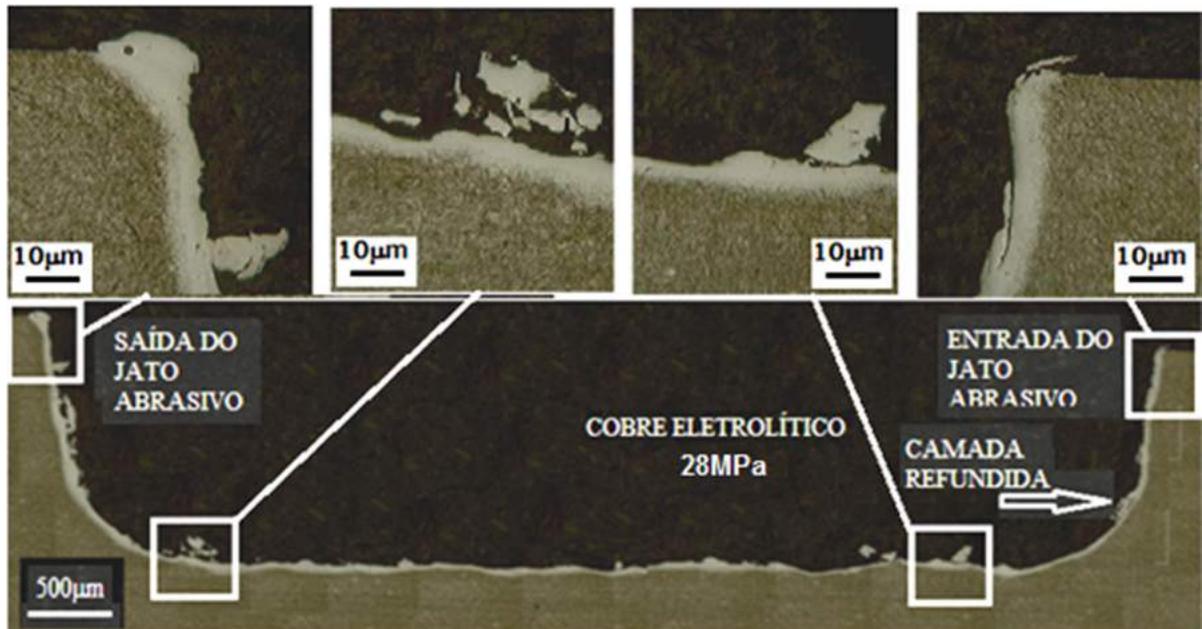
Fonte: autor.

Figura 48 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo AJEDM na pressão de 26MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e granulometria de 600mesh.



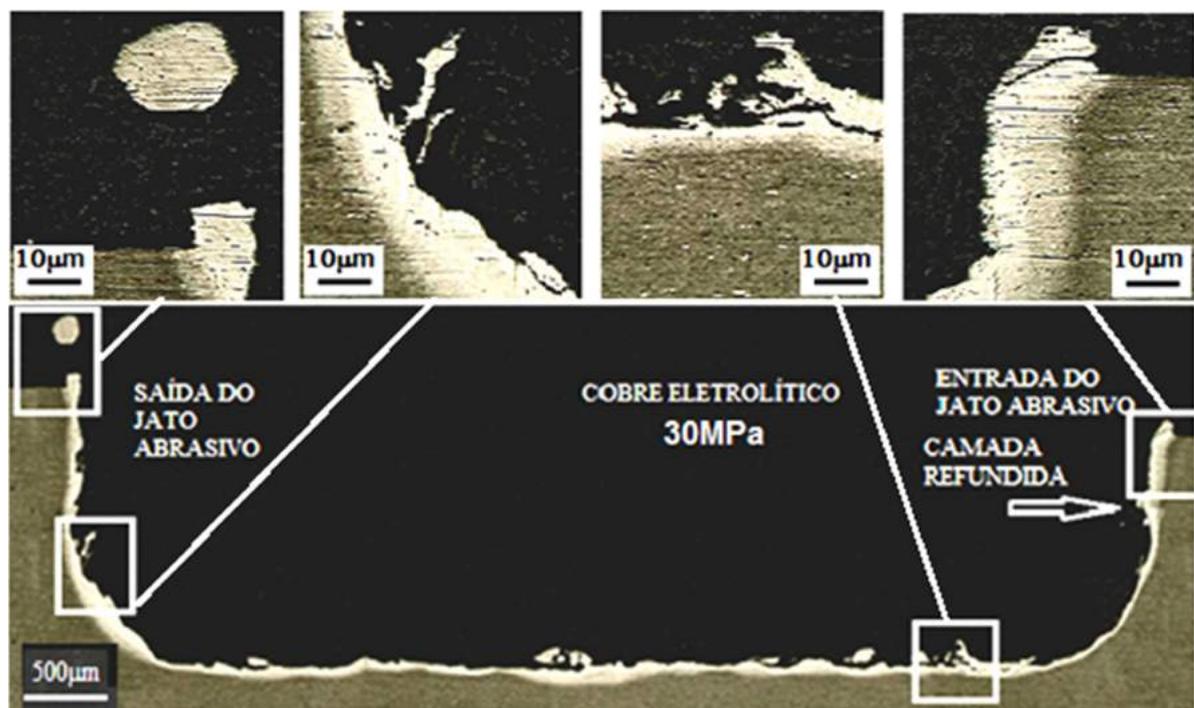
Fonte: autor.

Figura 49 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo AJEDM na pressão de 28MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e granulometria de 600mesh.



Fonte: autor.

Figura 50 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo AJEDM na pressão de 30MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e granulometria de 600mesh.



Fonte: autor.

Nas figuras 47 a 50, as bordas de entrada da cavidade, mesmo com o jato abrasivo forçando o fluxo para baixo, a camada refundida ainda sofre fluxo inverso (vórtice) e forma rebarba na borda de entrada da peça usinada (mais acentuado na figura 50). Isso é resultado do grande volume de fluido dielétrico que chega pelo centro do eletrodo ferramenta ( $365\text{cm}^3/\text{s}$ ), tendo que passar por espaço reduzido (*gap*) para atravessar toda a cavidade.

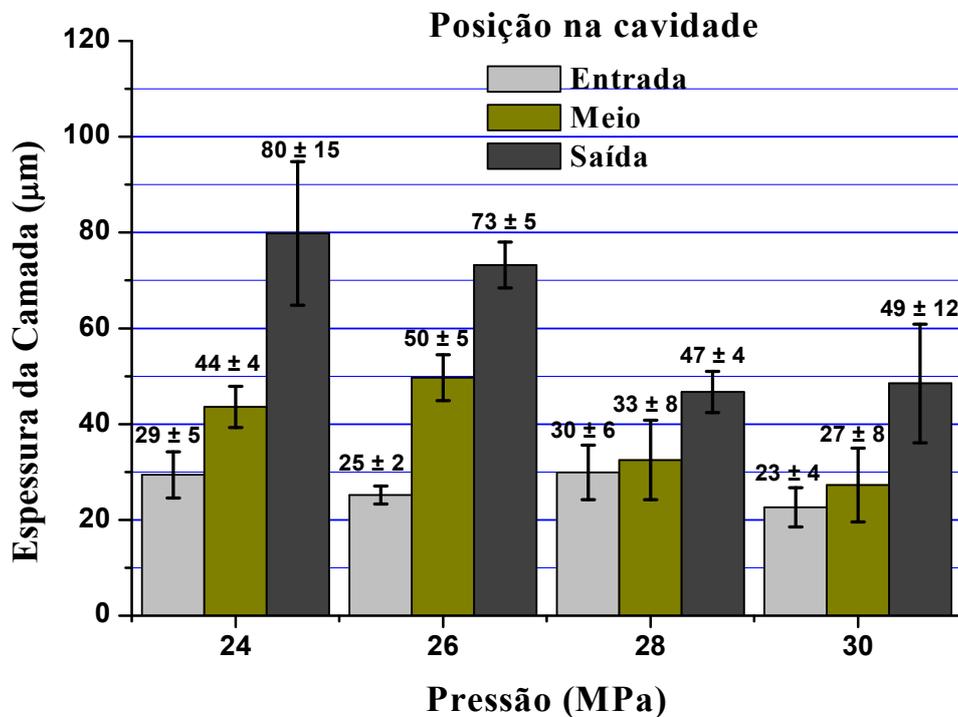
A superfície central da cavidade usinada das figuras 47 a 50 apresentam espessura maior da camada refundida (destaque para a figura 47) que chega a  $50\mu\text{m} \pm 5$  de espessura média.

A borda da superfície de saída do jato abrasivo mostra maior quantidade de rebarbas, pois a camada refundida arrastada pelo jato abrasivo em alta pressão acaba por ficar aglomerada em parte neste ponto da peça.

Observa-se nas figuras 47 a 50 usinadas pelo processo AJEDM com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico que o jato abrasivo provoca retirada quase total da camada refundida na curvatura de entrada da cavidade (mais acentuado na figura 47). Porém, ao longo da superfície usinada há alguns pontos de acúmulo da mesma, principalmente na curvatura de saída da cavidade, onde ocorrem as maiores espessuras da camada refundida chegando a valores médios de  $80\mu\text{m} \pm 15$ . Nota-se claramente a rebarba na saída do jato abrasivo, evidenciando o sentido do fluxo. Da mesma forma, rebarbas no interior da cavidade tem sua forma alongada no sentido do fluxo do jato, demonstrando o efeito da pressão no arrancamento da camada refundida.

