

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DEBORAH LISA DE SOUZA PEREIRA

**USINAGEM POR ELETROEROSÃO E JATO DE ÁGUA ABRASIVO NA PRESSÃO
DE 120 BAR**

BELO HORIZONTE

2016

DEBORAH LISA DE SOUZA PEREIRA

**USINAGEM POR ELETROEROSÃO E JATO DE ÁGUA ABRASIVO NA PRESSÃO
DE 120 BAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado pelo curso de graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Ernane Rodrigues da Silva

Belo Horizonte

2016

DEBORAH LISA DE SOUZA PEREIRA

**USINAGEM POR ELETROEROSÃO E JATO DE ÁGUA ABRASIVO NA PRESSÃO
DE 120 BAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado pelo curso de graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Prof: Ernane Rodrigues da Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof: Aderci de Freitas Filho

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof: Rogério Felício dos Santos

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Belo Horizonte

2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço a primeiramente à Deus, por ter me dado saúde, inteligência e disposição para superar todas as dificuldades e conseguir chegar onde estou hoje, alcançando meus objetivos.

À minha família, pais e irmãos pelo amor incondicional e todo o suporte, me ajudando a me tornar cada dia uma pessoa melhor.

Ao meu orientador Ernane Rodrigues da Silva, por todos os ensinamentos, dedicação, paciência, por disponibilizar seu tempo e me ajudar a realizar este trabalho.

Ao Aderci de Freitas Filho, que admitiu minha visualização na parte experimental de sua pesquisa, sendo que desta forma contribuiu para um melhor entendimento do meu trabalho.

À banca examinadora, Aderci de Freitas Filho e Rogério Felício dos Santos, pela atenção e comprometimento neste trabalho.

A esta instituição pelo ambiente oferecido aos seus alunos e os profissionais qualificados que disponibiliza para nos ensinar

Aos meus amigos, que compreenderam quando estive em falta e por confiarem em mim.

À todos os envolvidos direta ou indiretamente, deixo o meu muito obrigada.

RESUMO

A demanda por materiais com maiores resistências e econômicos fez com que os processos de usinagem já existentes tornassem insuficientes, fazendo com que a usinagem híbrida fosse desenvolvida. Entre eles, se encontram a usinagem por eletroerosão, que apresentam uma taxa de remoção de material relativamente baixa, além da formação da camada refundida. O processo de Usinagem por Descargas Elétricas e Jato Abrasivo de Água (AJEDM) consiste na junção dos processos de usinagem por descargas elétricas juntamente com o processo de Jato de Água Abrasivo. Este processo utiliza a interação térmica do EDM com o mecanismo de erosão por jato de água com partículas abrasivas. O objetivo deste trabalho é analisar o efeito da densidade em peças de alumínio e aço AISI M2 no processo híbrido de usinagem AJEDM, analisando a Taxa de remoção de material (TRM), Taxa de desgaste (TD), taxa de desgaste relativo (DRV) e formação da camada refundida. Para a realização dos testes adaptações na máquina da de EDM foram feitas, foi utilizado cobre e grafita como eletrodo, aço AISI M2 e alumínio como peça. Observou-se uma elevada remoção de material ao usinar o alumínio, este contendo menor densidade comparada ao aço AISI M2.

Palavras-chave: eletroerosão, AJEDM, camada refundida, AISI M2, alumínio.

ABSTRACT

The demand for materials with higher resistance and economic made the machining processes already become insufficient, causing the machining hybridizes to be developed. Among them are electro-discharge machining, which have a relatively low material removal rate, besides the formation of the recast layer. The machining process by Electrical Discharge and Water Jet Abrasive (AJEDM) is at the junction of machining processes by electrical discharges along with the process of Abrasive Water Jet. This process uses thermal interaction with the EDM erosion mechanism waterjet to abrasive particles. The objective of this study is to analyze the effect of density on aluminum parts and steel AISI M2 in hybrid process AJEDM machining, analyzing removal rate material (MRR), wear rate (WR) on wear rate (RWR) and formation of the remelted layer. For the tests adjustments in the machine of EDM were made, it was used as copper and graphite electrodes, steel AISI M2 and aluminum as part. Observed high material removal when machining aluminum, containing this lower density compared to steel AISI M2.

Keywords: EDM, AJEDM, remelted layer, AISI M2, aluminum.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- TRM e desvio padrão contendo amostras de aço AISI M2 e alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita.....	43
Gráfico 2 - TD e desvio padrão contendo amostras de aço AISI M2 e Alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita.....	44
Gráfico 3- DRV e desvio padrão contendo amostras de aço AISI M2 e alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita.....	45
Gráfico 4 - Variação em massa (g) e desvio padrão de abrasivo (SiC e Al₂O₃) em um período de 5 min utilizando contendo amostras de aço AISI M2 e alumínio com eletrodo de cobre e grafita.....	47
Gráfico 5 - TRM e desvio padrão contendo amostras de aço AISI M2 utilizando eletrodo de cobre e grafita no processo sem pressão.....	49
Gráfico 6 – TD e desvio padrão contendo amostras de aço AISI M2 utilizando eletrodo de cobre e grafita no processo sem pressão.....	50
Gráfico 7 – DRV e desvio padrão contendo amostras de aço AISI M2 utilizando eletrodo de cobre e grafita no processo sem pressão.....	51
Gráfico 8 – TRM de processo de usinagem de alumínio com e sem pressão.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Forma complexa usinada por eletroerosão.....	18
Figura 2- Esquema de usinagem por descargas elétricas	20
Figura 3- Representação da sequência de usinagem por EDM. <i>Ton</i> define a fusão da peça e a implosão do material fundido, <i>Toff</i> representa a tempo de pausa e lavagem do material erodido, limpeza das partículas.	20
Figura 4- Imagem do MEV com aumento de 200x de uma superfície rugosa de uma amostra de alumínio usinado com eletrodo de grafita na pressão de 120 bar.	23
Figura 5 - Representação esquemática de um equipamento de EDM.....	24
Figura 6-Representação esquemática de um processo AJM.....	27
Figura 7- Esquema de montagem do processo WJM	28
Figura 8-Corte de duas câmeras de mistura do sistema <i>Venturi</i>	29
Figura 9- Princípio de usinagem híbrida AJEDM.	30
Figura 10- Máquina de eletroerosão e suas partes principais.....	31
Figura 11 – Cuba auxiliar desenvolvida para adaptação da máquina.....	32
Figura 12– Sistema de adaptação para alimentação de água deionizada	33
Figura 13- Sistema de alimentação do abrasivo	33
Figura 14- Suporte para adaptação do bico venturi e posicionamento do eletrodo-ferramenta .	34
Figura 15 – Bomba centrífuga para esvaziamento de água mais abrasivo da cuba.	34
Figura 16- Adaptações no cabeçote da máquina de EDM	35
Figura 17– Medição da condutividade da água deionizada através do condutivímetro.....	36
Figura 18– Amostra de aço AISI M2 (a) e alumínio (b) utilizadas para o processo de AJEDM .	36
Figura 19– Eletrodos de cobre (a) e grafita (b) utilizados para o processo de AJEDM.	37
Figura 20- Bico de alimentação de abrasivo antes (a) e após os testes (b).....	40
Figura 21- Suporte para amostra para a usinagem de alumínio sem pressão.....	41
Figura 22- Eletrodo de grafita com uma camada superficial e peça de alumínio usinada.	52
Figura 23– Camada refundida formada no aço AISI M2 com pressão utilizando grafita como eletrodo.	53
Figura 24– Camada refundida formada no aço AISI M2 com pressão utilizando cobre como eletrodo	54
Figura 25– Camada refundida formada no alumínio com pressão utilizando cobre como eletrodo.	54
Figura 26 -Camada refundida formada no alumínio com pressão utilizando grafita como eletrodo.	55
Figura 27– Camada refundida formada no alumínio sem bombeamento utilizando cobre como eletrodo.	55
Figura 28– Camada refundida formada no alumínio sem bombeamento utilizando grafita como eletrodo.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parâmetros de EDM usados nos testes.	38
Tabela 2- TRM e desvio padrão para amostras de aço AISI M2 e alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita.	42
Tabela 3- TD e desvio padrão para amostras de aço AISI M2 e alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita.	43
Tabela 4- DRV médio e desvio padrão para amostras de aço AISI M2 e alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita.	44
Tabela 5- Condutividade elétrica e propriedades mecânicas dos eletrodos-peça e eletrodo-ferramenta.....	45
Tabela 6- Variação de massa (g) dos abrasivos realizados antes e após os testes e desvio padrão.....	47
Tabela 7- TRM médio e desvio padrão para amostras de aço AISI M2 utilizando eletrodo de cobre e grafita no processo sem pressão.....	48
Tabela 8- TD médio e desvio padrão para amostras de aço AISI M2 utilizando eletrodo de cobre e grafita no processo sem pressão.....	49
Tabela 9- DRV médio e desvio padrão para amostras de aço AISI M2 utilizando eletrodo de cobre e grafita no processo sem pressão.....	50

LISTA DE SÍMBOLO

SiC = Carboneto de silício

Al₂O₃ = Oxido de alumínio

Δm = variação de massa

m_i = massa inicial

m_f = massa final

γ = peso específico

t = tempo

% = porcentagem

g = gramas

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

HMP= Usinagem Híbrida

AJEDM = Usinagem por descargas elétricas e jato abrasivo de água

EDM= Usinagem por descargas elétricas

AWJM= Usinagem por jato abrasivo de água

TRM= Taxa de remoção do material

AJM = Usinagem por Jato Abrasivo

AEDG= Retificação por Descargas Elétricas

ddp =diferença de potencial

TD = Taxa de desgaste

DRV = Desgaste volumétrico relativo

MEV= Microscópio eletrônico de varredura

ZAC= Zona termicamente afetada pelo calor

min = minutos

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	14
1.0 INTRODUÇÃO	14
2.0 OBJETIVO	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
CAPITULO II	16
3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Densidade	16
3.2 Processos não tradicionais de usinagem	17
3.3 Usinagem por eletroerosão (EDM)	17
3.3.1 <i>Mecanismo de funcionamento de EDM</i>	18
3.3.2 <i>Parâmetros do processo</i>	20
3.3.3 <i>Aspectos avaliados após a eletroerosão</i>	22
3.3.4 <i>Materiais de eletrodo</i>	22
3.3.5 <i>Integridade da superfície</i>	22
3.3.6 <i>Máquina de eletroerosão</i>	24
3.3.7 <i>Fluidos dielétricos</i>	24
3.4 Usinagem por Abrasivos	26
3.4.1 <i>Usinagem por Jato Abrasivo (AJM)</i>	26
3.4.2 <i>Usinagem por Jato de Água (WJM)</i>	27
3.4.3 <i>Usinagem por Jato de Água Abrasivo (AWJM)</i>	28
3.4.4 <i>Processo híbrido de usinagem AJEDM</i>	29
CAPÍTULO III	31
4.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
4.1 Adaptações na máquina EDM	31
4.2 Seleção dos testes	35
4.2.1 <i>Materiais para eletrodo ferramenta</i>	37
4.2.2 <i>Seleção dos abrasivos</i>	37
4.3 Parâmetros da máquina de EDM	38

4.4 Parâmetros ou aspectos avaliados.....	38
4.5 Testes de EDM sem pressão	40
CAPÍTULO IV.....	42
5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
5.1 Avaliações do processo com pressão de 120 bar	42
<i>5.1.1 Desempenho dos abrasivos.....</i>	<i>46</i>
5.2 Avaliação do processo com fluido estático.....	48
5.3 Análise da camada refundida formada.....	53
CAPÍTULO V.....	57
6.0 CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

CAPÍTULO I

1.0 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico os materiais ganharam propriedades superiores, tornando-se mais duros comparados aos materiais que era comumente utilizados e resistentes. Tal fato torna a usinagem convencional um desafio por ficar cada vez mais difícil a usinagem destes tipos de materiais de forma econômica. Novos processos de usinagem têm sido desenvolvidos para aperfeiçoar a taxa de remoção de materiais de forma mais viável economicamente. Os processos híbridos de usinagem se dão pela combinação de propriedades físicas (ação mecânica para remoção de material), interação térmica, química ou eletroquímica (KOZAK, 2001).

Segundo Arantes (2007) a usinagem híbrida (HMP) tem como objetivo agregar as vantagens dos processos de usinagem utilizados, combinadas ou mutuamente, bem como diminuir efeitos indesejados de quando são aplicados separadamente.

Neste trabalho o processo de usinagem híbrida utilizado, será o de Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo (AJEDM) o qual consiste na aplicação do método de Usinagem por Descargas Elétricas (EDM) e o método de Usinagem por Jato de Água Abrasivo (AWJM) (ARANTES e RASLAN, 2009).

Cabe ao processo EDM garantir a interação térmica, onde o material é removido através dos meios de fusão e evaporação. O processo de AJEDM garante a erosão de material através do jato de água e a utilização de partículas abrasivas. As misturas são submetidas as pressões superiores as pressões nominais da máquina de eletroerosão. O pó abrasivo utilizado serve para aumentar a taxa de remoção do material (TRM) de modo que reduzem a rigidez dielétrica do fluido dielétrico aumentando a fenda de trabalho. O jato de fluido por sua vez, também irá aumentar a TRM por estar submetido a alta pressão, (ARANTES e RASLAN, 2009). Com base em estudos apresentados por Arantes (2007) pode-se perceber que a taxa de remoção do material foi eficiente pelo método AJEDM utilizando carboneto de silício (SiC) e água deionizada em uma pressão de 100bar promovendo uma remoção de 75% maior, comparado a usinagem por EDM em regime sem bombeamento.

2.0 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Estudar o processo híbrido de Usinagem por Eletroerosão e Jato de Água Com Abrasivo na pressão de 120 bar e a influencia da densidade do material usinado.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência da densidade em amostras de aço AISI M2 e liga de alumínio 6351 no processo AJEDM .
- Determinar o desempenho dos eletrodos de cobre e grafita no processo de AJEDM na pressão de 120 bar.
- Aferir a TRM, TD e DRV das amostras após o processo de usinagem.
- Analisar a camada refundida formada por análise em MEV.

CAPITULO II

3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Densidade

Materiais possuem propriedades físicas e químicas. Quando um material é classificado quanto a sua propriedade química significa que ocorre nele uma modificação química, podendo ser interações de uma substância com a outra podendo levar até a transformação de uma substância em outra. O material classificado quanto às propriedades físicas são materiais que não envolvem modificações em sua composição. As propriedades físicas de um material podem ser divididas em dois grupos: extensivas e intensivas. Propriedades físicas extensivas tem uma relação direta com a quantidade de matéria da substância que esta presente na amostra enquanto que as propriedades intensivas não dependem desta quantidade de matéria. Com exemplo de propriedade extensiva, tem-se massa e volume. Temperatura, pressão, cor e densidade são propriedades intensivas (ANDRADE *et al*, 2004).

A densidade é uma importante propriedade que pode diferenciar um material puro de um material impuro (ligas), isto porque a densidade de materiais impuros é uma função da sua composição (ANDRADE *et al*, 2004).