O gráfico da figura 51 ilustra os valores médios da camada refundida ao longo da cavidade usinada pelo processo AJEDM, com eletrodo de cobre eletrolítico, fluido dielétrico água deionizada e abrasivo óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com granulometria de 600mesh variando-se a pressão de 24 a 30MPa.

Figura 51 - Espessura da camada refundida no processo AJEDM nas pressões de 24 a 30MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e granulometria de 600mesh.



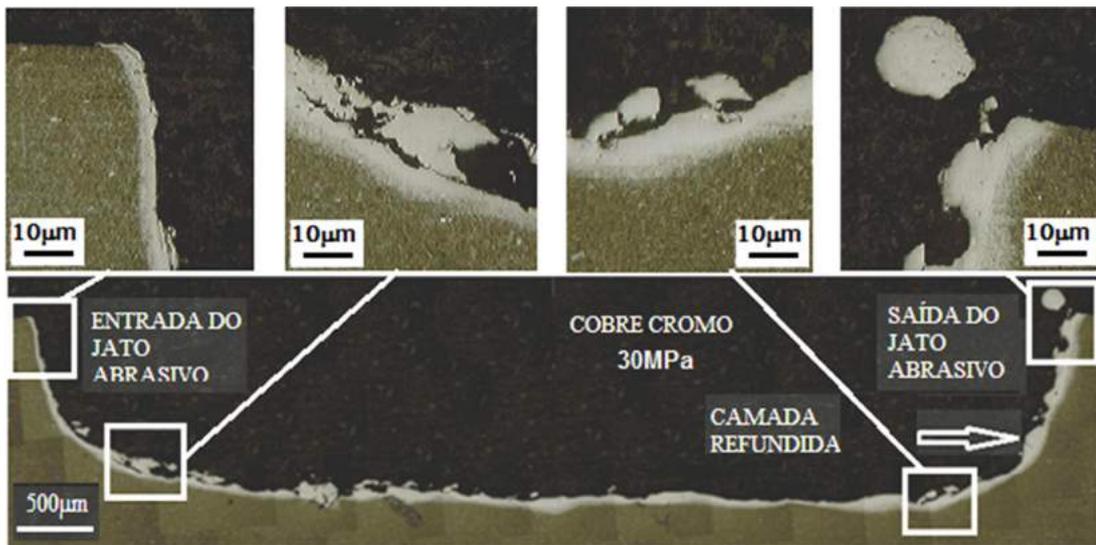
Fonte: autor.

A figura 51 demonstra que, independente da pressão, a espessura aumenta da entrada para a saída. Nota-se que a dispersão dos valores é alta, principalmente na curvatura final da cavidade, onde fluxo do jato abrasivo juntamente com o material fundido encontra resistência para sair, provocando maior acúmulo da camada refundida.

Com a variação da pressão do jato abrasivo ocorre a diminuição da camada refundida em todas as regiões analisadas, porém com valores que estatisticamente estão dentro da margem de desvio. Segundo Silva (2013) a grande dispersão pode ser explicada pela heterogeneidade da descarga elétrica que no processo AJEDM com a adição de partículas de alumínio provoca maior expansão do canal de plasma, distribuindo a energia da descarga elétrica sobre maior área da superfície da peça. Logo, a adição de pós ao fluido dielétrico altera o mecanismo de remoção de material na superfície usinada por AJEDM (KLOCKE *et al.*, 2004).

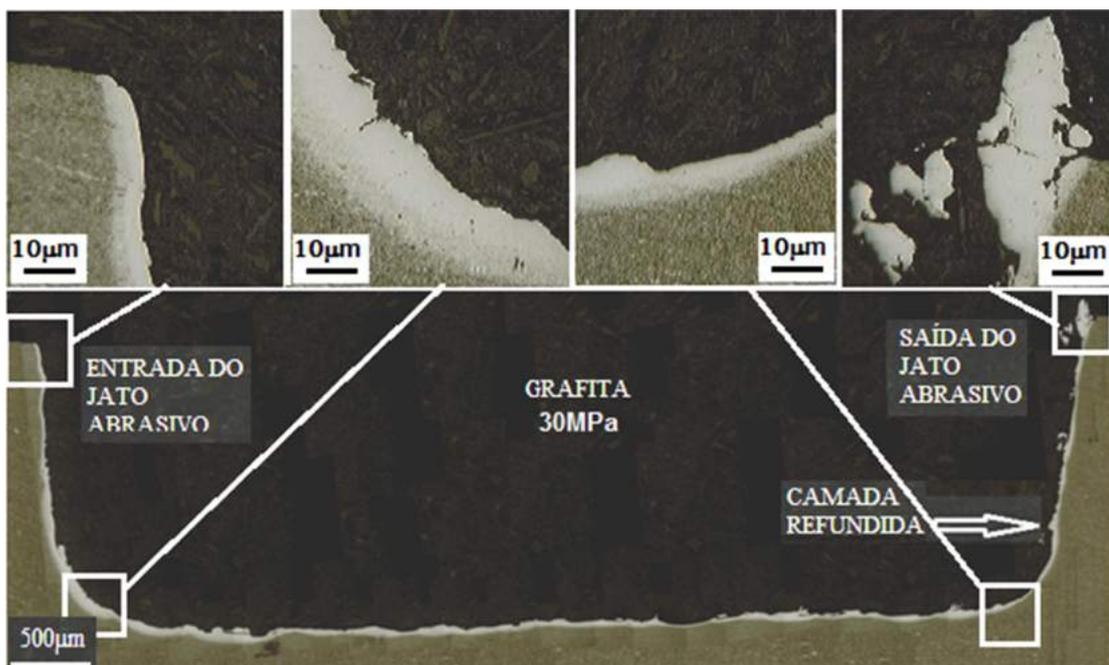
As imagens das figuras 52 e 53 ilustram a seção transversal obtida nas amostras usinadas no processo AJEDM com eletrodo ferramenta de cobre cromo e grafita respectivamente, com jato abrasivo na pressão de 30MPa.

Figura 52 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo AJEDM na pressão de 30MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e eletrodo de cobre cromo.



Fonte: autor.

Figura 53 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo AJEDM na pressão de 30MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e eletrodo de grafita.



Fonte: autor.

Nas figuras 52 e 53 acontecem as mesmas observações destacadas nas figuras 47 a 50. A diferença está na profundidade das cavidades, que na usinagem com eletrodo ferramenta de grafita é maior, reforçando o que foi mostrado nos gráficos de taxa de remoção de material: a grafita como eletrodo ferramenta tem desempenho superior ao cobre e suas ligas na remoção de material (MCGEOUGH, 1988).

Outro detalhe entre os dois materiais é a inclinação da parede de entrada e saída da cavidade usinada, no cobre cromo o ângulo de inclinação é menor que na grafita em relação à face da peça. Isso pode ser explicado também pela taxa de remoção de material: quanto maior a taxa de remoção de material, menor é a agressão às bordas da cavidade e mais próximo de  $90^\circ$  é o ângulo do fluxo abrasivo para entrar e sair da mesma. A figura 54 ilustra este detalhe na parede de entrada e saída da cavidade.

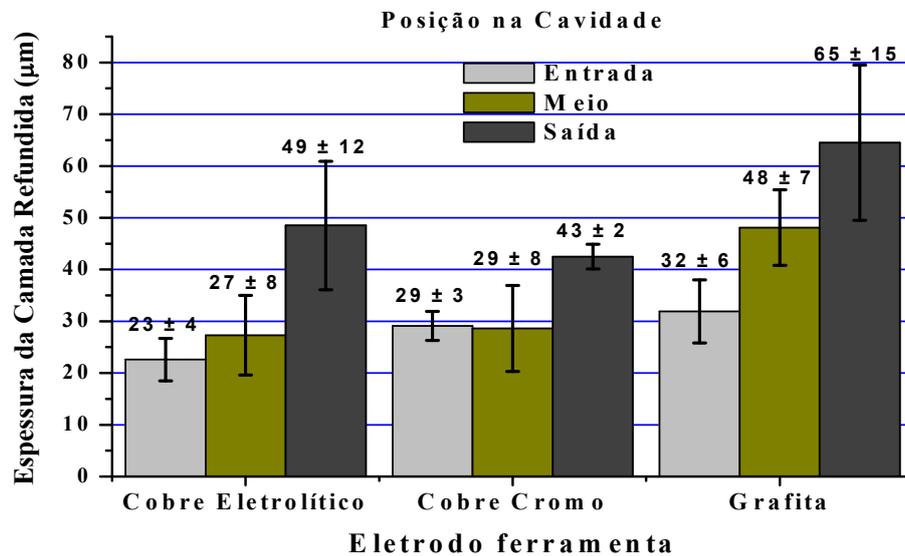
Figura 54 - Ângulo das paredes de entrada e saída das cavidades usinadas pelo processo AJEDM (30MPa) com eletrodo ferramenta de cobre cromo e grafita.



Fonte: autor.

A figura 55 ilustra as medidas das espessuras de camada refundida entre os diferentes materiais usados como eletrodo ferramenta: cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita na pressão de 30MPa.

Figura 55 - Espessura da camada refundida no processo AJEDM variando o material do eletrodo ferramenta na pressão de 30MPa com abrasivo óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e granulometria de 600mesh.