De acordo com Perruzo, Canto (2011) define-se densidade de uma amostra de material de uma substância sendo a divisão de sua massa pelo seu volume, de acordo com a equação 1.

$$\text{Densidade} = \frac{\text{massa (m)}}{\text{volume (v)}} \quad (1)$$

A densidade então pode ser expressa nas unidades g/cm^3 , g/L , Kg/L entre outras medidas que relacionam massa e volume (PERUZZO e CANTO, 2011).

De acordo com Andrade *et al*, (2004) a densidade pode ser absoluta ou relativa. A densidade absoluta é uma propriedade específica onde cada substância tem uma densidade própria sendo possível identificar e diferenciar de outras substâncias. Densidade relativa por sua vez é a relação de uma densidade absoluta com a densidade absoluta de uma substância definida como padrão. É mais comumente a utilização da água sendo a substância padrão, já que a densidade absoluta da água é $1,000 \text{ g/cm}^3$. Se tratando de gases a densidade relativa é de acordo com o ar ou hidrogênio.

Há alguns fatores que alteram a densidade de um material, a temperatura é um exemplo. Para um mesmo material, a temperaturas diferentes, aquele que se apresenta em uma maior temperatura apresentará maior dilatação no material, conseqüente aumento de volume. Como a densidade é relacionada indiretamente com o volume, sofrendo uma dilatação o material diminui sua densidade. Mudanças no estado físico também alteram a densidade, como exemplo a água que líquida tem densidade igual a 1g/cm^3 e sólida (na forma de gelo) tem densidade igual a $0,92\text{g/cm}^3$ (PERUZZO e CANTO, 2011).

3.2 Processos não tradicionais de usinagem

Segundo Ferraresi (2006), a usinagem convencional é o processo o qual garante a peça forma, dimensão ou acabamento gerando cavaco, sendo o cavaco definido como a porção de material que é retirado da peça. Os processos de usinagem convencionais mais utilizados são torneamento, aplainamento, furação, fresamento, dentre outros.

Entretanto, neste trabalho, duas técnicas não convencionais de usinagem serão abordadas, Usinagem por Eletroerosão, também conhecida por Usinagem por Descargas Elétricas e Usinagem por Jato de Água Abrasivo. A técnica de Usinagem por Eletroerosão e Usinagem por Jato de Água com Abrasivo, juntas formam o processo híbrido de Usinagem por Eletroerosão e Jato de Água com Abrasivo (RASLAN e ARANTES, 2009).

Técnicas não tradicionais de usinagem foram desenvolvidas devido à tecnologia que desenvolveu materiais os quais eram difíceis de serem usinados da forma convencional. Cabe ressaltar que o método de usinagem convencional não confronta com o método de usinagem não convencional. A escolha do método a ser desenvolvido deve se dar pelo tipo de material a ser usinado, a forma da peça, o custo econômico e a potencialidade do processo (ARANTES, 2007).

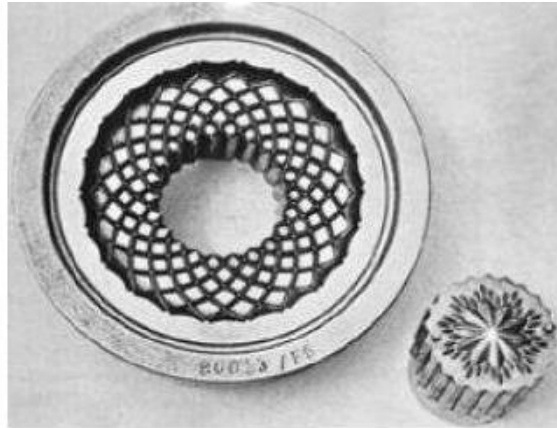
Para entender melhor o processo híbrido AJEDM, é interessante conhecer os princípios físicos de funcionamento dos processos não tradicionais de usinagem dos quais são formados.

3.3 Usinagem por eletroerosão (EDM)

Segundo Arantes (2007), o processo de usinagem por eletroerosão é indicado para os materiais condutores e que possuam elevada dureza, difíceis de serem usinados pelo método

convencional. Materiais que requerem formas complexas, ou formas minúsculas também são indicados para o método EDM. A figura 1 mostra uma peça metálica, condutora que foi usinada através de eletroerosão.

Figura 1 - Forma complexa usinada por eletroerosão.



Fonte: (SCHMIDT, 2008)

Como princípio fundamental do processo EDM tem-se a remoção do material por efeito térmico provocados por descargas elétricas. Através de uma fonte de potencia, aplica-se uma diferença de potencial entre duas placas condutoras de eletricidade (eletrodo e peça), a qual gerará descargas elétricas. Estas placas estão separadas por uma distância, denominada *gap* (CAMARGO *et al*, 2009).

3.3.1 Mecanismo de funcionamento de EDM

Segundo Oliniki (2009), o processo em que ocorre retirada de material através de descargas elétricas, estas em alta frequência e o qual provocam fusão e vaporização de materiais condutores eletricamente é conhecido como eletroerosão. O processo então é capaz de produzir furos, ranhuras, rebaixos e outras geometrias complexas da qual não seria capaz, se fosse realizado por meio de processos de usinagens convencionais.

Mcgeough (1989) relata que no processo de eletroerosão a fonte de energia proveniente tem origem em uma descarga elétrica gerada por um canal de plasma. O plasma é formado entre dois materiais condutores de eletricidade, sendo um deles eletrodo-ferramenta e o outro eletrodo-peça formando faíscas que são produzidas através de descargas elétricas e também por meio de um fluido dielétrico.

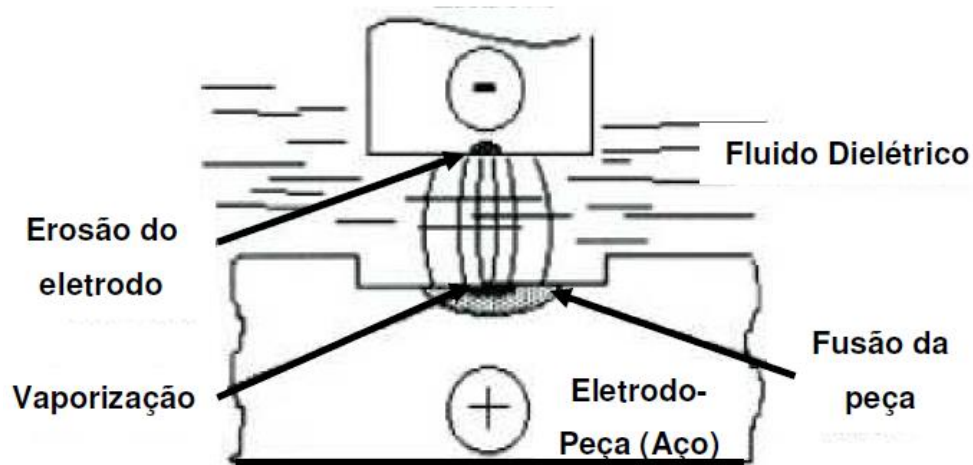
O *gap* é uma pequena distância que ocorre entre o eletrodo e a peça. O *gap* deve existir, pois se eletrodo e peça se encontrarem, ocorrerá a formação de um curto circuito, e deste modo descargas elétricas liberadas não serão observadas (CAMARGO *et al*, 2009). A distância compreendida entre eletrodo e peça, ou seja, o *gap* pode variar de 0,01 a 0,50mm (MCGEOUGH, 1989). De acordo com Arantes (2007) no *gap* circula um fluido dielétrico que se torna eletrolítico na forma gasosa.

O fluido dielétrico torna-se gasoso da seguinte forma, ao iniciar o ciclo de erosão, no momento da descarga elétrica, a potencia liberada pode chegar até 1000 W/m^2 e a uma temperatura de até 12000°C . A pressão pode atingir 200 atm. Desta forma o fluido dielétrico se evaporará tornando-se um fluido gasoso eletrolítico (ARANTES, 2007).

Após a formação do gás, ocorrerá o encontro entre o fluido que esta a baixa temperatura com a parte gasosa, assim, micro-explosões serão realizadas como também a degradação das partículas fundidas da peça. É nesta etapa que literalmente ocorre o processo de usinagem por eletroerosão (CAMARGO *et al*, 2009). As figuras 2 e 3 representam o esquema de usinagem por descargas elétricas.

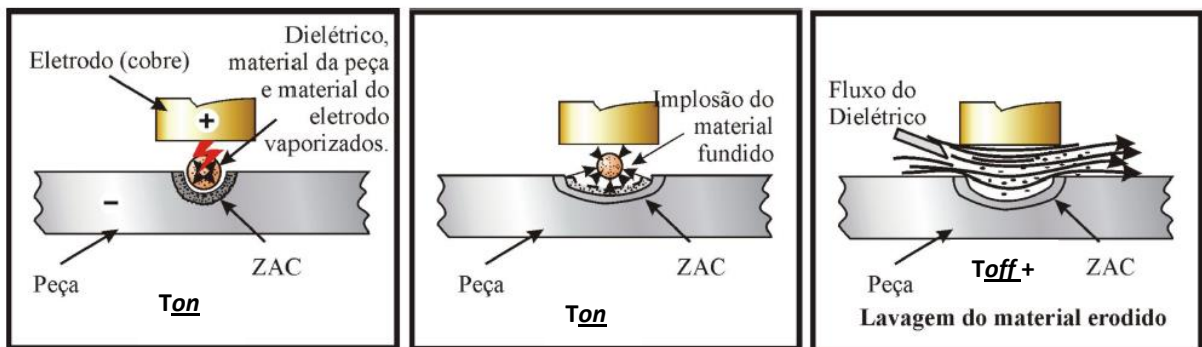
De acordo Camargo *et al* (2009), após o momento em que uma descarga elétrica foi efetuada, ocorre a formação de uma cratera, e então determinada quantidade de material fundido será depositado na superfície desta cratera devido a tensão e a efeitos de resfriamento. A área aquecida por cada faísca é rapidamente refrigerada pelo dielétrico como também a porção de material arrancado (SILVA, 2012). O material irá se resfriar devido às paredes frias da cratera e a capacidade de refrigeração do fluido dielétrico. A camada constituída nesta etapa pelo material refundido é denominada camada refundida e ela pode afetar a estrutura e integridade da superfície que foi usinada (CAMARGO *et al*, 2009).

Figura 2- Esquema de usinagem por descargas elétricas



Fonte: (OLINIKI, 2009) (Adaptada)

Figura 3- Representação da sequência de usinagem por EDM. **Ton** define a fusão da peça e a implosão do material fundido, **Toff** representa a tempo de pausa e lavagem do material erodido, limpeza das partículas.



Fonte:(ARANTES, 2007) (Adaptada)

3.3.2 Parâmetros do processo

Conforme Field (1989), variáveis do processo de EDM devem ser controladas pois são elas que definem a qualidade do processo, tendo em vista a velocidade deste mecanismo, observando a taxa de remoção de material; a relação de desgaste, quando se observa o desgaste do eletrodo; alterações superficiais, tais como rugosidade e integridade, e alterações metalúrgicas, onde pode ser observado as zonas refundidas e afetadas pelo calor.

Os principais parâmetros que devem ser analisados segundo Santos (2010) em um processo EDM os quais influenciam no resultado da usinagem são:

- material da peça;
- material do eletrodo; materiais condutores de eletricidade.
- área usinada;
- profundidade da usinagem;
- composição do fluido dielétrico; influem na estabilidade do processo, podendo variar desde a taxa de remoção de material até a rugosidade obtida.
- corrente nominal;
- tempo de onda ligado (*T_{on}*); tempo de descarga.
- tempo de onda desligado (*T_{off}*); tempo de pausa.
- frequência; aumento da frequência pode levar a melhoria na cavidade superficial.
- tipo de dielétrico; normalmente emprega-se o óleo mineral ou água deionizada.
- condição de limpeza; as quais influenciam profundamente o processo.
- sistema de usinagem; modifica as condições de limpeza em eletroerosão por penetração

3.3.2.1 Parâmetros de controle

Os parâmetros de controle são os parâmetros de entrada na máquina, os quais têm como função obter qualidade no processo EDM (SANTOS, 2010).

A polaridade é um importante parâmetro no processo de EDM, indicando se o polo do eletrodo ferramenta é positivo ou negativo idem a peça (SILVA, 2012). Normalmente em um processo de eletroerosão por penetração a polaridade do eletrodo é positiva, isto porque a polaridade positiva atenua o desgaste do eletrodo (GUITRAU, 1997).

A corrente é o fator que mais influencia em relação ao acabamento, rugosidade, da superfície gerada (RAMASAWMY e BLUNT, 2004). Correntes em elevados valores gera uma maior queda na pressão no final da descarga, fazendo com que mais material seja removido, também, o pulso com uma duração de tempo maior irá elevar o diâmetro do canal de plasma, outra forma de retirar uma maior quantidade de material gerando crateras mais profundas na superfície do material e conseqüentemente maior rugosidade (SILVA, 2012).

A fenda de trabalho também exerce influencia sobre o processo, quando se obtém fendas mais largas, as descargas elétricas possuem maior poder de destruição, aumentando a remoção de material na superfície da peça (MCGEOUGH, 1988).

3.3.3 Aspectos avaliados após a eletroerosão

Após a realização da usinagem, para uma possível análise do rendimento do processo alguns aspectos devem ser observados de acordo com Amorim (2002) tais como:

- taxa de remoção de material (TRM);
- taxa de desgaste (TD);
- desgaste volumétrico relativo (DVR);
- qualificação da textura superficial;

Estes aspectos serão abordados na seção 4.4

3.3.4 Materiais de eletrodo

Duas principais características são desejáveis para a escolha de um eletrodo ferramenta. É esperado que ele possua alta condutividade elétrica e alto ponto de fusão (SANTOS, 2010). Citando Guitrau, (1997) cobre e grafita são dois eletrodos altamente utilizados no processo de EDM por possuírem tais características.

Em condições mais agressivas de usinagem o grafita funciona como um bom eletrodo, pois possui resistência ao dano térmico, deste modo, a eletroerosão ocorrerá de maneira mais rápida, porém, vale ressaltar que eletrodos feitos de grafita são de custo mais elevado (SANTOS, 2010).

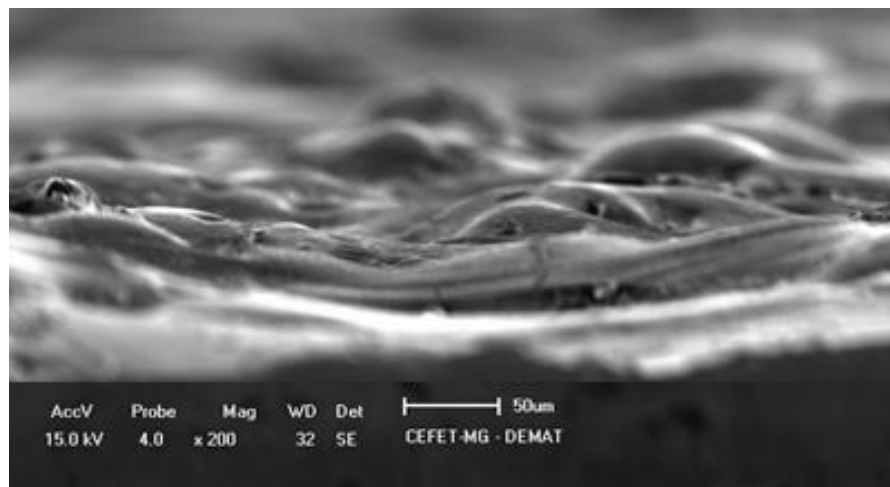
Os eletrodos feitos por cobre, também possuem bom desempenho em relação ao regime de desgaste, assim como boa condutibilidade (FULLER, 1989). Os eletrodos de cobre se destacam por poder realizar praticamente todas as operações que o eletrodo de grafita faz porém a um custo consideravelmente menor (MCGEOUGH, 1988).