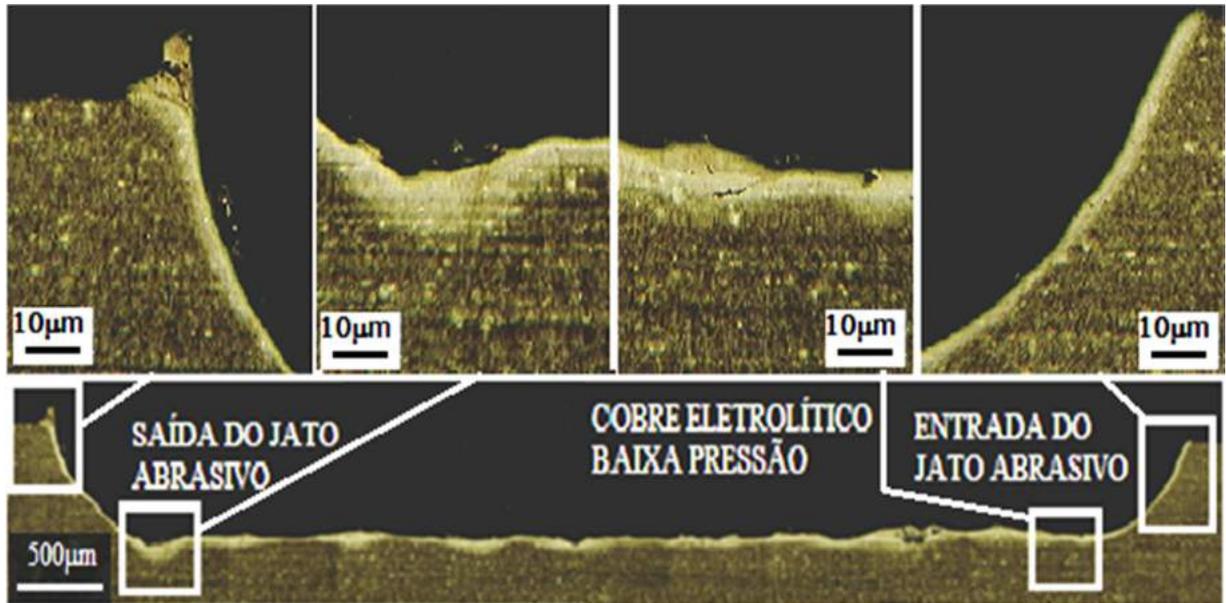
Fonte: autor.

Analisando a figura 55 observa-se que a grafita possui maior espessura de camada refundida nas regiões de entrada, meio e saída (32, 48 e 65 $\mu\text{m}$  respectivamente) em relação ao cobre eletrolítico e cobre cromo consideradas as mesmas regiões (23/29, 27/29 e 49/43 $\mu\text{m}$ ). Isso se dá pela eficiência da grafita na taxa de remoção de material e intensidade das descargas elétricas que promovem maior quantidade de material fundido e, conseqüentemente, a maior parte acaba por se ressolidificar.

A pressão do jato abrasivo é a mesma, por isso a limpeza da cavidade usinada é muito próxima em todos os materiais. Sendo que no caso da grafita a quantidade a ser retirada é muito superior aos demais, deixando mais material na superfície da cavidade.

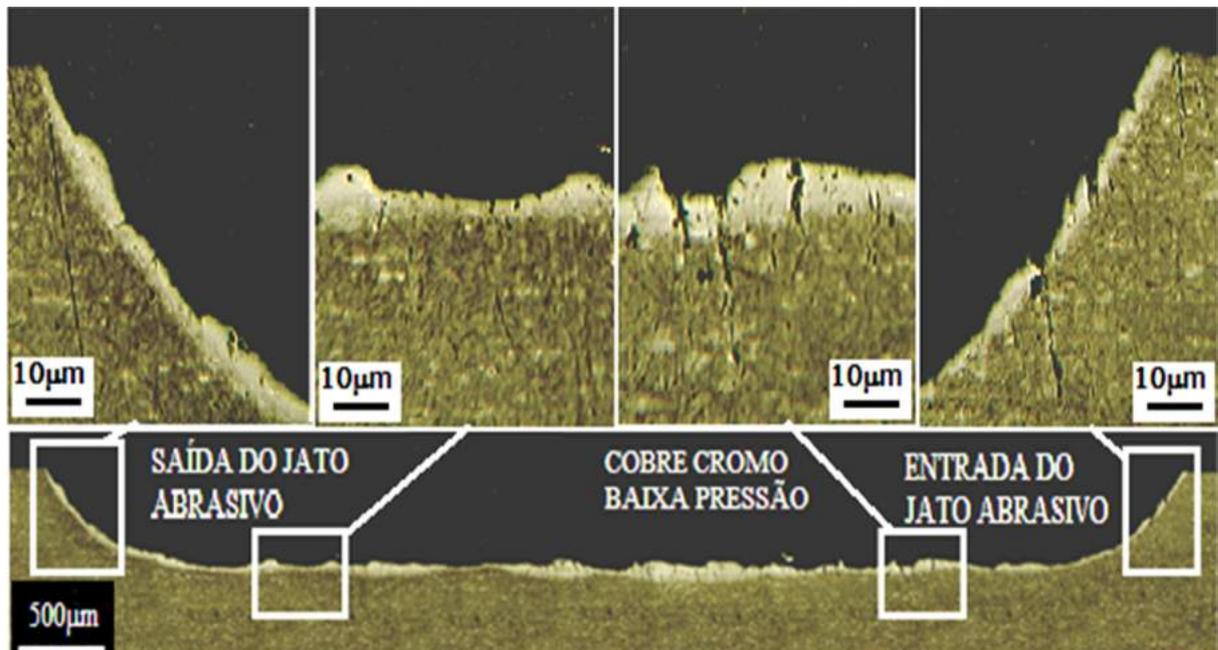
Para comparar a espessura da camada refundida no processo AJEDM com o processo EDM (que não usa alta pressão e abrasivo) foi realizado o corte transversal da cavidade das amostras nas mesmas condições das anteriores, conforme mostram as figuras 56 a 58.

Figura 56 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo EDM eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico com água deionizada em baixa pressão (1MPa).



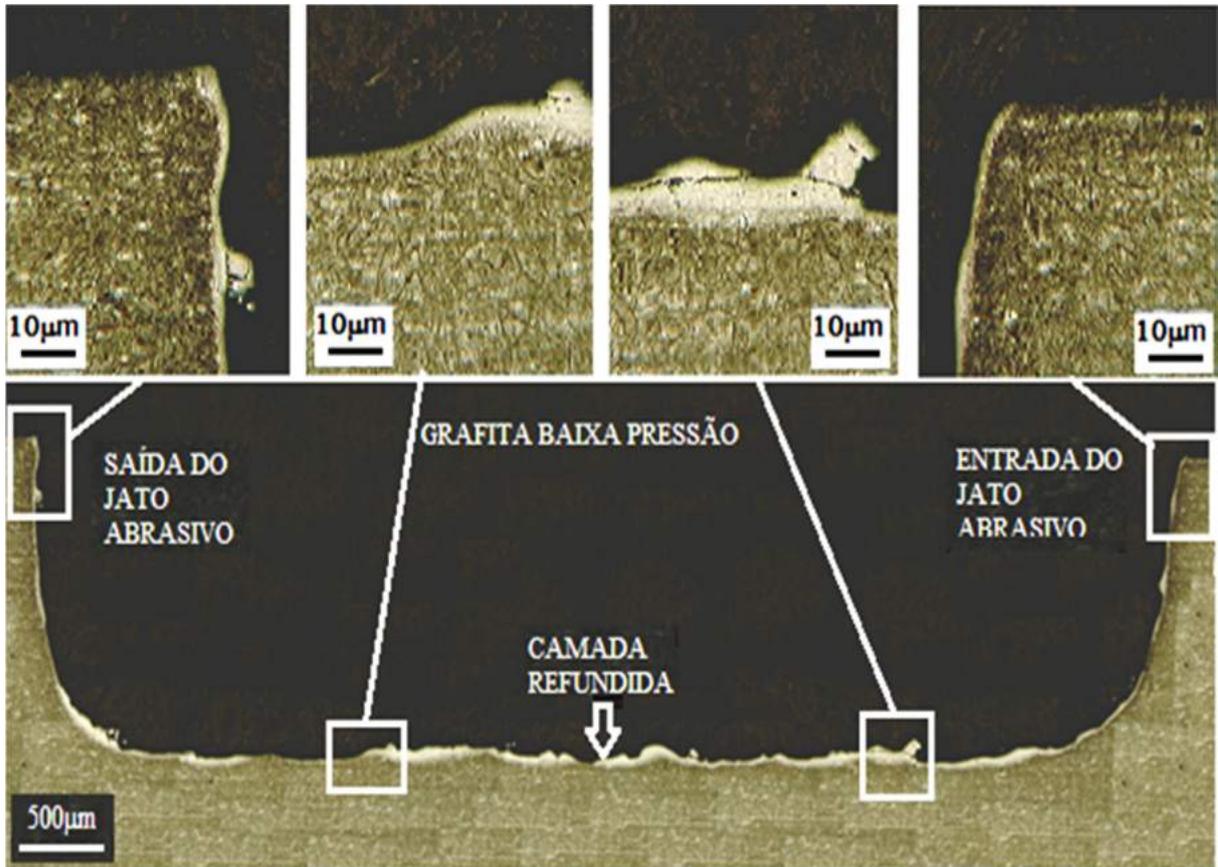
Fonte: autor.

Figura 57 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo EDM eletrodo ferramenta de cobre cromo com água deionizada em baixa pressão (1MPa).



Fonte: autor.

Figura 58 - Microscopia óptica do aço AISI M2 no processo EDM eletrodo ferramenta de grafita com água deionizada em baixa pressão (1MPa).

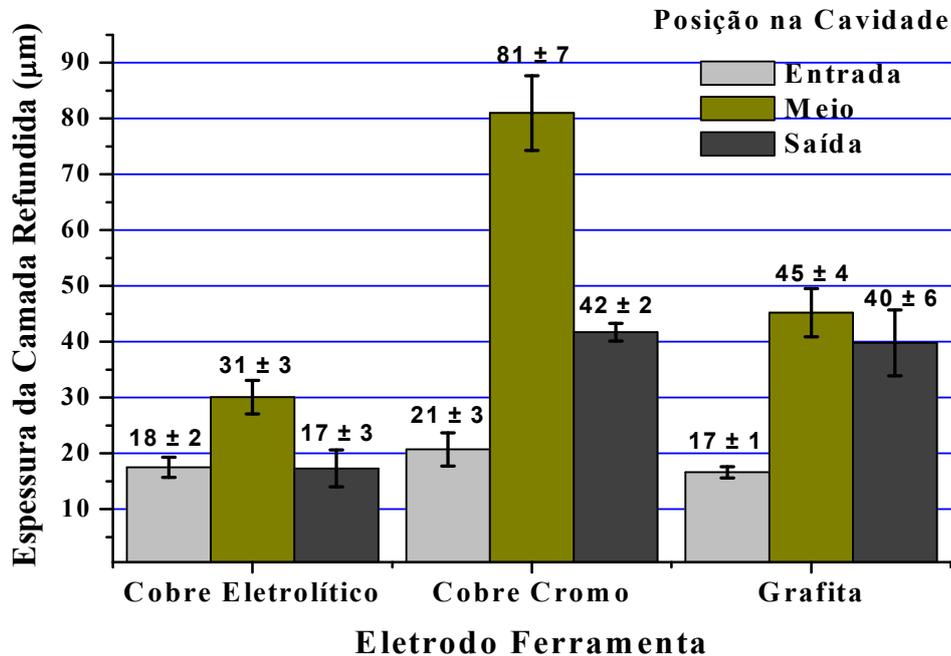


Fonte: autor.

Alguns detalhes nas figuras 56 a 58 chamam a atenção, as rebarbas na saída da cavidade, por exemplo, são muito menores que no processo AJEDM; a espessura da camada refundida está mais homogênea e sem sinais de deslocamento da mesma, como nas imagens a 30MPa. Do mesmo modo que no processo AJEDM a grafita mantém as paredes da cavidade mais perpendiculares, evidenciando que em ambos os casos (AJEDM e EDM) a grafita é mais eficiente do que o cobre em relação à taxa de remoção de material.

O gráfico da figura 59 apresenta a espessura da camada refundida no processo EDM com fluido dielétrico água deionizada e material de eletrodo ferramenta: cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita.

Figura 59 - Espessura da camada refundida no processo EDM variando o material do eletrodo ferramenta em baixa pressão.



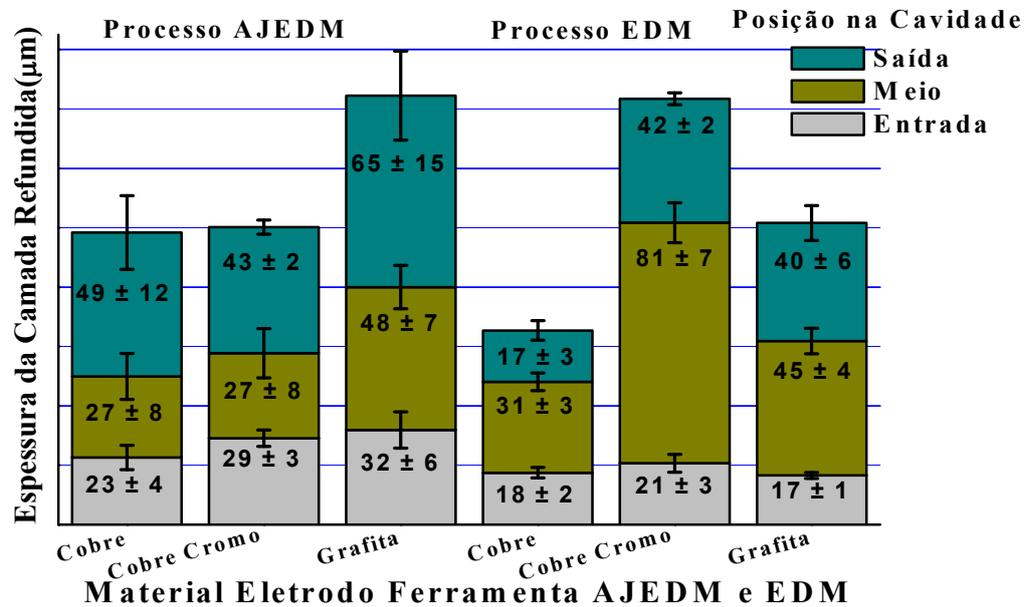
Fonte: autor.

Observa-se no gráfico da figura 59 que a espessura da camada refundida tem comportamento diferente no processo EDM com relação ao processo AJEDM. No caso desse último, a espessura da camada refundida aumentava da entrada para a saída da cavidade e no processo EDM a maior espessura se concentra no meio da cavidade, mostrando que o jato abrasivo é muito eficiente na limpeza do material fundido.

Segundo Erden e Kaftanoglu (1981) estima-se que menos de 15% do material fundido por descargas elétricas durante o processo EDM é removido da superfície, enquanto o restante ressolidifica, confirmando o ganho no uso do processo AJEDM.

O gráfico comparativo da espessura da camada refundida ao longo da cavidade usinada no processo AJEDM e EDM com eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita é ilustrado na figura 60.

Figura 60 - Comparação da espessura da camada refundida nos processos AJEDM e EDM em função do material do eletrodo ferramenta.



Fonte: autor.

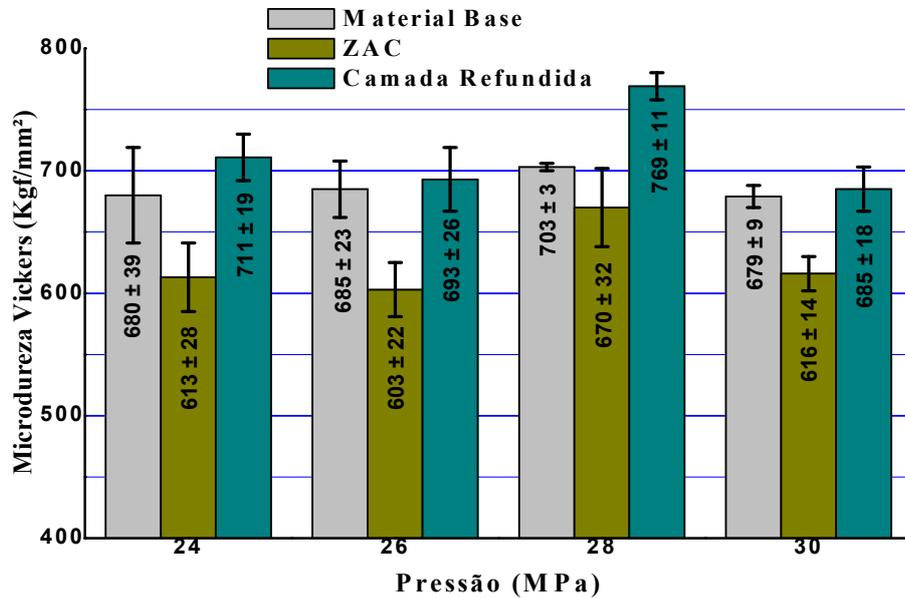
Observam-se os dois processos no gráfico da figura 60, onde a espessura da camada refundida varia conforme a região. No processo AJEDM a maior espessura está localizada na curvatura de saída da cavidade e no processo EDM na superfície central da cavidade usinada.

#### 4.3.2. Avaliação da dureza das camadas

Os valores de microdureza Vickers da camada refundida, zona afetada pelo calor (ZAC) e material base, são apresentados nas figuras 61 a 63. Foi avaliado o efeito da variação da pressão no processo e o material do eletrodo ferramenta. A microdureza foi realizada na seção transversal da cavidade usinada.

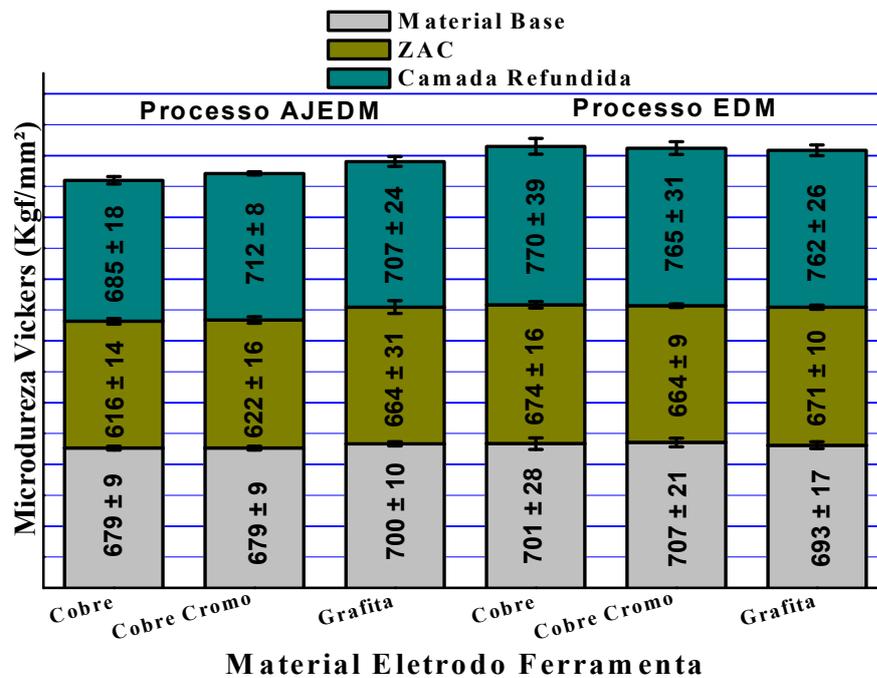
As variações de pressão mostradas na figura 61 não parecem ser suficientes para qualquer alteração de dureza significativa nos corpos de prova. Já nas figuras 62 e 63 que demonstram a dureza nas camadas usinadas pelo processo EDM e AJEDM existem alterações mais perceptíveis na camada refundida, onde se observa maior dureza dessa camada usinada pelo processo EDM.