3.3.5 Integridade da superfície

Quando um material é submetido a um processo em que ocorre remoção do mesmo, alterações superficiais e sub-superficiais são observadas na região usinada, as quais podem

influenciar no desempenho da peça em trabalho. No processo de EDM, quando se tem uma descarga elétrica, o material é removido, fundido evaporado fazendo com que surjam pequenas crateras. Ao observar a presença dessas crateras nota-se que o acabamento superficial é de baixa qualidade (FULLER, 1989). A figura 4 demonstra a superfície de uma peça usinada com pequenas crateras formadas.

Figura 4- Imagem do MEV com aumento de 200x de uma superfície rugosa de uma amostra de alumínio usinado com eletrodo de grafita na pressão de 120 bar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A camada refundida como também é conhecida é quando uma camada bem carbonetizada é formada. Ela surge após a descarga elétrica que forma a cratera. Na superfície desta cratera, uma porção de material refundido irá se depositar, então o material depositado ao se resfriar, devido aos efeitos das paredes da cratera que encontram se frias e devido ao fluido dielétrico, forma a camada refundida (FULLER, 1989).

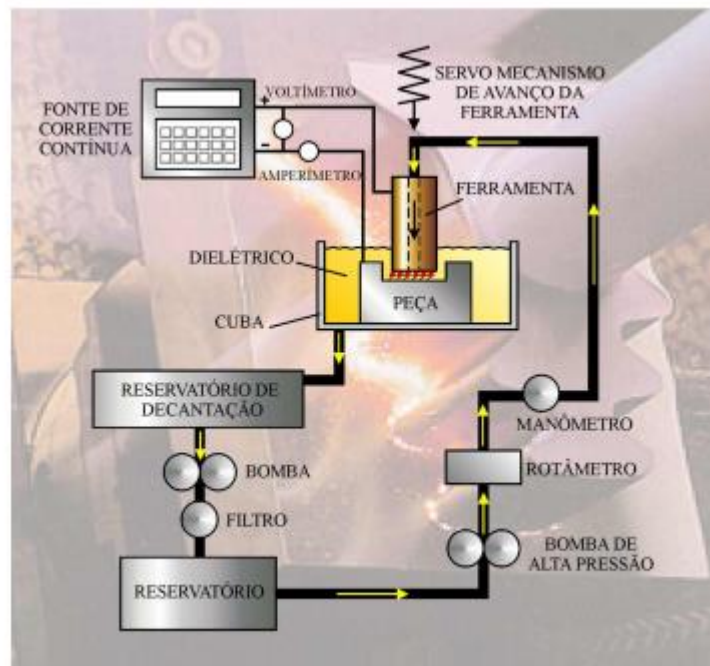
Muita das vezes, a camada refundida induz o surgimento de micro-trincas e/ou poros, isto porque tensões térmicas podem aparecer, portanto, remover a camada é essencial para que a peça mantenha uma integridade (FULLER, 1989).

De acordo com Arantes (FULLER, 1989) após a camada branca encontra-se a zona termicamente afetada pelo calor (ZAC), esta é uma região que é afetada pelas altas temperaturas do processo sendo capaz de temperar o eletrodo-peça, mas não chega a ter fusão.

3.3.6 Máquina de eletroerosão

Um equipamento de usinagem por descarga elétrica por penetração é composta em três sistemas, são eles, mecânico, elétrico e dielétrico. O sistema mecânico é o responsável pelo movimento relativo entre os eletrodos ferramenta e peça. O sistema elétrico é constituído pelo gerador de pulsos, sistema de controle de avanço da ferramenta e também pelos cabos de alimentação de energia elétrica. O sistema dielétrico por sua vez é constituído pelo reservatório, onde ocorre armazenagem do fluido, tanque de trabalho e pela moto bomba responsável pela alimentação do fluido (SILVA, 2012). A figura 5 mostra esquematicamente como é um equipamento de EDM.

Figura 5 - Representação esquemática de um equipamento de EDM



Fonte: (CAMARGO *et al*, 2009)

3.3.7 Fluidos dielétricos

Os fluidos dielétricos desenvolvidos especificamente para os processos EDM são construídos de óleos hidrocarbonetos altamente refinados ou sintéticos, água deionizada e até certas soluções aquosas (ARANTES *et al* 2003).

Inúmeras características físico-químicas são utilizadas para definir e identificar o desempenho de cada fluido. Estas características em um processo de eletroerosão podem ou

não influenciar o desempenho do processo. Resistividade dielétrica, ponto de fulgor, viscosidade e estabilidade a oxidação são as propriedades que influenciam no funcionamento do fluido (ARANTES *et al* 2003).

Os fluidos dielétricos possuem algumas funções segundo Silva (2012), eles devem apresentar alta rigidez dielétrica (para permanecer não condutor de eletricidade, e fazer com que a tensão máxima ajustada seja alcançada); deve-se deionizar rapidamente; e também uma boa capacidade de refrigeração pela baixa viscosidade (fluidez e troca de calor).

- Rigidez dielétrica (resistividade dielétrica): é a medida de capacidade de insulação de um determinado fluido para EDM (OLINIKI, 2009). Uma maior rigidez implica em uma menor distancia entre os eletrodos, conseqüentemente, aumentará a precisão da usinagem (SILVA, 2012).
- Tempo de deionização: este tempo esta relacionado ao tempo em que íons e elétrons se recombinaem depois de uma descarga elétrica. O tempo de deionização implica em altas TRM, como também diz que quanto menor ele for, menor será o Toff necessário entre os pulsos (ARANTES, 2007).
- Viscosidade: é uma medida de resistência ao escoamento do fluido. Quanto menor for a viscosidade, melhores serão as características de escoamento do fluido, relevante em camadas profundas (OLIKINI, 2009). Se a viscosidade for alta, pode apresentar um bom desempenho nas operações de desbaste (ARANTES *et al* 2003).
- Calor específico: quanto maior o calor específico, mais energia térmica pode acumular sem grande aumento na temperatura. O aumento da temperatura leva ao aumento da difusão de átomos da peça para o fluido, o que pode causar alterações significativas na estrutura do material ou até o surgimento de micro-trincas (SILVA, 2012).
- Condutividade térmica: Quanto maior a condutividade térmica do fluido, menor é o tempo necessário para solidificar e refrigerar as gotas de metal expelidas da zona de erosão. Este fato diminui as chances das partículas se aderirem ao eletrodo ou repositarem na superfície da peça (ARANTES *et al* 2003).

3.3.7.1 Água deionizada

Uma questão preocupante que se engloba nos dias atuais é o tipo de fluido que será utilizado no processo de EDM, isto por que os óleos hidrocarbonetados podem ser nocivos a saúde do operador e ao meio ambiente (INTECH EDM , 1996).

Á água deionizada é uma boa alternativa no processo de EDM, pois tem como característica ser reciclável, mais barata, não tóxica e também não tem problemas em relação a manuseio e estocagem (ARANTES, 2007).

3.4 Usinagem por Abrasivos

Segundo Ali e Wang (2011), um material pode ser removido ou deformado plasticamente devido o impacto de misturas de partículas abrasivas com um líquido sobre a superfície deste. Quando se deseja realizar uma usinagem (remoção de material), as partículas sólidas que estão diluídas em um fluido são arrastadas por este fluido, adquirindo parte da energia cinética deste fluido. As partículas sólidas apresentam-se irregulares, assim, com a velocidade apresentada, na hora do impacto com a superfície formam uma cratera permanente. Por fim, tem-se o corte que é obtido pela superposição das crateras produzidas por varias partículas. O aumento da pressão aumenta a velocidade das partículas.

Coseglio (2009) relatou que três características influenciam as taxas de desgaste por partículas duras, são eles: a dureza, o tamanho e a forma. Segundo ele, o mecanismo de desgaste operante é determinado pela razão entre a dureza do abrasivo e a dureza da superfície e consequentemente pela taxa de remoção de material.

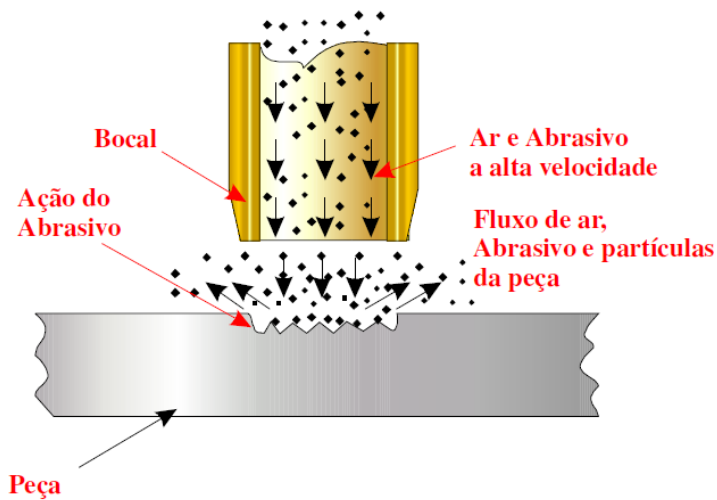
Em relação ao tamanho, quanto maior o tamanho das partículas abrasivas, maior será a rugosidade apresentada, a TRM também tem influencia sobre o tamanho, quanto maior o tamanho das partículas, maior a TRM, até certo ponto (aproximadamente 75 μ m) senão a TRM começa a declinar. A pressão exerce influência de modo que quanto maiores os valores das pressões, maiores serão as velocidades que as partículas abrasivas atingirão a superfície do material, sendo assim uma quantidade maior de energia será liberada no impacto resultando em uma taxa maior de remoção de material (ARANTES, 2007).

3.4.1 Usinagem por Jato Abrasivo (AJM)

O processo de *Abrasive Jet Machining* (AJM) se da pela remoção de material em uma superfície por meio de ação das partículas abrasivas misturadas em um fluxo de gás a alta velocidade (SILVA, 2012).

A figura 6 é uma representação esquemática do processo de AJM.

Figura 6-Representação esquemática de um processo AJM

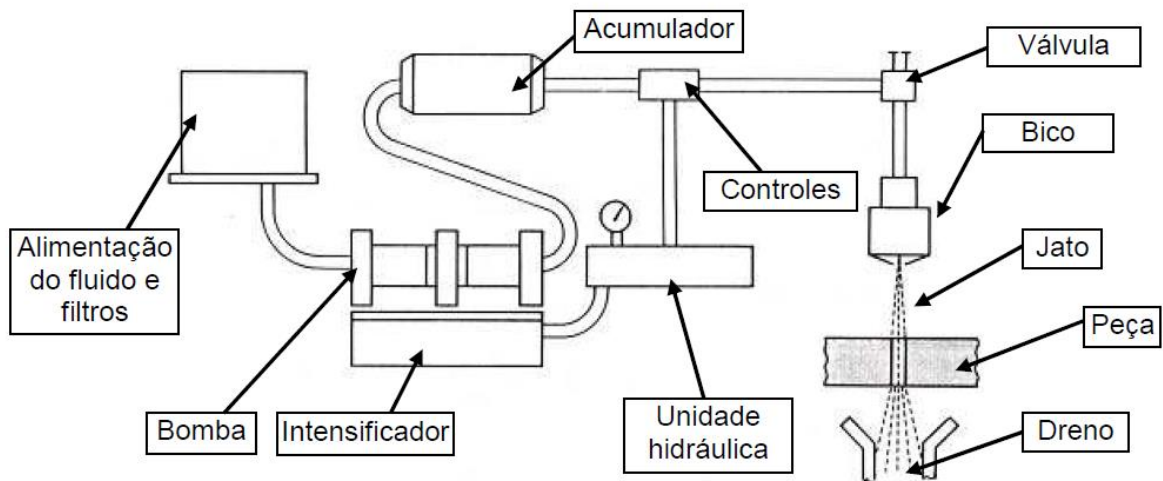


Fonte: (TUERSLEY et al, 1994)

3.4.2 Usinagem por Jato de Água (WJM)

A Usinagem por Jato de Água pode ser entendido com um processo em que ocorre desenvolvimento, transmissão e aplicação de força. Uma bomba empurra determinado volume de água por meio de uma linha de alimentação em alta pressão liberando uma energia no final do processo. A água irá fluir através de um tubo até um bocal de injeção. Este bocal possuirá furos de diâmetros muitas vezes menores que o do furo da linha de alimentação. Um volume constante de água deve passar por orifícios que servem para direcionar a água sob forma de jato a superfície, ocorrendo aumento da velocidade da água e conseqüente aumento da energia cinética dissipada na peça (ARANTES, 2007). A figura 7 representa o funcionamento de WJM.

Figura 7- Esquema de montagem do processo WJM



Fonte: (FULLER, 1989)

3.4.3 Usinagem por Jato de Água Abrasivo (AWJM)

O processo de Usinagem por Jato de Água Abrasivo se dá pela combinação de dois processos, sendo eles a Usinagem por Abrasivo e Usinagem por Jato de Água. A finalidade deste processo híbrido é unir o desgaste abrasivo causado pelas partículas sólidas e a ação erosiva da água em um processo sob pressão que causa remoção do material. O AWJM é indicado para corte e perfuração de materiais duros (BENEDICT, 1987).

Segundo Fuller (1989) quando se utiliza a água como fluxo, o processo torna-se limitado. Dados experimentais de Arantes (2007) envolvendo fluidos como água deionizada, querosene e óleo mineral mostra que a água deionizada por apresentar alta fluidez possui alta capacidade de penetração em pequenas arestas, o que torna positivo ao processo de lavagem, porém seu uso torna-se limitado, devido a apresentar baixa densidade. A baixa densidade gera menor pressão no canal de plasma, diminuindo a capacidade térmica das descargas, consequentemente diminuindo também a taxa de remoção de material.

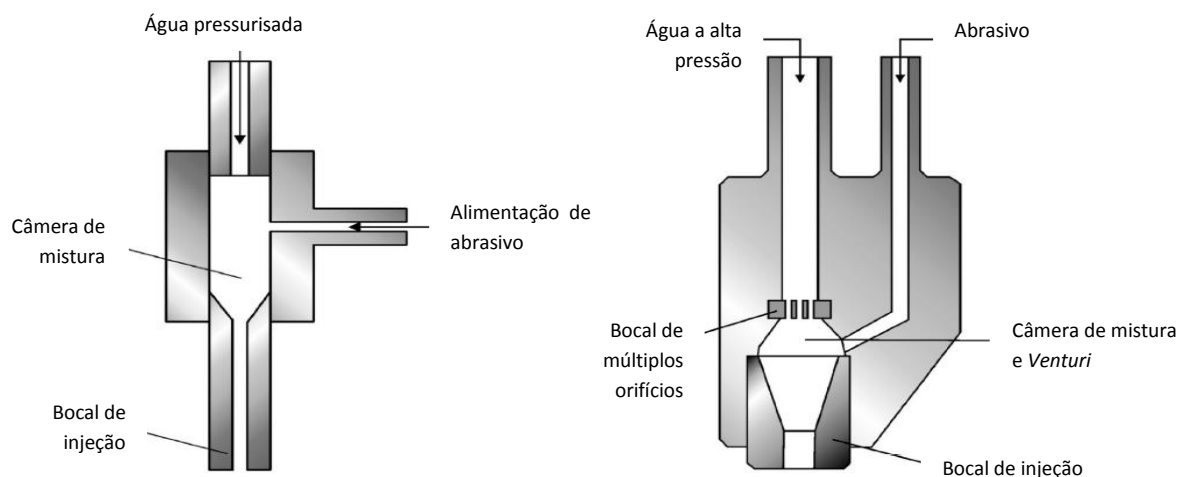
O processo de adição de abrasivos em jatos de água a alta pressão gerou um processo complexo em materiais dúcteis, sendo este mecanismo uma mistura de microfratura, erosão e fusão (CHEN; SIORES, 2001).