Figura 61 - Variação da dureza no processo AJEDM em função da pressão.



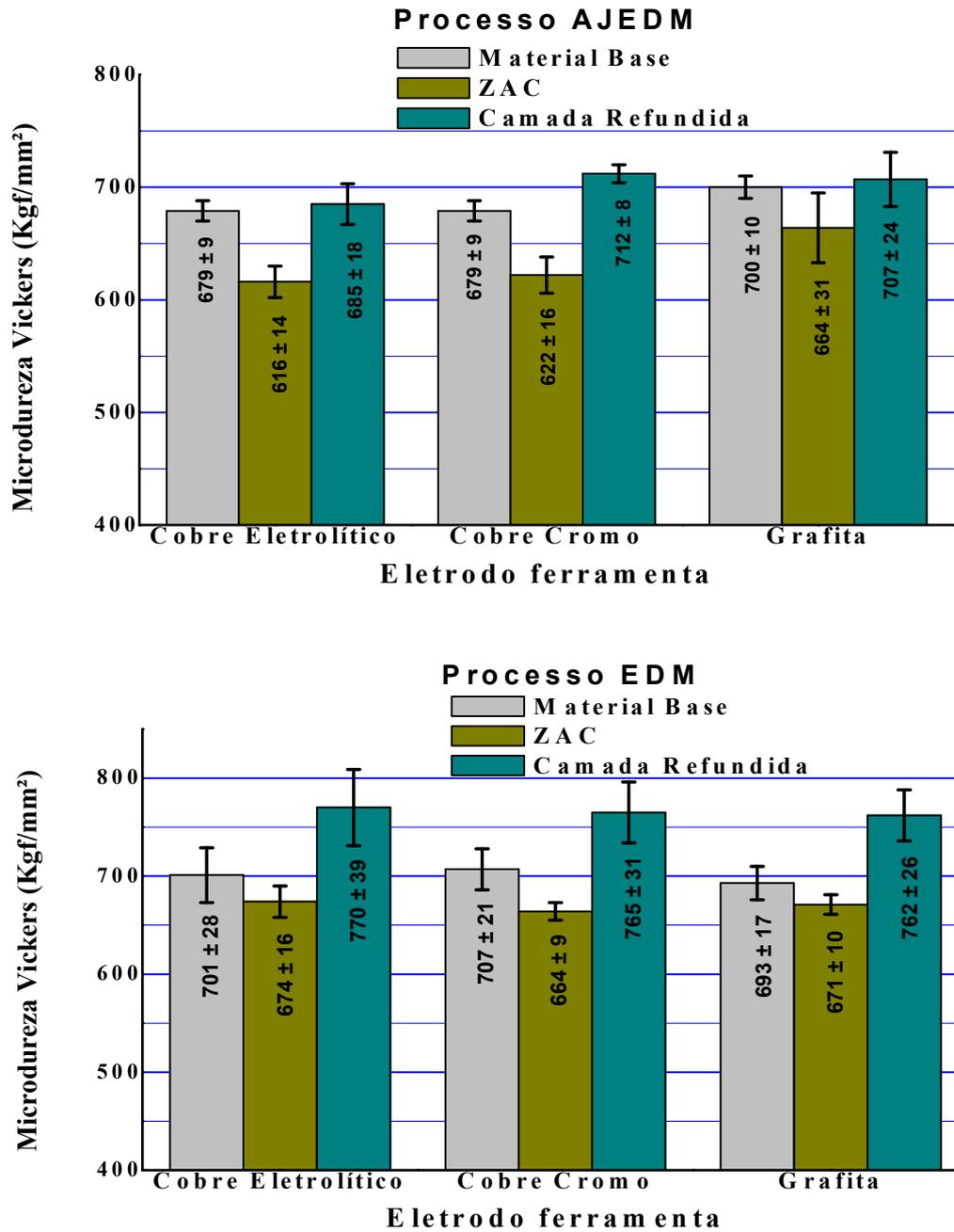
Fonte: autor.

Figura 62 - Variação da dureza Vickers nos processos AJEDM e EDM variando-se o material do eletrodo ferramenta.



Fonte: autor.

Figura 63 - Variação da dureza Vickers nos processos AJEDM e EDM isoladamente, variando-se o material do eletrodo ferramenta.



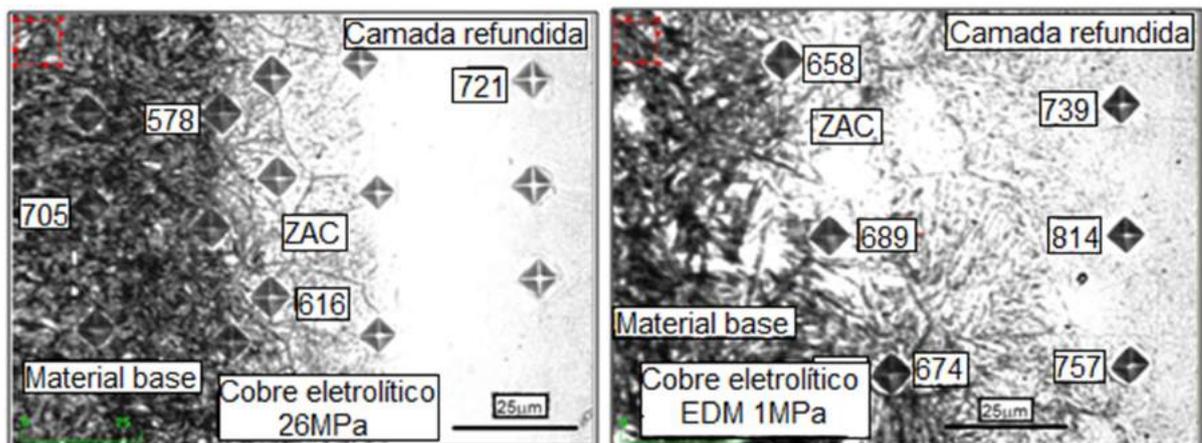
Fonte: autor.

Os gráficos das figuras 61 a 63 demonstram que há variação no perfil de dureza Vickers entre a camada refundida e material base, sendo que em todos os casos a camada refundida apresenta aumento de dureza de mais 5% em relação ao material base e a ZAC sofre redução na dureza de 8% média em relação ao material base. O

aumento de dureza da camada refundida é esperado, o material fundido vai se redepositar na superfície da cratera devido à tensão superficial e a efeitos de resfriamento. Esse material resfria-se, principalmente pela troca de calor com as paredes da cavidade e o poder de refrigeração do fluido dielétrico formando martensita não revenida (ARANTES, 2007). A ressolidificação rápida forma essa camada fina com arranjo reformulado e extremamente frágil (MCGEOUGH, 1988).

Segundo Fuller (1989) os efeitos da energia do processo sobre essas camadas são altamente dependentes do material usinado. Como exemplo, ele cita que, para aços-ferramenta, a primeira camada da zona afetada pelo calor de uma superfície usinada pelo processo de eletroerosão apresenta maior dureza na maioria dos materiais devido a formação da martensita, enquanto que, a segunda camada dessa zona apresenta baixa dureza em decorrência da martensita revenida em altas temperaturas. A segunda camada caracteriza-se pela dureza menor que o material base, pois o mesmo tem de início dureza bem elevada, ilustrada na figura 64.

Figura 64 - Variação da microdureza Vickers entre as camadas nos processos AJEDM e EDM com pressão de 26 e 1MPa, respectivamente.