Os parâmetros que influenciam no processo AWJM são:

- pressão do jato de água;
- distância entre a peça e o bocal de injeção;
- material do abrasivo;
- fluxo do abrasivo;
- ângulo de ataque;
- sistema *Venturi*;

Em uma câmara, o abrasivo é misturado com a água, logo depois do bico de injeção, antes do orifício de saída do jato. A esse sistema denomina-se sistema de *Venturi*, onde seu principal objetivo é puxar as partículas abrasivas (ARANTES, 2007). A figura 8 representa o sistema *Venturi*.

Figura 8 -Corte de duas câmaras de mistura do sistema *Venturi*



Fonte: (SUMMERS, 1995) (Adaptada)

3.4.4 Processo híbrido de usinagem AJEDM

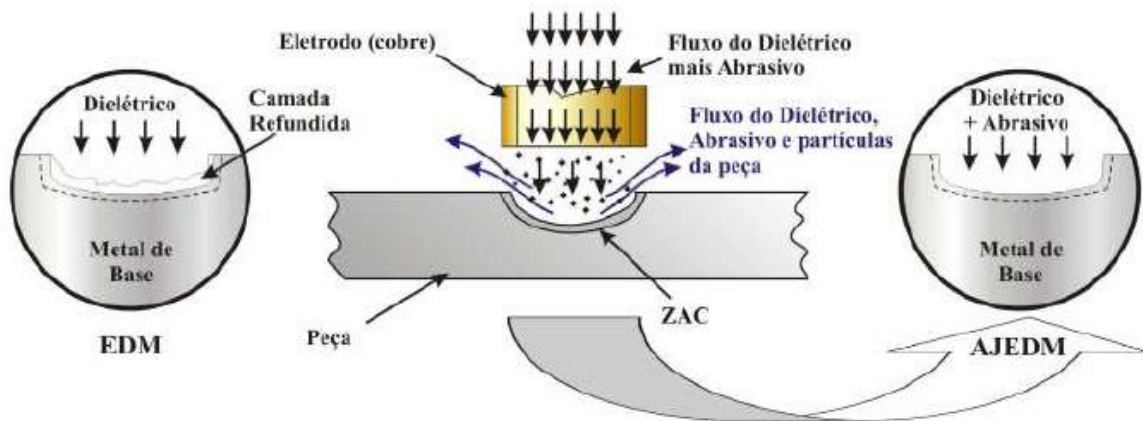
A combinação das técnicas de Usinagem de Descargas Elétricas e Erosão Abrasiva forma um processo híbrido de usinagem AJEDM (ARANTES, 2007).

O processo híbrido de usinagem une as características dos processos. Deste modo, na usinagem AJEDM efeitos como a interação térmica, o qual está presente na EDM e a assistência mecânica presente no AWJM faz com que a usinagem por AJEDM torna-se

viável, promovendo uma melhor dispersão das descargas elétricas e ações erosivas, que juntas constituem em uma maior taxa de remoção de material (ARANTES, 2007).

A camada refundida, não é desejada pois ela influencia na resistência mecânica na superfície da peça usinada, reduzindo-a. No processo EDM, a camada refundida sempre está presente devido a velocidade do fluido dielétrico ser pequena, de forma que algum material irá se solidificar quando estiver sobre uma superfície usinada. Ao aplicar jato abrasivo juntamente ao processo de EDM, mesmo que a superfície apresentará a camada refundida, esta será atenuada pela ação das partículas erosivas presentes no jato erosivo (RASLAN e ARANTES, 2009). A figura 9 retrata o princípio de usinagem híbrida AJEDM.

Figura 9 - Princípio de usinagem híbrida AJEDM.



Fonte:(RASLAN e ARANTES, 2009)

A presença da água deionizada torna-se o processo mais barato, pois os fluidos dielétricos são caros, e dependendo do processo ao qual estão submetidos, as condições de operação do equipamento, eles podem degradar (RASLAN e ARANTES, 2009). A água deionizada tem como desvantagem, não concentrar bem as descargas elétricas, diminuindo a eficiência do processo e conseqüentemente deixando-o mais lento. Porém as partículas abrasivas que em conjunto com a água deionizada faz com que o processo seja mais eficiente (rápido), e mais barato (FERNANDES, 1999).

Duas desvantagens foram analisadas no processo AJEDM segundo Arantes (2007), dentre elas estão o fato de que as partículas abrasivas podem danificar o equipamento de eletroerosão, portanto as máquinas devem ser protegidas e um sistema de filtragem de fluido mais abrasivo deve apresentar de forma adequada. Outro fato que requer cuidado é a ferramenta (cobre) a qual deve ser protegida internamente, pois é provável que ela sofra desgastes consideráveis devido ao ângulo de ataque ser de 180°.

CAPÍTULO III

4.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

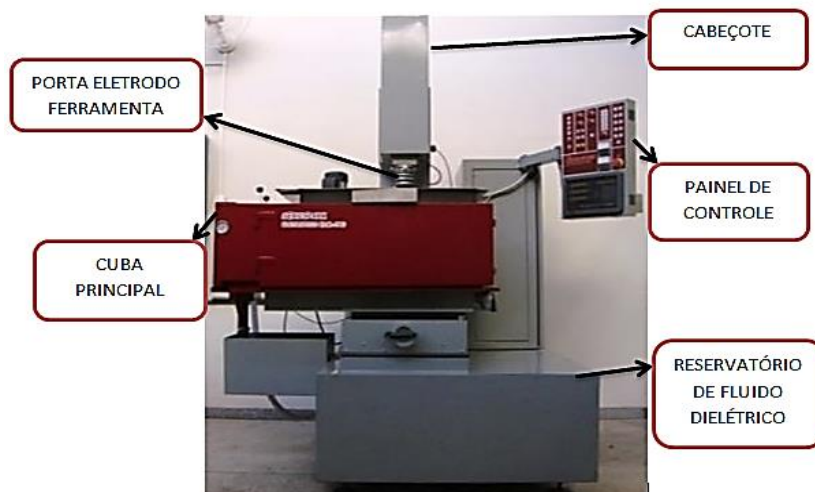
Para uma divisão mais coesa e uma melhor compreensão durante o trabalho, este foi dividido em quatro etapas as quais serão citadas a seguir:

- primeira etapa: processo de desenvolvimento do projeto, adaptações na maquinaria e introdução do sistema *venturi*;
- segunda etapa: testes iniciais;
- terceira etapa: preparação das amostras para posterior análise no MEV;
- quarta etapa: análise de resultados.

4.1 Adaptações na máquina EDM

Na pesquisa em questão a máquina de EDM teve que sofrer adaptações para que se pudesse garantir os melhores resultados no trabalho. A máquina de EDM, SERVSPARK Eletroplus EDM- 540/340 representada na figura 10 juntamente com uma hidrojateadora de 120 bar possibilitaram a utilização da água deionizada como um fluido dielétrico, sendo ela na forma de um jato sob pressão com fluxo de partículas abrasivas misturadas e alimentadas através de um bico de *venturi*.

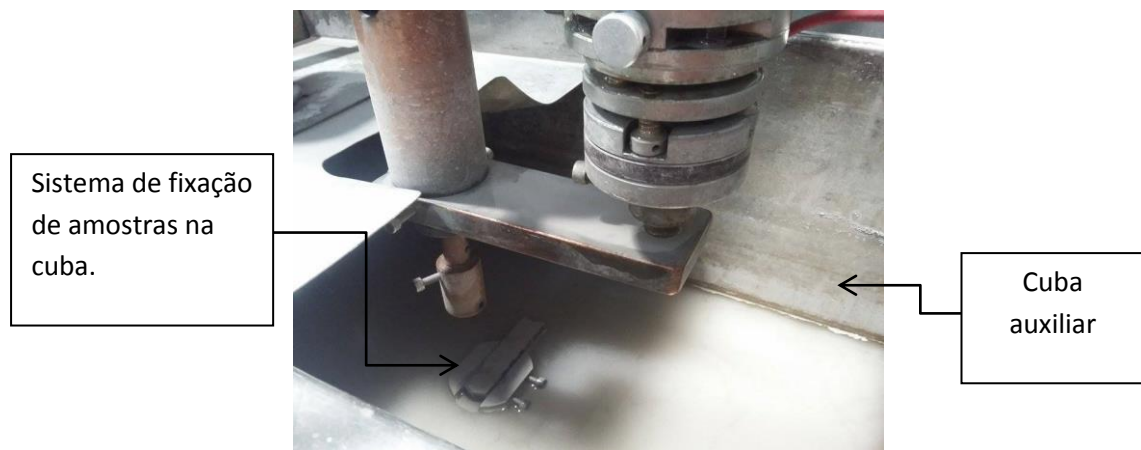
Figura 10- Máquina de eletroerosão e suas partes principais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas adaptações, utilizou-se uma cuba auxiliar para que o fluido dielétrico pré existente na máquina, óleo mineral, não contaminasse. Segundo Silva (2012), a cuba foi feita de aço inoxidável AISI 304 para que a água gerada no processo não oxidasse a cuba. A cuba foi projetada com um sistema para a fixação das amostras, como segue a figura 11. Uma tampa para proteção também foi utilizado.

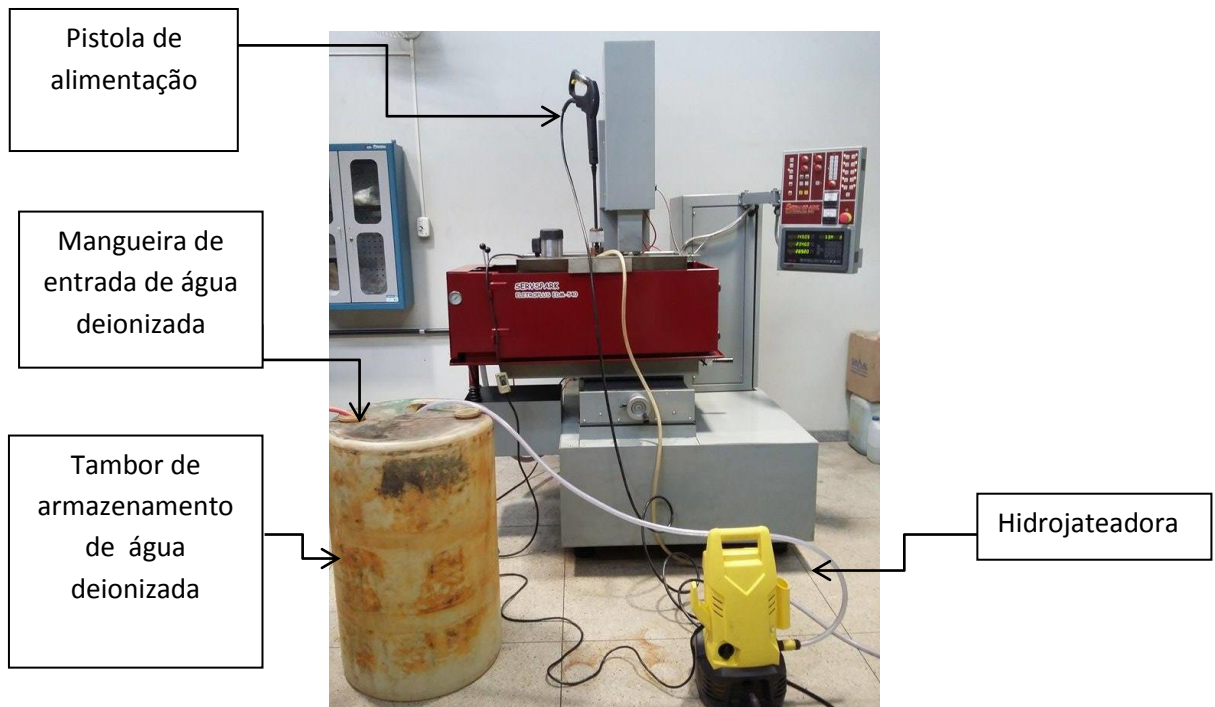
Figura 11 – Cuba auxiliar desenvolvida para adaptação da máquina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outra adaptação realizada foi o sistema de alimentação de água deionizada, ele foi composto pelo aparelho deionizador, tambor para armazenamento de água (com capacidade de 200l), pressão nominal da hidrojateadora, pistola, mangueira e as conexões. Na figura 12 são indicados os principais componentes deste sistema.

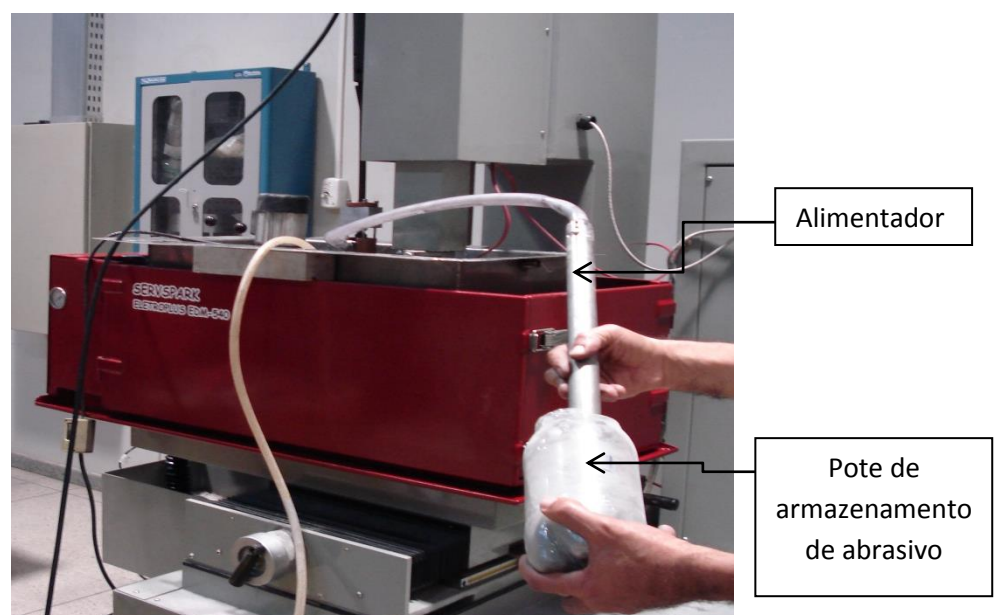
Figura 12– Sistema de adaptação para alimentação de água deionizada



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a alimentação do abrasivo o sistema em questão foi composto pelo alimentador, potes para armazenamento de abrasivo, mangueira e as conexões, apresentados na figura 13.