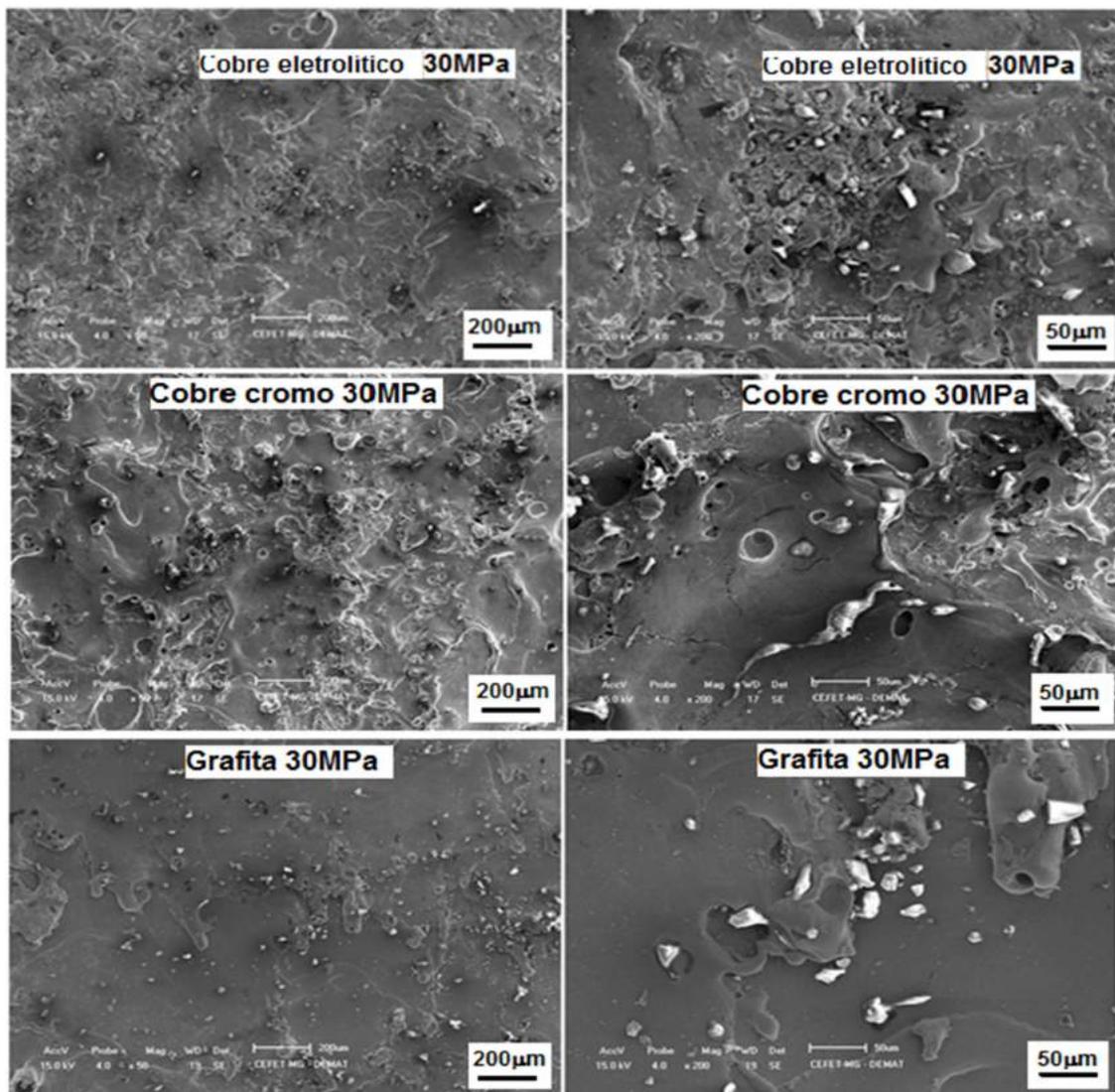
Fonte: autor.

Na figura 64 observam-se nitidamente as diferenças nas camadas que formam a superfície usinada pelo processo AJEDM. Nota-se também, a diferença no tamanho das endentações em cada camada, evidenciando a alteração da resistência à penetração do indentedor, proporcionado pela ação térmica do processo AJEDM.

### 4.3.3. Morfologia da camada refundida

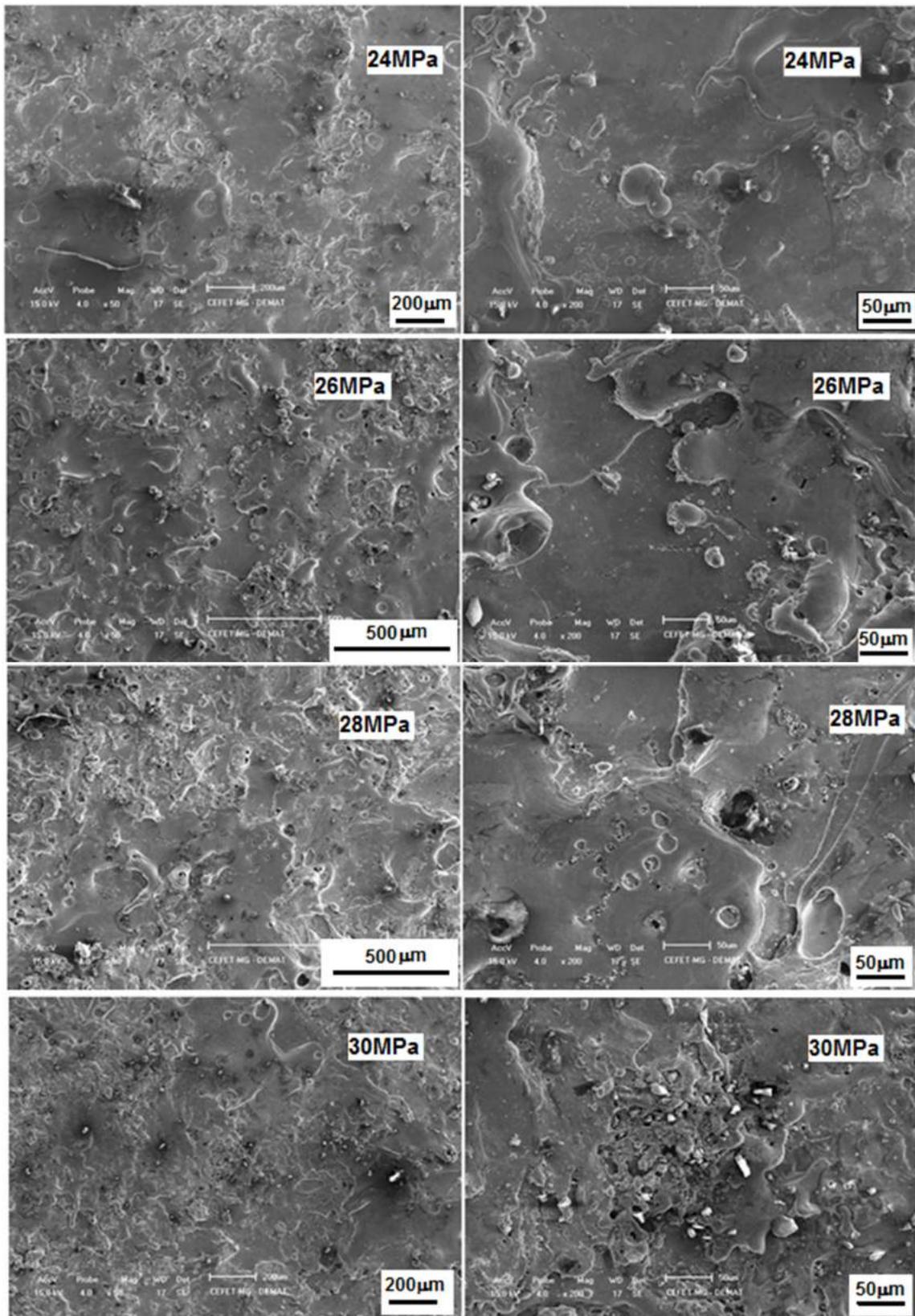
A análise das superfícies por MEV avaliou se os problemas decorrentes do processo EDM (trincas, poros e crateras) tinham alguma melhora no processo híbrido AJEDM. Na sequência de imagens (Figuras 65 e 66) estão o processo híbrido AJEDM com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico nas pressões de 24 a 30MPa e cobre cromo e grafita na pressão de 30MPa, todos com abrasivo óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e granulometria de 600mesh.

Figura 65 - Superfícies usinadas pelo processo AJEDM com eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita, abrasivo óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) na pressão de trabalho de 30MPa.



Fonte: autor.

Figura 66 - Superfícies usinadas pelo processo AJEDM com eletrodo de cobre eletrolítico, abrasivo óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) nas pressões de 24 a 30MPa.



Fonte: autor.

Na figura 65, assim como na figura 66 (eletrodo de cobre eletrolítico) é possível visualizar a incrustação de abrasivos na camada refundida. Segundo Silva (2013) essa incrustação de abrasivos reforça que o ganho da taxa de remoção de material está diretamente relacionada à pressão de trabalho e a adição do abrasivo no fluido dielétrico.