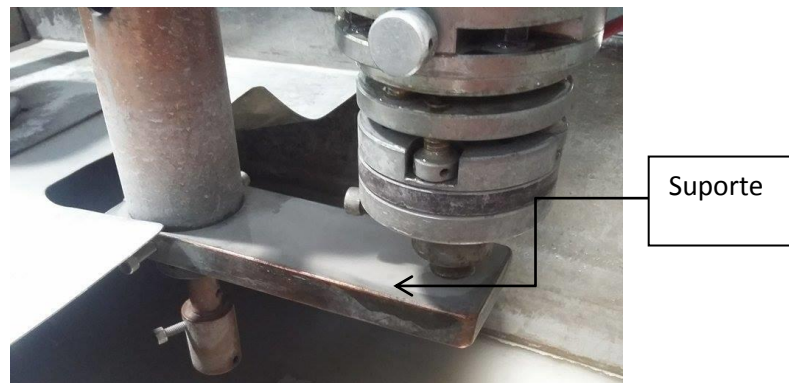
Figura 13- Sistema de alimentação do abrasivo



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 14 mostra um suporte utilizado para a adaptação do bico *venturi* e o posicionamento do eletrodo-ferramenta o qual foi fixado no cabeçote da máquina EDM.

Figura 14 - Suporte para adaptação do bico venturi e posicionamento do eletrodo-ferramenta



Fonte: Elaborado pelo autor

Na tampa foi instalada uma bomba centrífuga, que tem como função esvaziar a cuba para que não ocorresse transbordamento de água nos testes posteriores. No processo, a mistura de água e abrasivo formados foram utilizados para reaproveitamento do abrasivo, fazendo com que este fosse secado ao ar livre, para posterior reutilização. A figura 15 a seguir mostra a bomba centrífuga e seu posicionamento.

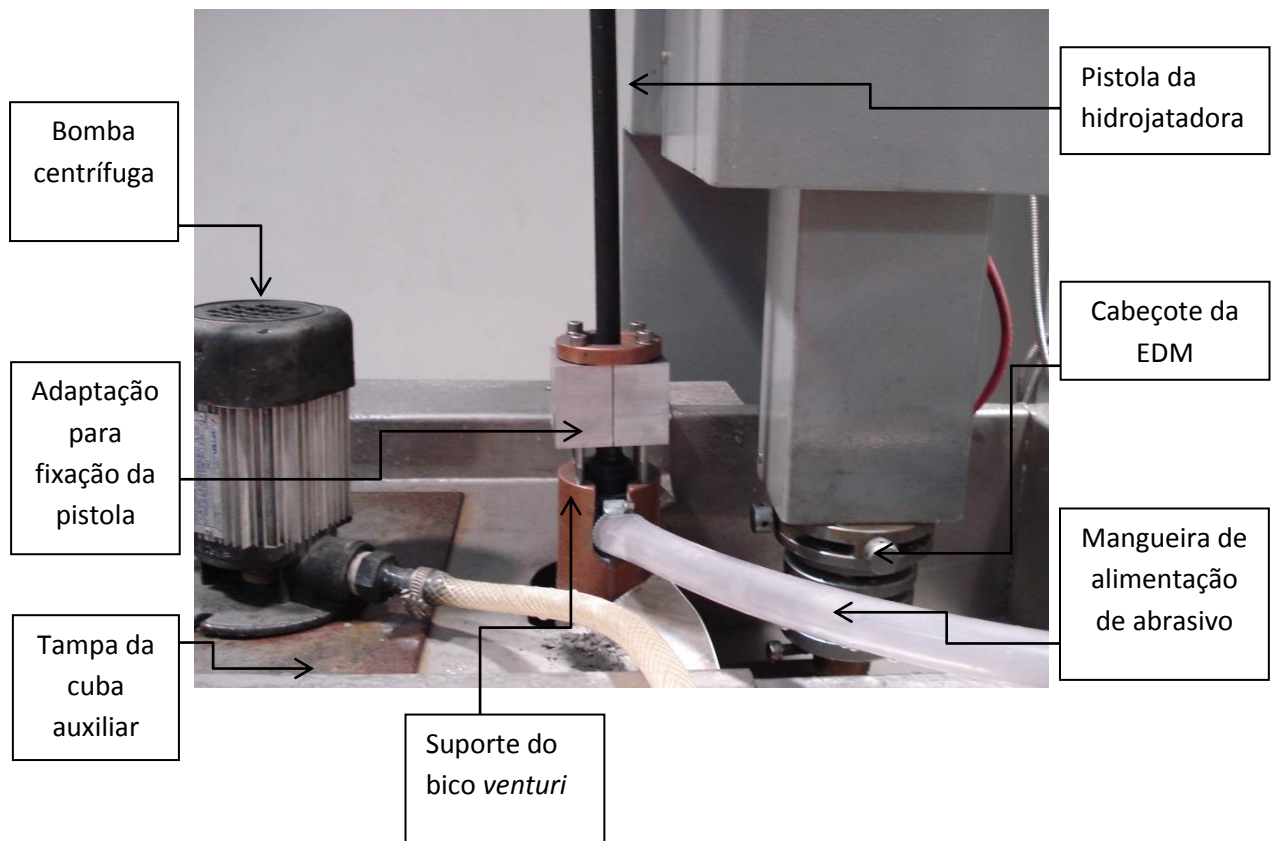
Figura 15 – Bomba centrífuga para esvaziamento de água mais abrasivo da cuba.



Fonte: Elaborada pelo autor

Em uma visão geral, temos na figura 16 uma foto das adaptações que ocorreram no cabeçote da máquina, podendo destacar a bomba centrífuga, a pistola da hidrojateadora a qual esta conectada a um suporte onde encontra-se o bico *venturi* e a mangueira para alimentação do abrasivo.

Figura 16- Adaptações no cabeçote da máquina de EDM



Fonte: Elaborada pelo autor

4.2 Seleção dos testes

As adaptações necessárias para a realização do processo híbrido de usinagem AJEDM, possibilitaram a realização dos testes, os quais ocorreram em uma duração de 5 minutos cada, sendo que a cada condição os testes foram realizados por três vezes. O consumo de água gasto em cada teste foi calculado sendo 27,5 litros, onde a vazão de trabalho da hidrojateadora foi fixada pelo fabricante em 330 litros por hora. Foi medido a condutividade da água anteriormente a realização dos testes com um condutímetro, o qual mostrou ela sendo 0 μS conforme a figura 17.

Figura 17– Medição da condutividade da água deionizada através do condutivímetro.

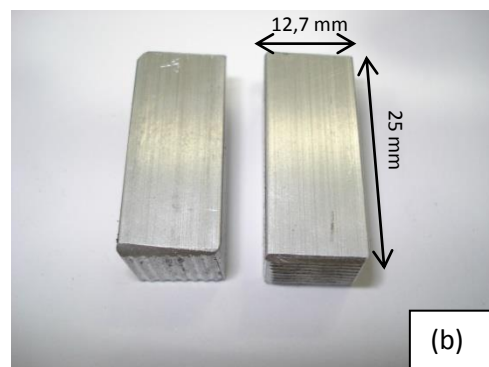
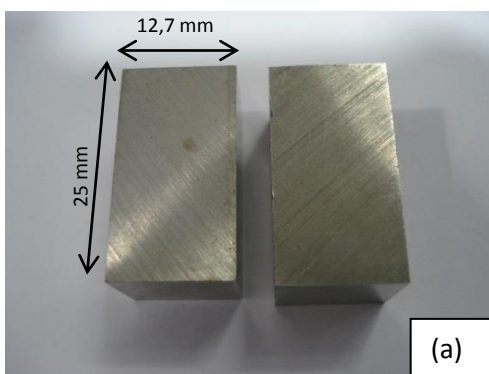


Fonte: Elaborado pelo autor

Para medição da quantidade de partículas abrasivas consumidas no processo, estas foram pesadas anteriormente e posteriormente à realização dos testes.

A figura 18 apresenta respectivamente amostras de barras de aço AISI M2 e alumínio que foram cortadas em seções transversais quadrada de lado 12,7 mm possuindo 25 mm de comprimento cada.

Figura 18– Amostra de aço AISI M2 (a) e alumínio (b) utilizadas para o processo de AJEDM



Fonte: Elaborado pelo autor.

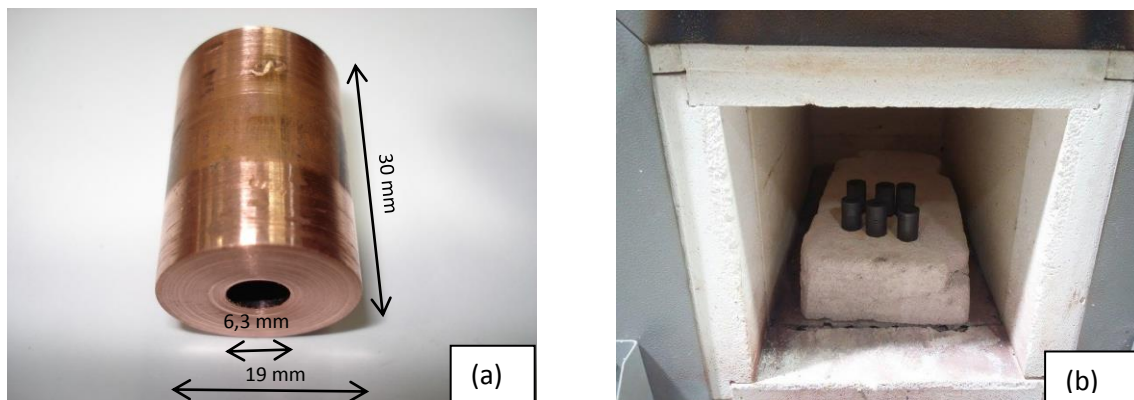
4.2.1. Materiais para eletrodo ferramenta

Na escolha de materiais para serem utilizados como eletrodo ferramenta, materiais que possuíam características de boa condutividade elétrica e ponto de fusão considerável, bem como uma boa resistência mecânica foram selecionados. Tais características são importantes para a escolha de um eletrodo ferramenta neste trabalho por se tratar de um processo de usinagem mista envolvendo EDM e jato de água com abrasivos.

Os materiais cobre e grafita foram então selecionados para a confecção do eletrodo ferramenta. Estes possuindo diâmetro externo de 19 mm e interno de 6,3 mm com comprimento de 30 mm.

A figura 19 mostra uma fotografia dos eletrodos utilizados, sendo o de cobre e posteriormente o de grafita. Para melhor obtenção dos resultados, os eletrodos de grafitas foram secados em forno a 300°C durante 3 horas para que a umidade presente fosse evaporada, garantindo melhor confiabilidade na pesagem do eletrodo.

Figura 19 – Eletrodos de cobre (a) e grafita (b) utilizados para o processo de AJEDM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Seleção dos abrasivos

Dois tipos de abrasivos foram selecionados e misturados para que pudessem ser utilizados no experimento. Os abrasivos utilizados foram o carboneto de silício (SiC) na granulometria 600 mesh e o óxido de alumínio (Al_2O_3) na granulometria 1000 mesh.

Decidiu-se fazer a mistura dos abrasivos devido a disponibilidade dos mesmos no laboratório.

4.3 Parâmetros da máquina de EDM

De acordo com Silva (2012), a qualidade da superfície usinada e o rendimento da operação tem uma relação direta com a corrente da descarga elétrica do processo, pois segundo ele quando se obtém uma corrente baixa e pouca taxa de remoção de material em um tempo de usinagem maior, a qualidade da superfície será melhor. A corrente ajustada foi de 40 A, capacidade máxima nominal da máquina.

O regime de usinagem foi o de debaste médio e os ensaios realizados foram com os eletrodos com polaridade positiva. A tabela 1 mostra os parâmetros ajustados para a realização dos testes. Os valores de tensão são variáveis e foram expressos na máquina durante a operação. T_{on} expressa o tempo ativo da corrente, T_s expressa a intensidade da corrente. DT relaciona os tempos de pausa (T_{off}) com o tempo de duração do pulso (T_{on}) de acordo com a equação 2. O valor do *Gap* foi ajustado diretamente no painel da máquina.

$$DT = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \times 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

Tabela 1- Parâmetros de EDM usados nos testes.

Parâmetros	Medida	Unidade
Tensão	40 - 70	V
Corrente	40	A
Ton	200	μs
Toff	75	μs
DT	72,7	%
Gap	Variável	Mm

Fonte: Elaborada pelo autor.

*Os valores foram ajustados na máquina durante a realização do primeiro teste.

4.4 Parâmetros ou aspectos avaliados

Nos experimentos, os eletrodos-ferramentas de cobre e grafita, as amostras de aço AISI M2 e alumínio, e os abrasivos SiC e Al₂O₃ foram pesados três vezes antes e depois da

realização de cada teste. Foi utilizada uma balança eletrônica com capacidade máxima de 210 gramas com resolução de 10^{-4} .

Para determinar a variação de massa antes e após os testes, foi calculada a diferença de massa inicial e final conforme a equação 3:

$$\Delta m = m_i - m_f \quad (3)$$

onde m_i corresponde a massa inicial e m_f a massa final.

No cálculo da taxa de remoção de material na peça, a equação 4 foi utilizada, considerando que a TRM é expressa em mm^3/min .

$$\text{TRM} = \frac{\Delta m}{\gamma \cdot t} \quad (4)$$

Considerando que Δm é a variação de massa em gramas, γ é uma constante que determina o peso específico da amostra (para a amostra do aço AISI M2 seu peso específico é $0,00768 \text{ g/mm}^3$ e do alumínio é $0,0027 \text{ g/mm}^3$) e t o tempo em minutos de realização do teste.

Para o cálculo da taxa de desgaste na ferramenta, a equação 5 foi utilizada como segue abaixo:

$$\text{TD} = \frac{\Delta m}{\gamma \cdot t} \quad (5)$$

Considerando que Δm é a variação de massa em gramas, γ é uma constante que determina o peso específico do material utilizado para ser eletrodo-ferramenta (para o eletrodo de cobre seu peso específico é $0,00890 \text{ g/mm}^3$ e de grafita é $0,00225 \text{ g/mm}^3$) e t o tempo em minutos de realização do teste.

Após a determinação de TRM e TD calcula-se então o desgaste volumétrico relativo que é expresso normalmente em porcentagem (%) de acordo com a equação 6.

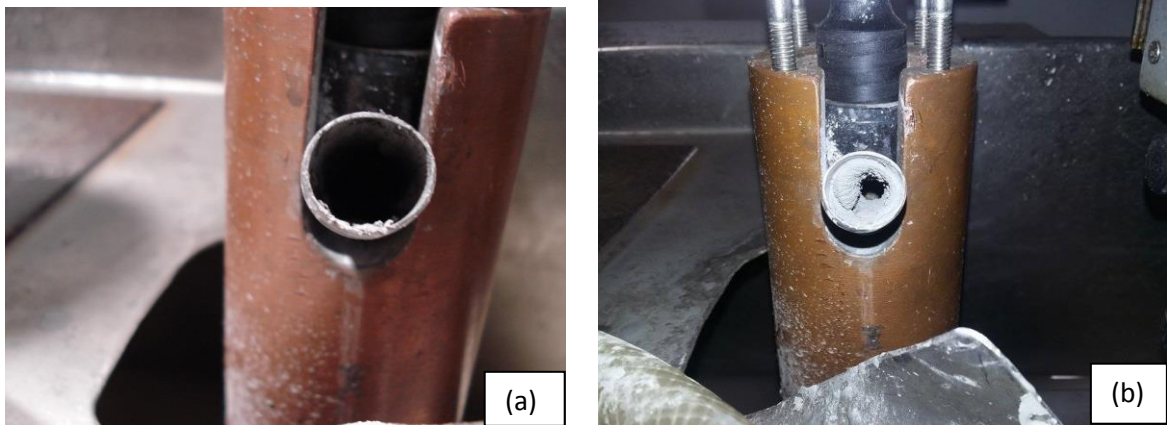
$$\text{DRV} = \frac{\text{TD}}{\text{TRM}} \times 100 \quad (6)$$

Para a visualização da camada refundida foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV). A preparação das amostras para a visualização no MEV (modelo Superscan SSX-550 da SHIMADZU) se deu de modo que primeiro elas foram lixadas em uma sequência de lixas (80, 120, 180, 320, 400 e 600 mesh), polidas e sofreram um ataque químico com Nital.

Em relação a alimentação de abrasivos, estes não podem ser de forma excessiva, pois o excesso pode causar curto circuito na fenda de trabalho como também o entupimento do

bico alimentador. O fato da alimentação do abrasivo ter sido um processo mecânico, não gera controle sobre a quantidade das partículas. Ao final de cada teste então, o bico de alimentação de abrasivo foi limpo, para que todos os testes começassem com as mesmas condições e que não gerasse entupimento. A figura 20 abaixo mostra o bico de entrada de abrasivo antes (a) e após os testes (b)

Figura 20 - Bico de alimentação de abrasivo antes (a) e após os testes (b)



Fonte: Elaborada pelo autor

Com o intuito de preservar a camada refundida, os testes foram realizados em pares, de modo que as cavidades usinadas ficaram uma de frente para a outra. As amostras não foram embutidas, pois para a análise no MEV o embutimento teria que ser quebrado e ao realizar esta ação pode ser que a camada refundida quebre.

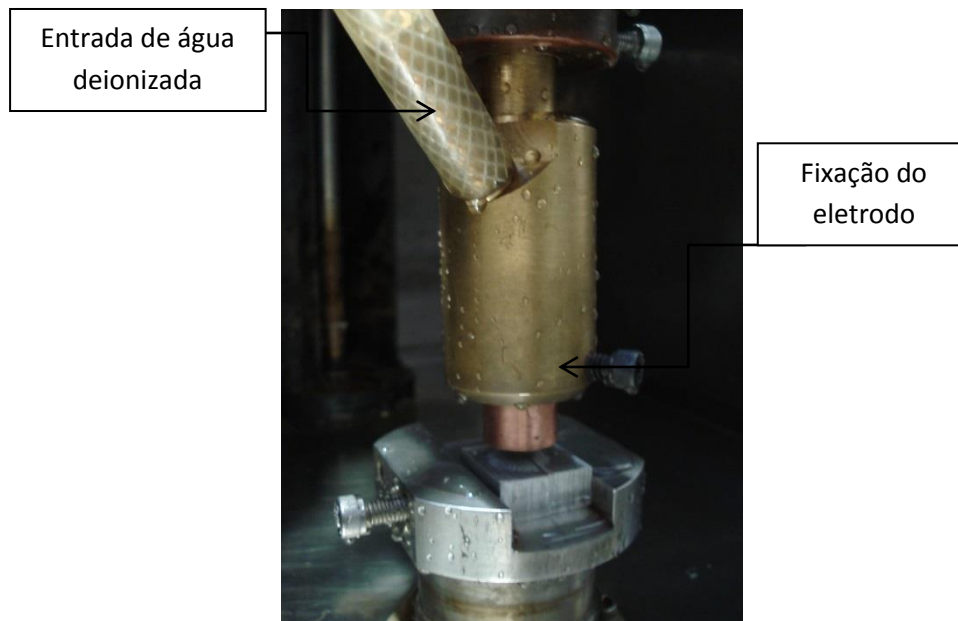
4.5 Testes de EDM sem pressão

Outra gama de testes foi realizada para que se pudesse analisar a efeito comparativo. Nestes testes, a pressão utilizada no processo foi a pressão nominal da máquina de EDM, 0,2 bar, (mesma máquina utilizada para realizar o processo AJEDM), portanto diz que o processo foi uma usinagem sem bombeamento.

Nesta etapa não utilizou os abrasivos SiC e Al_2O_3 e o fluido dielétrico continuou sendo a água deionizada, portanto manteve o uso da cuba auxiliar para proteção da máquina.

A máquina foi adaptada com um suporte para a amostra conforme a figura 21.

Figura 21- Suporte para amostra para a usinagem de alumínio sem pressão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram utilizadas 6 amostras do alumínio sendo que 3 delas foram direcionadas para fazer o teste com eletrodo de cobre as outras 3 com o eletrodo de grafita.

Cada teste teve duração de 5 min cada, os parâmetros do processo mantiveram os mesmos realizados dos testes anteriores (tensão, corrente, T_{on} , T_{off} e gap).

A preparação das amostras para micrografia também foram as mesmas, assim como os parâmetros a serem avaliados posteriormente (TRM, TD, DRV e camada refundida).

CAPÍTULO IV

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dados obtidos nos testes juntamente com algumas discussões serão descritas nos item abaixo.

5.1 Avaliações do processo com pressão de 120 bar

Para que se pudesse determinar a média de TRM, TD e DRV, valores individuais de cada amostra e o desvio padrão foram calculados, como segue nas tabelas 2 a 4. Para análise de TRM, após este cálculo foi elaborado o gráfico 1.

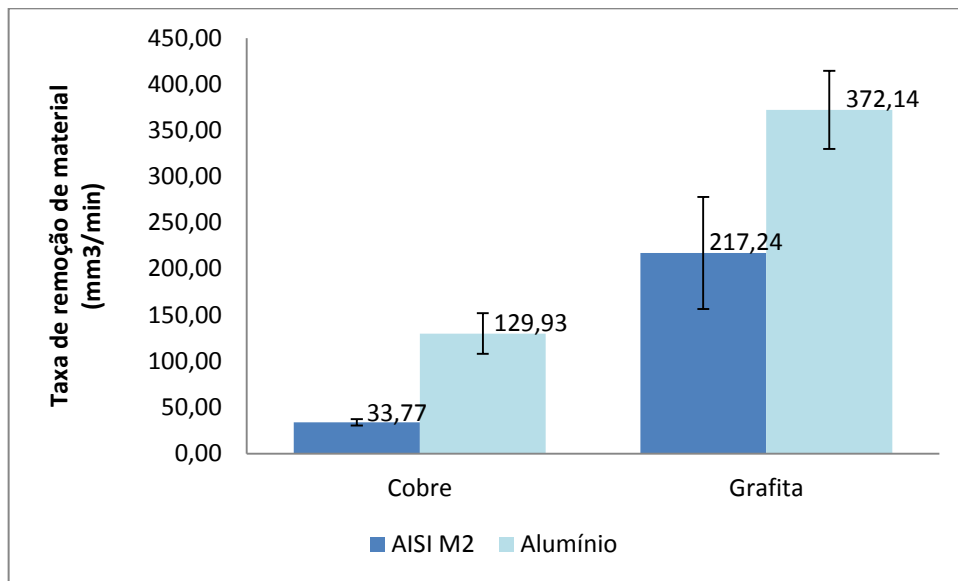
Em relação a TRM, pode-se observar que ao utilizar o eletrodo de grafita obteve taxas maiores comparadas ao eletrodo de cobre, tanto para a peça de aço AISI M2 quanto para a peça de alumínio, como também observar que o alumínio sofreu maior TRM.

Tabela 2- TRM e desvio padrão para amostras de aço AISI M2 e alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita.

Eletrodo	AISI M2			Alumínio		
	Am 1	Am 2	Am 3	Am 4	Am 5	Am 6
Cobre	30,28	33,78	37,24	139,71	104,75	145,34
Grafita	262,14	148,15	241,43	415,70	331,47	369,25
Média TRM (mm³/min)	Cobre: 33,77 ±3,48			129,93 ± 21,99		
	Grafita: 217,24 ± 60,72			372,14 ± 42,19		

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Gráfico 1- TRM e desvio padrão contendo amostras de aço AISI M2 e alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita na pressão 120 bar.



Fonte: Elaborado pelo autor

Calcula-se agora a média da taxa de desgaste de acordo com sua respectiva fórmula utilizando as medidas individuais de TD. Os resultados estão abordados na tabela 3 e o gráfico 2 foi desenvolvido para análise.

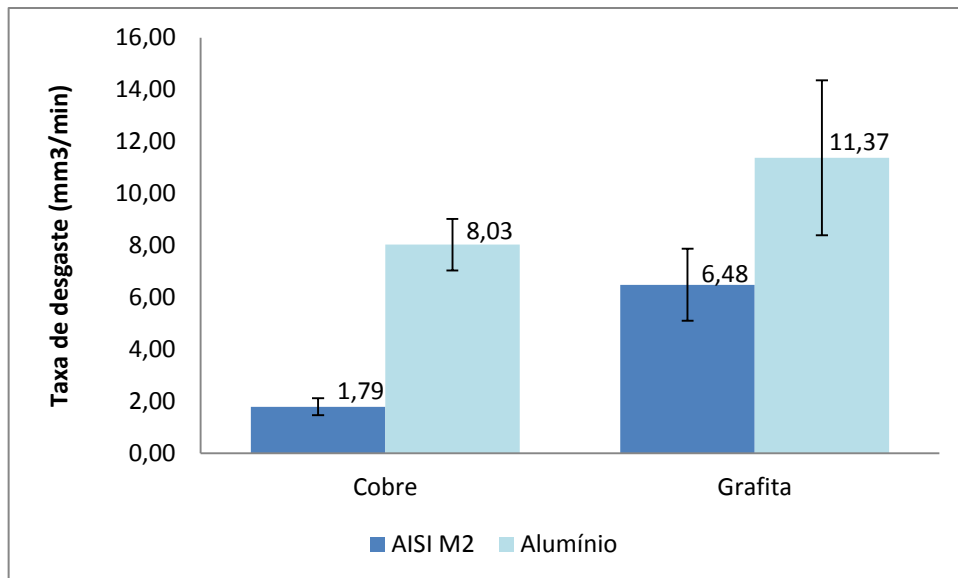
Pode-se observar através dos resultados plotados no gráfico que o desgaste da ferramenta foi maior ao usinar peças de alumínio.

Tabela 3- TD e desvio padrão para amostras de aço AISI M2 e alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita na pressão 120 bar.

Eletrodo	AISI M2			Alumínio		
	Am 1	Am 2	Am 3	Am 4	Am 5	Am 6
Cobre	1,42	1,89	2,05	8,78	6,90	8,39
Grafita	7,01	5,25	7,19	11,85	11,06	11,19
Média TD (mm³/min)	Cobre: 1,79 ± 0,33			8,03 ± 0,99		
	Grafita: 6,48 ± 1,38			11,37 ± 2,98		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 - TD e desvio padrão contendo amostras de aço AISI M2 e Alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita na pressão 120 bar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação à DRV, dados individuais de DRV foram obtidos e expressos na tabela 4 para calcular o DRV médio e desvio padrão, e, por conseguinte plotar o gráfico 3 para posterior análise.

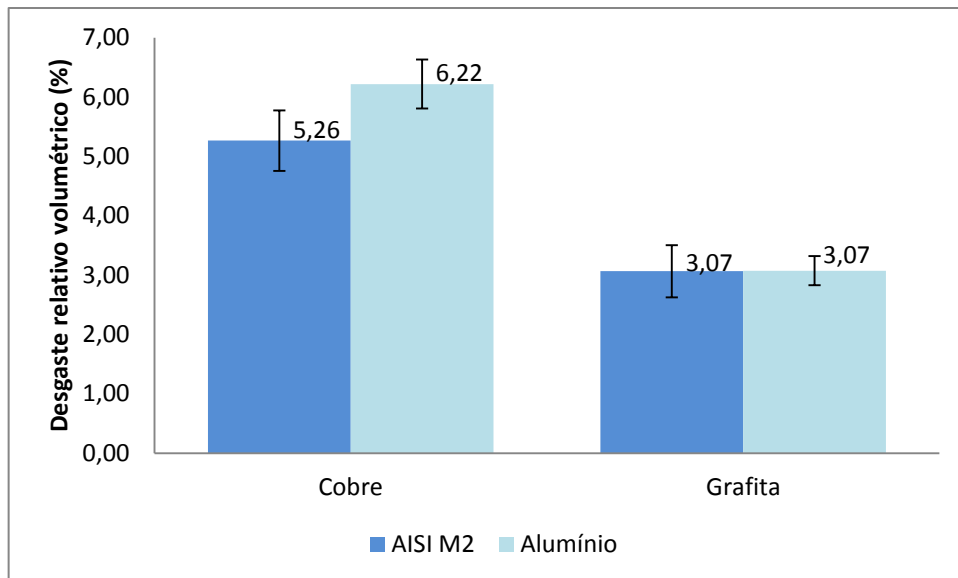
Através da análise pode-se observar que os melhores comportamentos se deram quando utilizou eletrodo de grafita.

Tabela 4- DRV médio e desvio padrão para amostras de aço AISI M2 e alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita.

Eletrodo	AISI M2			Alumínio		
	Am 1	Am 2	Am 3	Am 4	Am 5	Am 6
Cobre	4,68	5,60	5,51	6,29	6,59	5,77
Grafita	2,68	3,54	2,98	2,85	3,34	3,03
Média DRV (%)	Cobre: 5,26 ± 0,51			6,22 ± 0,41		
	Grafita: 3,07 ± 0,44			3,07 ± 0,25		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 3- DRV e desvio padrão contendo amostras de aço AISI M2 e alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita na pressão 120 bar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos dados apresentados e observando as características dos materiais listadas na tabela 5 pode-se discutir os resultados apresentados fazendo algumas considerações como será discutido a seguir.

Tabela 5- Condutividade elétrica e propriedades mecânicas dos eletrodos-peça e eletrodo-ferramenta.

	Material	Condutividade elétrica, σ [S.m/mm ²]	Ponto de fusão, T_f [°C]	Dureza	Peso específico [g/mm ³]
Ferramenta	Cobre	61,7	1080	100 HV	0,00890
	Grafita	0,07	3550	40 HV	0,00225
Peça	AISI M2	8,94	1560	800 HV	0,00768
	Alumínio	28,07	660	95 HB	0,00276

Fonte: (Alumicopper); SILVA (2012)

Silva (2012) realizou estudos referentes aos eletrodos que melhor poderiam ser utilizados neste processo de AJEDM e concluiu que os melhores seriam o cobre e grafita. Ambos utilizados nos testes deste trabalho. Os principais parâmetros para a seleção de um eletrodo ferramenta também de acordo com ele são a condutividade elétrica e o ponto de fusão. A grafita tem como vantagem possuir maior ponto de fusão, tendo maior resistência ao dano térmico e o cobre elevada condutividade elétrica.

O grafita, possuindo elevada resistência ao dano térmico caracteriza por ser um melhor eletrodo comparado ao cobre, mas devido ao seu preço ser superior e o cobre possuir boas características como eletrodo já que ele possui elevada condutividade também pode ser utilizado como bom eletrodo. (SILVA, 2012)

Observou-se que se tratando dos ensaios realizados o eletrodo de grafita provocou maior taxa de remoção de material e melhor relação de desgaste relativo volumétrico, em ambos materiais.