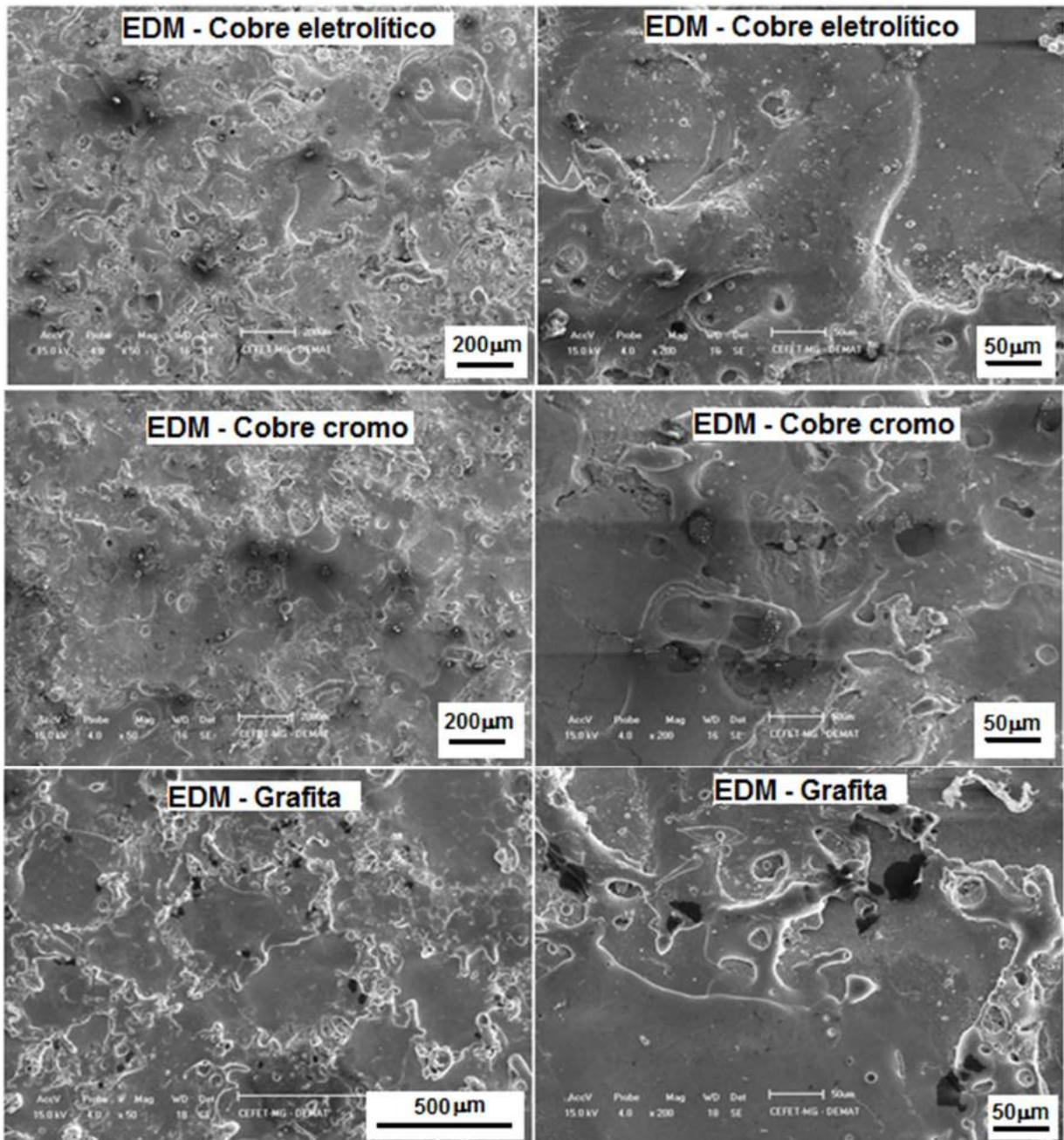
Essa variação da pressão de trabalho do jato de água abrasivo é que acentua o efeito da remoção pelo fluido dielétrico das micropartículas do material arrancados da superfície da peça pelas descargas elétricas.

Entre as imagens da figura 65 observa-se que, a morfologia da superfície usinada com grafita mostra-se mais homogeneia com ausência de trincas visíveis e poucas crateras em comparação com as superfícies usinadas pelo cobre.

A figura 66 ilustra que as superfícies usinadas pelo processo AJEDM apresentam na camada refundida, independente da pressão, irregularidades e defeitos que se assemelham a usinagem do processo EDM, mostrando poros e trincas. A diferença importante nessas imagens, principalmente na pressão de 30MPa é a incrustação de abrasivos, o que comprova que o abrasivo, age na camada refundida durante o processo.

A figura 67 ilustra a morfologia das superfícies usinadas pelo processo EDM variando-se o material do eletrodo ferramenta: cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita em baixa pressão (1MPa).

Figura 67 - Superfícies usinadas pelo processo EDM com eletrodo ferramenta de Cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita, fluido dielétrico água deionizada.



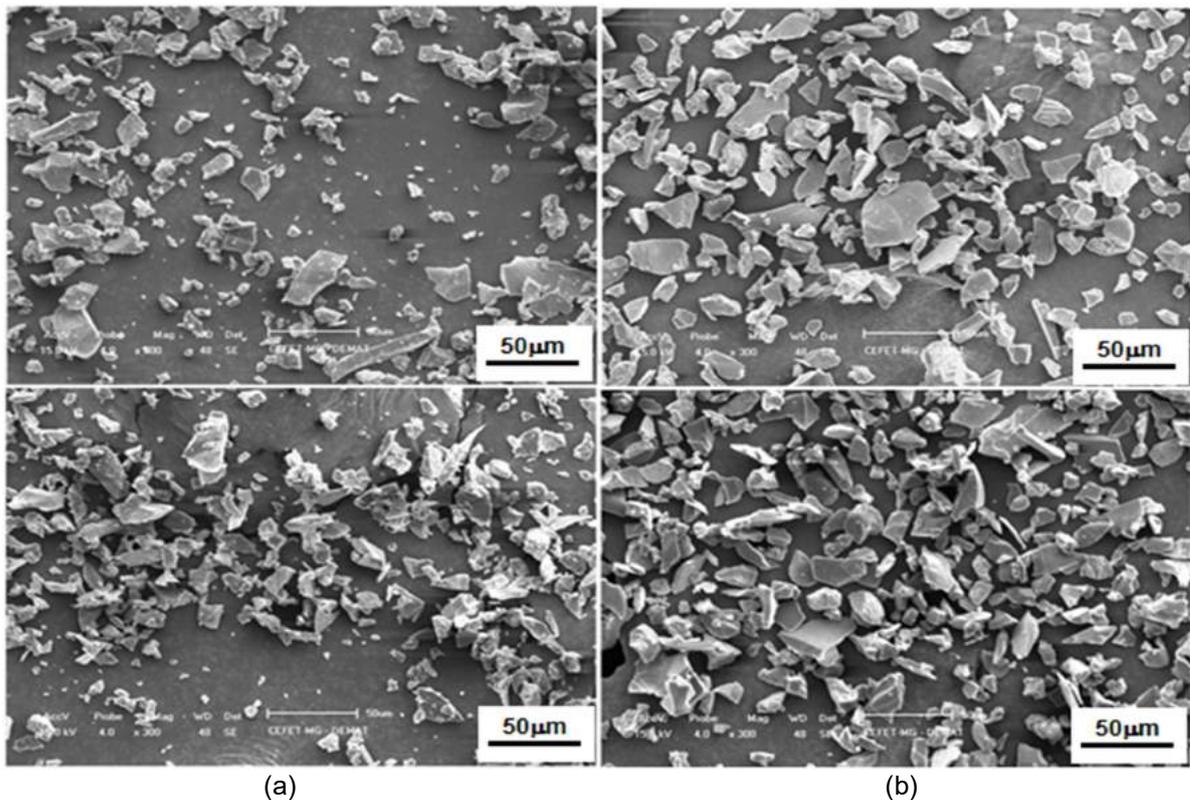
Fonte: autor.

As imagens de MEV das superfícies usinadas pelo processo EDM não apresentam grandes diferenças entre si. Nota-se nas imagens com eletrodo ferramenta de grafita que, semelhante ao processos AJEDM, a superfície aparenta mais homogeneidade e sem presenças visíveis de trincas.

#### 4.4. Avaliação da integridade do abrasivo

A análise do grão abrasivo foi feita após o uso do abrasivo na condição mais severa (30MPa). O abrasivo deixado para decantar no reservatório foi retirado e seco à temperatura ambiente, dessa forma foi possível comparar o abrasivo novo com o abrasivo após o uso a 30MPa no processo AJEDM. A figura 68 ilustra as diferenças entre os abrasivos.

Figura 68 - Imagens de MEV do abrasivo óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) com granulometria de 600mesh: na coluna (a) abrasivo novo e na coluna (b) abrasivo usado na pressão de 30MPa.



Fonte: autor.

A figura 68 demonstra que características importantes no abrasivo: forma e granulometria não foram alteradas após o uso, indicando que o mesmo abrasivo pode ser usado mais de uma vez no processo AJEDM sem perder sua eficiência. A única diferença visual notada é a ausência das partículas menores dos grãos abrasivos. Essas partículas muito pequenas ficaram em suspensão no reservatório da mistura (água/abrasivo) e não tiveram tempo para decantar no fundo do reservatório. Sendo necessário filtros para reter estas partículas menores.

A tabela 8 complementa a indicação da microscopia eletrônica de varredura sobre a granulometria do abrasivo óxido de alumínio após o teste com pressão de 30MPa.

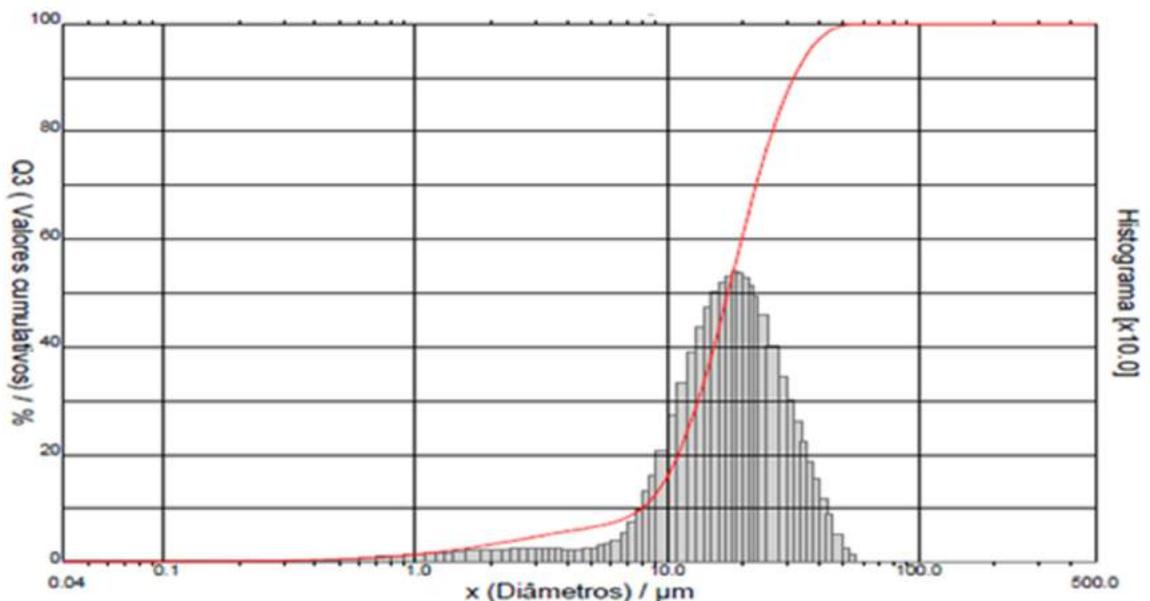
Tabela 8 – Granulometria a laser do abrasivo óxido de alumínio novo e usado na pressão de 30MPa.

Parâmetro	Abrasivo Novo	Abrasivo Usado 30MPa	Unidade
Diâmetro a 10% :	4,42	7,96	µm
Diâmetro a 50% :	15,44	17,51	µm
Diâmetro a 90% :	30,45	31,93	µm
<b>Diâmetro médio :</b>	<b>16,76</b>	<b>18,76</b>	µm
Ultrassom	60	60	S
Obscuração	18	14	%

Fonte: autor.

O ensaio de granulometria a laser das amostras confirmou a análise visual de MEV, demonstrando que as menores partículas não permaneceram após a decantação da mistura de água e abrasivo. Em todos os níveis analisados, as partículas tiveram um aumento médio de granulometria, pois há menor quantidade das partículas inferiores a 5µm compondo a média. A distribuição das partículas é ilustrada na figura 69.

Figura 69 – Gráfico de distribuição granulométrica do abrasivo óxido de alumínio após o uso a 30MPa.



Fonte: autor.

## 5. Conclusões

- A adaptação do equipamento EDM para realização da usinagem pelo processo híbrido AJEDM foi satisfatória, demonstrando sua viabilidade técnica.
- A pressão tem influência na taxa de remoção de material, já que a mesma tem seu valor gradualmente aumentado conforme há acréscimo da pressão.
- O processo híbrido AJEDM apresenta taxa de remoção de material da ordem de duas vezes maior que o processo EDM convencional em todos os materiais de eletrodo ferramenta avaliados.
- Entre os materiais avaliados a grafita se destaca com taxa de remoção de material três vezes maior que os demais, cobre eletrolítico e cobre cromo no processo AJEDM.
- A taxa de desgaste do eletrodo ferramenta também é influenciada pela pressão, já que a superfície da ferramenta também sofre desgaste com a ação das partículas abrasivas, o que é evidenciado na pressão de 30MPa.
- A grafita teve desgaste três vezes superior ao cobre eletrolítico e cobre cromo no processo AJEDM.
- O desgaste volumétrico relativo tem aumento conforme aumenta os valores de pressão, sendo este, compensado pelo aumento da taxa de remoção de material.
- A grafita teve desgaste volumétrico relativo superior ao cobre eletrolítico e cobre cromo no processo AJEDM, com aumento significativo de 75% na condição de 30MPa.

- A análise de dureza mostra que a camada refundida possui maior dureza, seguida do material base e por fim a ZAC.
- A superfície usinada com eletrodo ferramenta de grafita apresentou mais homogeneidade, sem evidências de poros e microtrincas em comparação com cobre eletrolítico e cobre cromo.
- O grão abrasivo não sofreu alterações significativas na forma e granulometria, podendo ser reutilizado no processo.

### **5.1. Sugestões para trabalho futuros**

- Aplicar o processo AJEDM com pressões superiores a 30MPa.
- Verificar a influência da taxa de alimentação de abrasivos no processo, controlando a quantidade de abrasivo alimentado por meio de sistema de fornecimento com dispositivo dosador.
- Avaliar a degradação dos abrasivos usados no processo AJEDM com pressões superiores a 30MPa.
- Estudar novos materiais como eletrodo ferramenta no processo AJEDM.
- Verificar a eficiência de abrasivos com granulometrias diferentes de 600mesh na taxa de remoção de material, taxa de desgaste e desvio volumétrico relativo com pressões superiores a 30MPa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANTES, L. J. **Avaliação de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas**. 2001. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - 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 em Engenharia Mecânica) - 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. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**, 5., abr. 2009, Belo Horizonte.

BABU, K.; CHETTY, K. A Study on recycling of abrasives in abrasive water jet machining. **Wear**, v. 254, p. 763–773, Feb. 2003.

BAYER, A. M.; WALTON, L. R. **Wrought tool steels**. ASM Handbook Metals Park, vol 1, p. 757-779, 1990.

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

CALLISTER JR., W. D.; **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, LTC, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

CHARMILLES, S. A. EDM Applications. **Charmilles catalogue**. Disponível em <<http://www.charmilles.com>> Acesso em: Jan. 2015.

COPPERMETAL, S. A. Produtos. **Catalogo**. Disponível em: <<http://www.coppermetal.com.br>> Acesso em: Jun. 2016.

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 em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FIELD, M., KAHLES; J. F.; KOSTER, W. P. Surface finish and surface integrity: metcut research associates inc., In: **Metals handbook**. 9 ed., Machining, v. 16, p. 19-36. 1989.

FINNIE I. Erosion of surfaces by solid particles. **Wear**, Emeryville, v. 3, p. 87-103. 1960.

FINNIE, I. Some reflections on the past and future of erosion. **Wear**, Berkeley, Elsevier. v. 1, n. 10, p. 186-187. 1995.

FULLER, J. E. Electrical discharge machining. In: **Metals handbook**. 9. ed., Machining, v.16, p.557-564. 1989.

HASHISH, M. The potential of an ultrahigh pressure abrasive waterjet rock drill. In: **U. S. WATER JET CONFERENCE**, 5, Toronto, Aug. 1989. Paper 32, p. 321-332.

HOYLE, G. **High Speed Steels**. London: Cuterworth & Co, 1988, 458 pp.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology, friction and wear of engineering materials**. London, Arnold, 1992. 273 p.

INTECH EDM. **A guide to understanding and selecting EDM dielectric fluids**. Broadview, IL, 1996.

JUNKAR, M.; JURISEVIC, B.; FAJDIGA, M.; GRAH, M. Finite element analysis of single particle impact in abrasive water jet machining. **International Journal of Impact Engineering**, v. 32, p. 1095-1112, Jan. 2006.

KAMINSKI, P. C.; CAPUANO, M. N. Usinagem de Micro-furos pelo Processo de Eletroerosão por Penetração. **Revista OESP Metal-Mecânica**, Ano 4, nº. 25, OESP Mídia, São Paulo, p. 42-47, 1999.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F.; SPARRER, M. EDM-sinking Using Water-based dielectrics and Electropolishing - a New Manufacturing Sequence in Tool-making. In: **Proceedings of The 11<sup>th</sup> International Symposium on Electromachining (ISEM XI)**, Lausanne, Switzerland, p. 225-234, 1995.

KOKHANOVSKAYA, T. S. EDM working fluids. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMACHINING**, 7, London, Feb. 2004. p. 251-264.

KOZAK, JERZY; OCZOS, KAZIMIERZ. Selected problems of abrasive hybrid machining. **Journal of Materials Processing Technology**, Lincoln, University of Nebraska. 2001.

LONGRIDGE, C. C. Hydraulic mining. **Mining Journal**, London, 1910.

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

MÜLLER, F.; MONAGHAN, J. Non-conventional machining of particle reinforced metal matrix composite. **Machine Tools and Manufacture**, Dublin, v. 40, n. 9, p. 1351-1366, July 2000.

OCZOS, K. E. Shaping of technical ceramics materials. **Publ. OWPR**, Rzeszow, 1996.

RASLAN, A. A.; ARANTES, L. J. **Método de usinagem híbrida combinando descargas elétricas e erosão abrasiva**. Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. Projeto n. PI0703468-7, set. 2007 a mar. 2009.

ROBERTS, G. A.; CARY, R. A. **Tool Steels**. Metals Park, ASM, 4 ed., p. 627-772, 1980.

Silva, E. R. **Otimização e avaliação dos parâmetros de influência do processo AJEDM**. 2013, 106f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

STEVENS, L. **Improvement of surface quality in die-sinking EDM**. 1998, 181 f. Thesis (Doctoral of Mechanical Engineering) - Katholieke Universiteit Leuven, Leuven.

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

TUERSLEY, I. P.; JAWAID, A.; PASHBY, I. R. Review: various methods of machining advanced ceramic materials. **Journal of Materials Processing Technology**, Coventry, v. 42, n. 4, p. 377-390, May. 1993.

VILLARES METALS, S. A. **Ficha técnica VWM2**. Disponível em: <<http://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos>> Acesso em: Jul. 2016..

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

WANG, KESHENG; GELGELE, HIRPA; WANG, YI; YUAN, QINGFENG; FANG, MINGLUNG. A hybrid intelligent method for modeling the EDM process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Stavanger, v. 43, n. 10, p. 995-999, Aug. 2003.

WOMA, Apparatebau. **Aplicações**. Disponível em: <<http://www.woma.de>>. Acesso em: jun. 2010.