A usinagem do alumínio foi mais significativa, tendo esta maior TRM. Considerando que os ensaios foram realizados sob as mesmas condições é considerável dizer que a densidade influencia na usinagem dos materiais. Alumínio possui baixa densidade e menor dureza comparada ao aço AISI M2, portanto, ao incidir o fluido dielétrico e as partículas abrasivas juntamente com a descarga elétrica provocada pela eletroerosão, partículas do material são mais facilmente arrancadas, conseqüentemente provocará maior TRM. Além disso, a maior condutividade elétrica do alumínio favorece o processo termoeletrico.

5.1.1 Desempenho dos abrasivos

A tabela 6 representa dados de pesagem da variação de massa (em gramas) de abrasivo realizado em cada teste, em um período de 5 min, assim como a média desta variação de massa para cada eletrodo e respectiva peça e desvio padrão dos mesmos. O gráfico 4 foi construído com base nestes dados.

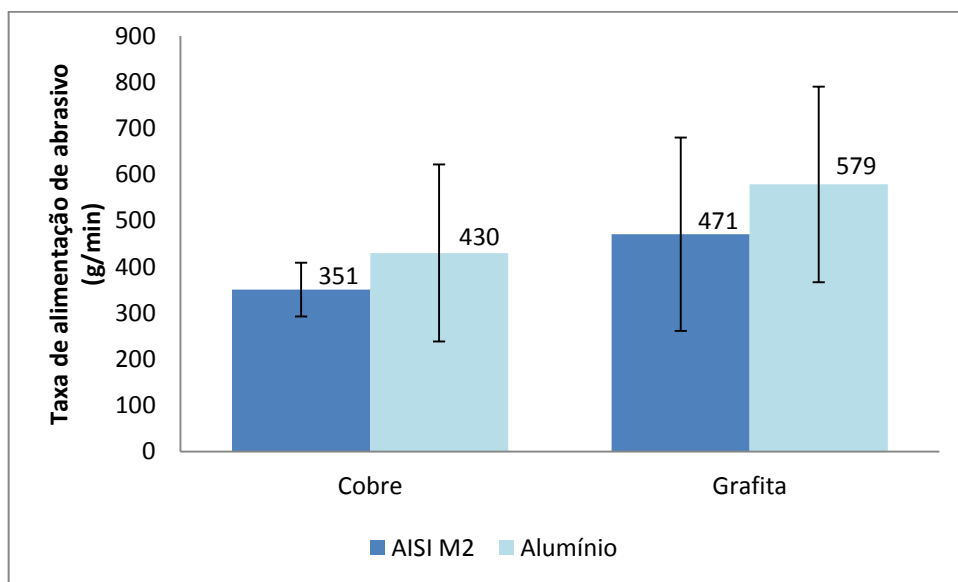
Em relação ao consumo de abrasivos realizados nos testes, o uso de eletrodo de grafita gerou maior gasto destas partículas e quanto às peças, ao usinar o alumínio, o consumo dos abrasivos foi maior que do aço AISI M2.

Tabela 6– Variação de massa (g) dos abrasivos realizados antes e após os testes e desvio padrão.

Eletrodo	AISI M2			Alumínio		
	Am 1	Am 2	Am 3	Am 4	Am 5	Am 6
Cobre	314	418	320	340	650	300
Grafita	696	334	706	408	704	300
Média de alimentação de abrasivo (g)	Cobre: 351 ± 58,4			430 ± 191,6		
	Grafita: 579 ± 209,2			471 ± 211,9		

Fonte: Elaborada pelo autor

Gráfico 4 - Variação em massa (g) e desvio padrão de abrasivo (SiC e Al₂O₃) em um período de 5 min utilizando contendo amostras de aço AISI M2 e alumínio com eletrodo de cobre e grafita.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O abrasivo misturado á água deionizada promove maior densidade a este líquido o que por consequência gera maior TRM. Quando a densidade do fluido aumenta um aumento da resistência do meio ao arco de plasma vai surgir o que irá manter as descargas menos

dispersas e a potência efetivamente desprendida a peça usinada também aumentará (ZHAO *et al*, 2002).

Como observado anteriormente, a TRM do alumínio foi maior que do aço AISI M2, portanto é justificável o maior consumo das partículas abrasivas quando o alumínio foi usinado.

5.2 Avaliação do processo com fluido estático.

Para efeito comparativo, foi realizado testes com o fluido estático, ou seja, processo sem bombeamento, onde somente a pressão nominal da máquina estava presente. Valores de TRM, TD e DRV foram calculados.

A tabela 7 mostra os valores de TRM unitários, bem como a média deles e o desvio padrão. Posteriormente, o gráfico 5 foi elaborado para melhor visualização destes resultados.

A TRM do aço alumínio foi significamente maior quando utilizou o eletrodo de cobre.

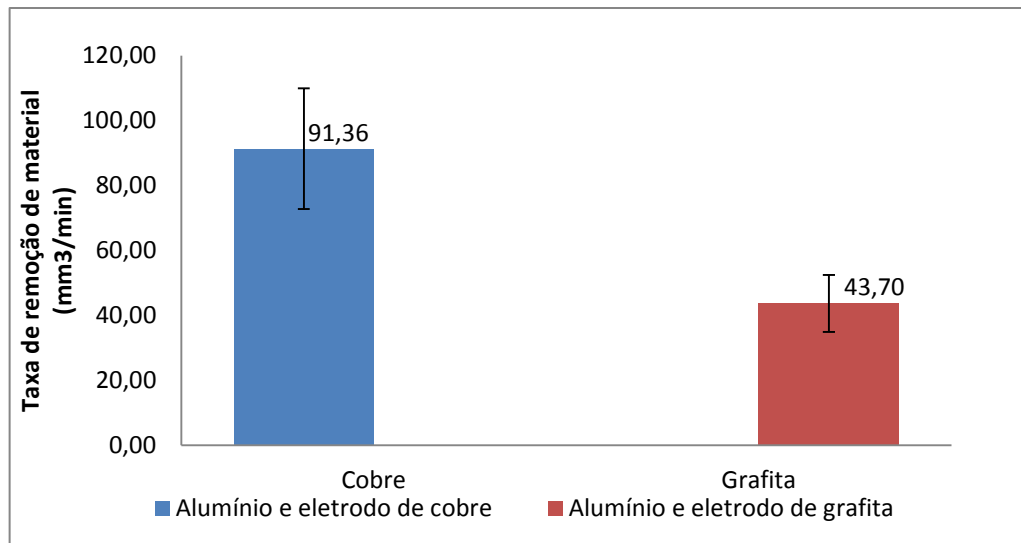
Tabela 7- TRM médio e desvio padrão para amostras de alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita no processo sem bombeamento.

Eletrodo	Alumínio e eletrodo de cobre			Alumínio e eletrodo de grafita		
	Am 1	Am 2	Am 3	Am 4	Am 5*	Am 6
	104,63	99,34	70,11	48,89	-	37,51
Média TRM (mm³/min)	91,36 ±18,56			43,70 ± 8,75		

Fonte: Elaborada pelo autor.

*Devido a camada superficial formada, retirou a amostra 5 da análise.

Gráfico 5 - TRM e desvio padrão contendo amostras de alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita no processo sem bombeamento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a observação da TD, a tabela 8 e o gráfico 6 foram elaborados. Pode-se então verificar que a taxa de desgaste da ferramenta de cobre foi maior que a ferramenta de grafita.

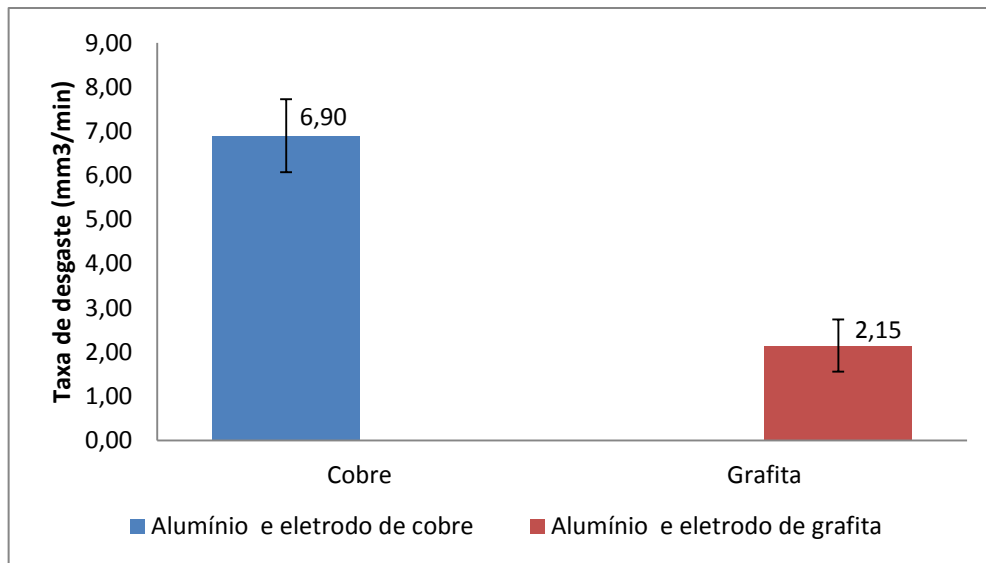
Tabela 8- TD médio e desvio padrão para amostras de alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita no processo sem bombeamento.

Eletrodo	Alumínio e eletrodo de cobre			Alumínio e eletrodo de grafita		
	Am 1	Am 2	Am 3	Am 4	Am 5*	Am 6
	5,98	7,15	7,57	1,73	-	2,57
Média TD (mm³/min)	6,90 ±0,83			2,15 ±0,59		

Fonte: Elaborado pelo autor

*Devido a camada superficial formada, retirou a amostra 5 da análise.

Gráfico 6 – TD e desvio padrão contendo amostras de alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita no processo sem bombeamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, análise em relação ao DRV foi feita, de acordo com a tabela 9 e o gráfico 7 apresentados. Os melhores resultados apresentados em relação ao DRV foram quando utilizou o eletrodo de grafita.

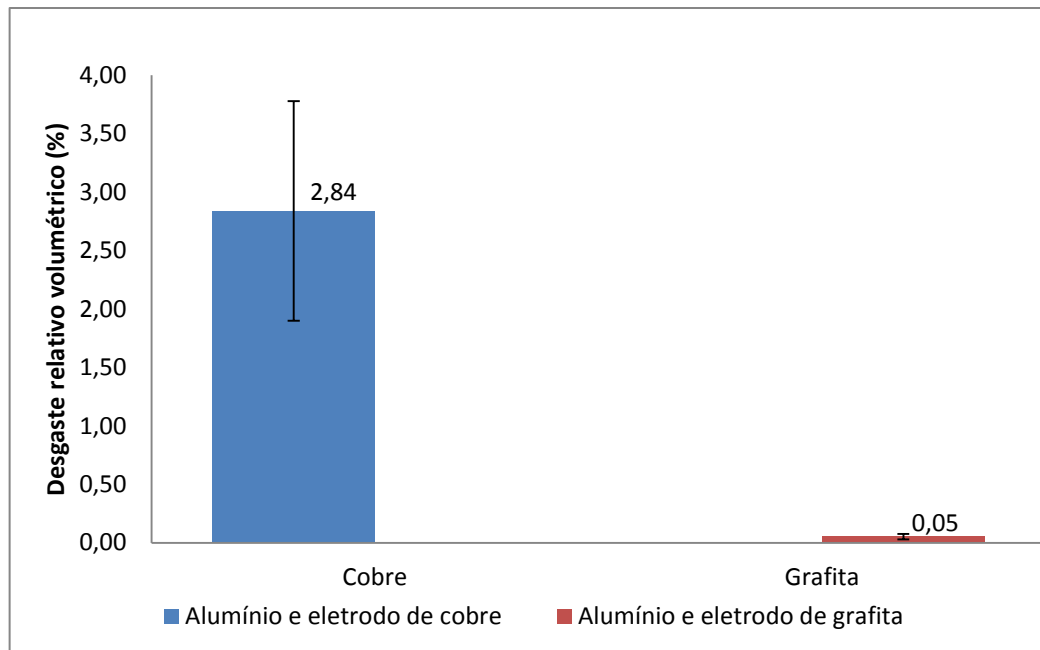
Tabela 9- DRV médio e desvio padrão para amostras de alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita no processo sem bombeamento.

Eletrodo	Alumínio e eletrodo de cobre			Alumínio e eletrodo de grafita		
	Am 1	Am 2	Am 3	Am 4	Am 5*	Am 6
	2,05	2,59	3,88	0,04	-	0,07
Média DRV (%)	2,84 ± 0,94			0,05 ± 0,02		

Fonte: Elaborado pelo autor

*Devido a camada superficial formada, retirou a amostra 5 da análise.

Gráfico 7 – DRV e desvio padrão contendo amostras de alumínio utilizando eletrodo de cobre e grafita no processo sem bombeamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de TRM foram menores do que quando realizado o processo AJEDM, isto já era esperado, pois de acordo com Arantes (2007), o processo híbrido de usinagem inclui características dos processos realizados. No AJEDM, o jato de água com abrasivo influencia na TRM e conforme testes realizados por ele, a pressão também contribui para que haja maior TRM.

Analisando somente o processo sem pressão o eletrodo de grafita não apresentou maior TRM. Foi observado após os testes que nos eletrodos de grafita formaram uma camada superficial. Esta camada acabou tornando uma camada protetora, a qual dificultava a passagem de elétrons o que impediu que usinagem tornasse eficiente, promovendo menor TRM. Por esse mesmo motivo também pode-se dizer que o desgaste da ferramenta de grafita foi menor. A figura 22 mostra a camada formada no eletrodo e a amostra de alumínio a qual houve pouca remoção de material.

Figura 22- Eletrodo de grafita com uma camada superficial e peça de alumínio usinada.

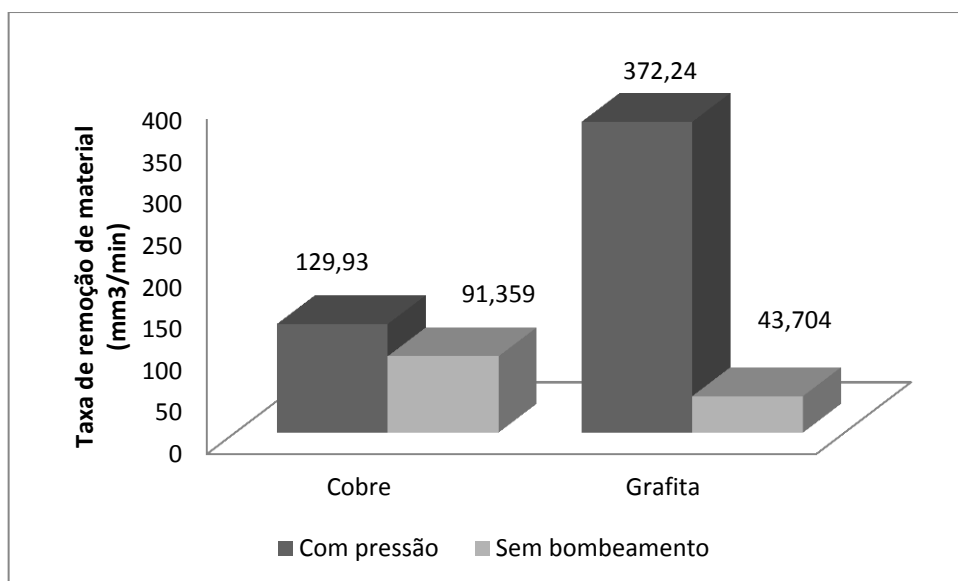


Fonte: Elaborado pelo autor.

Citando Stevens (1998), a polaridade tem importante influência sobre o desgaste do eletrodo ferramenta no processo EDM sendo que como na maioria dos casos as peças entre eletrodo e ferramenta são diferentes justifica a diferença da TRM entre ambos.

O gráfico 8 foi elaborado para melhor visualização das TRM provocadas no alumínio, reunindo valores das taxas anteriores. De acordo com o gráfico, observa-se que as amostras de alumínio obtiveram maior TRM nos testes onde utilizou o eletrodo de grafita no processo AJEDM. Não foram realizados testes com o aço AISI M2 para usinagem sem pressão.

Gráfico 8 – TRM de processo de usinagem de alumínio com pressão e sem bombeamento.

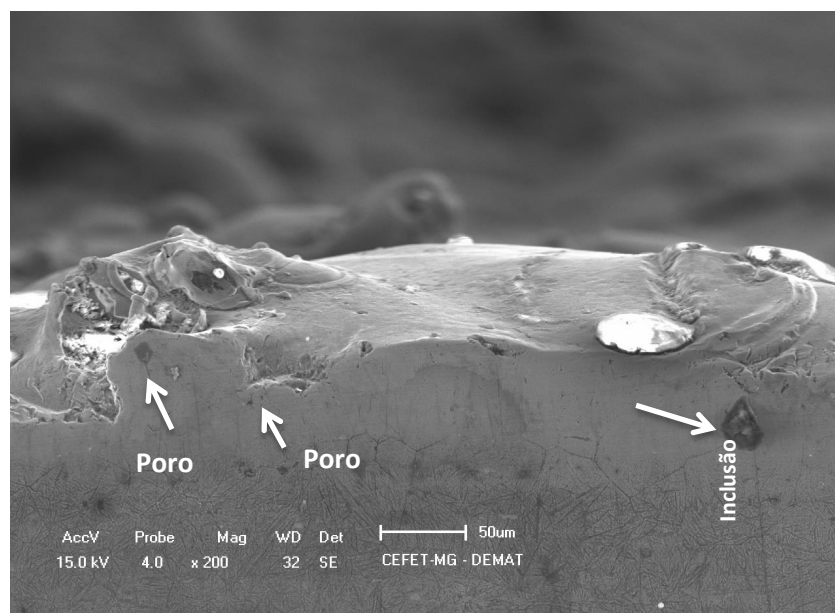


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Análise da camada refundida formada.

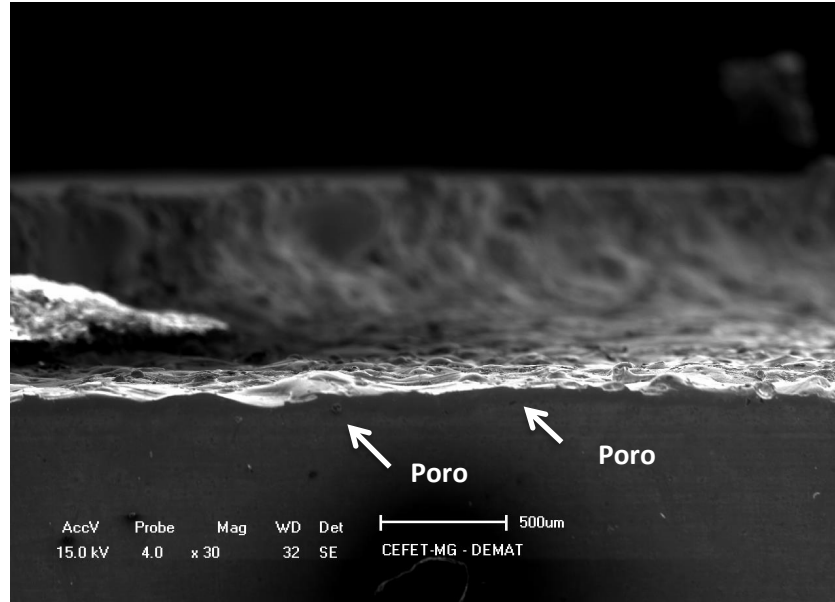
Uma visão geral da morfologia das camadas refundidas formadas das peças de aço AISI M2 e alumínio usinadas utilizando eletrodo ferramenta de cobre e grafita serão apresentadas nas figuras 23 a 28.

Figura 23– Camada refundida formada no aço AISI M2 com pressão utilizando grafita como eletrodo.



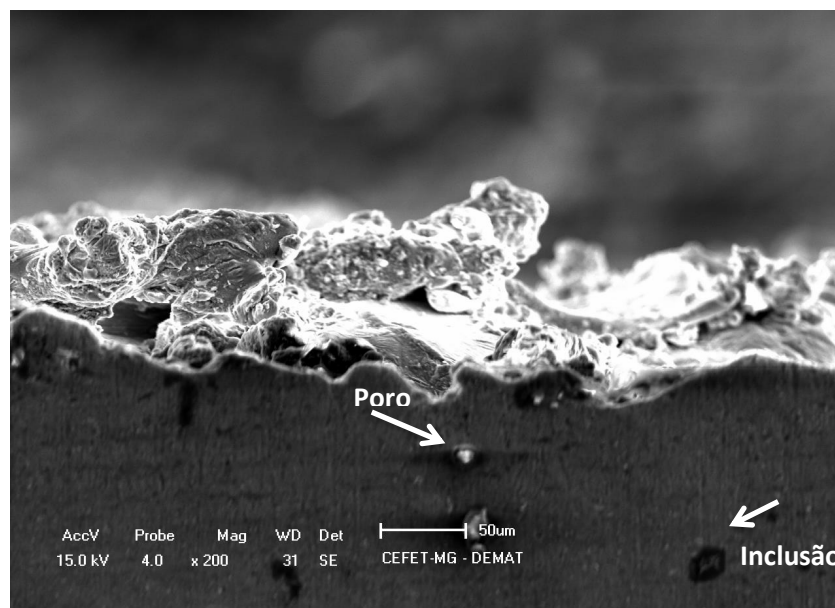
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24– Camada refundida formada no aço AISI M2 com pressão utilizando cobre como eletrodo



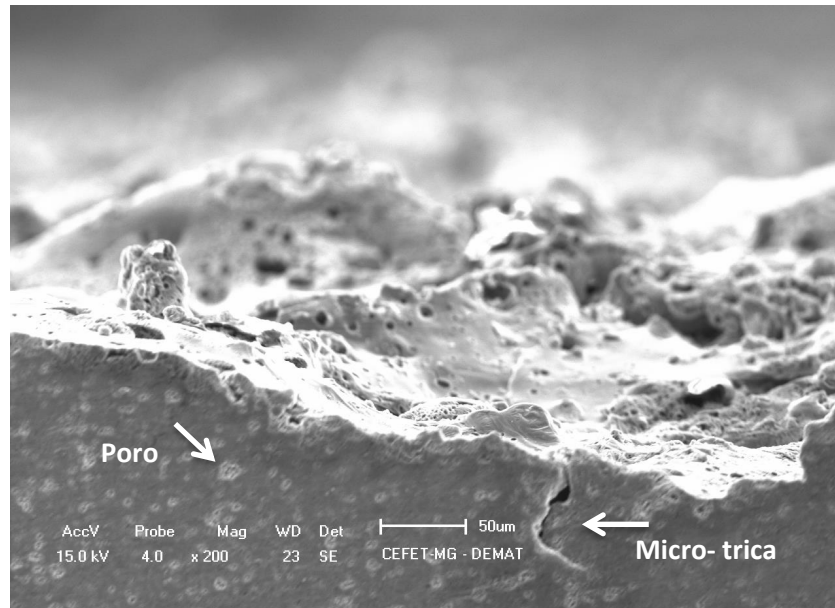
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 25 – Camada refundida formada no alumínio com pressão utilizando cobre como eletrodo.



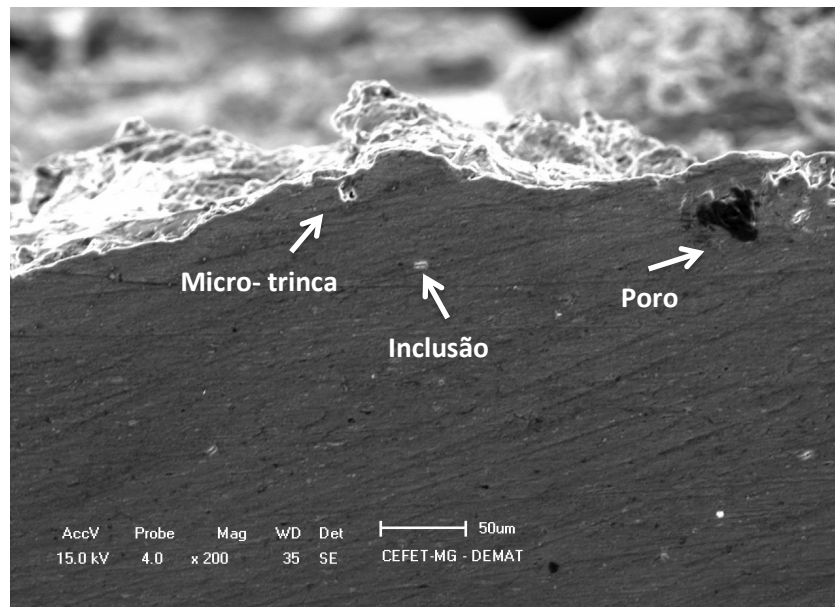
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26 - Camada refundida formada no alumínio com pressão utilizando grafita como eletrodo.



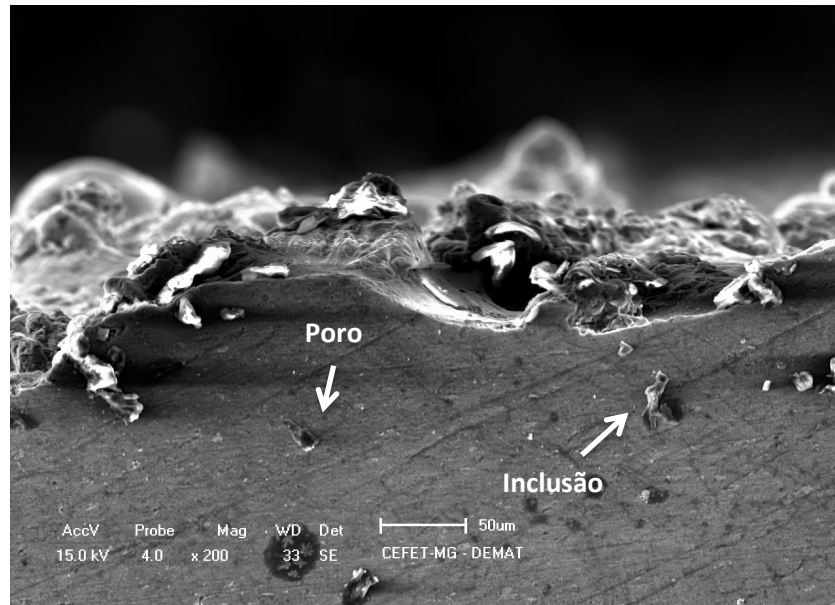
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27– Camada refundida formada no alumínio sem bombeamento utilizando cobre como eletrodo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28 – Camada refundida formada no alumínio sem bombeamento utilizando grafita como eletrodo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As setas representadas nas figuras mostram a ocorrência de poros, micro trincas e inclusões. De acordo com Silva (2012), o surgimento destes é um fator previsto, mas por afetar nas propriedades do material, a camada refundida deve ser retirada.

Observa-se que no alumínio, as deformações apresentadas estendem ao longo de toda a peça, enquanto que no aço AISI M2, essas deformações podem ser visualizadas de forma mais pontual.

De acordo com Rodrigues (1999) ao adicionar pós no fluido dielétrico, as descargas irão atuar em maiores quantidades e a superfície das amostras serão aquecidas mais uniformemente fazendo com que a camada refundida formada seja mais fina e melhor distribuída sobre a região usinada e as trincas serão pequenas e em poucas quantidades. Porém, de acordo com os testes realizados por Arantes (2007) na pressão de 100 bar ainda há a formação da camada refundida embora menor que no processo de EDM convencional. Comparando as micrografias da usinagem com e sem pressão do aço, pode-se perceber que em ambas as micrografias a camada refundida estava presente e juntamente a ela, presença de poros e inclusões. Portanto a pressão de 120 bar não é suficiente para a eliminação da mesma.

CAPÍTULO V

6.0 CONCLUSÃO

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

- dentre os materiais utilizados como eletrodo ferramenta o grafita apresentou melhor desempenho.
- a peça de alumínio apresentou melhor desempenho na remoção de material.
- alumínio, possuindo menor densidade e menor dureza garante maior taxa de remoção de material comparado ao aço AISI M2 de maior densidade no processo de usinagem AJEDM com abrasivo na pressão de 120 bar. Além disso a maior condutividade elétrica do alumínio favorece o processo termomecânico.
- o consumo de abrasivos foi maior em peças de alumínio comparadas as peças de aço AISI M2, para um mesmo eletrodo.
- não houve redução da quantidade de poros, micro trincas e inclusões no processo AJEDM comparado ao processo EDM.
- a pressão do fluido dielétrico juntamente com o uso de abrasivos aumenta a TRM.
- a pressão de 120 bar não é suficiente para a eliminação da camada refundida e a presença de poros, microtrincas e inclusões ficarão presentes na mesma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI, Y. M. ; WANG, J. Impact Abrasive Machining. In: JACKSON, M. J. ; DAVIM, J. P. **Machining with Abrasive**. London, Springer, 2011. P. 385- 419
- ALUMICOPPER. Disponível em <www.alumicopper.com.br/produtos_aluminio_6351.html>
Acesso em 23 jun 2016
- AMORIM, F.L. **Tecnologia de eletroerosão por penetração da liga de alumínio AMP 8000 e da liga de cobre CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos**. 2002. 147f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC. Florianópolis.
- ANDRADE, J. C.; CÉSAR, J.; PAOLI, M. A. **A determinação da densidade de sólidos e líquidos**. Chemkeys, São Paulo, p. 1, julho 2004.
- ARANTES, L. J. **Desenvolvimento e avaliação do processo híbrido de Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo (AJEDM)**, Uberlândia, 2007.
- ARANTES, L. J.; RASLAN, A. A. **Utilização de água deionizada e carboneto de silício (SiC) no processo híbrido de Usinagem po Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo**, 2009.
- ARANTES, L.J.; SILVA, M. A. ; SILVA, E. M.; RASLAN, A. A. **Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão**. Ouro preto, 2003
- BENEDICT, G.F., **Nontraditional Manufacturing Process**. New York. Marcel Denkker, 1987
- CAMARGO, B. C.; COSTA, H. L.; RASLAN, A. A. **Endurecimento superficial de uma liga Ti6Al4V por meio de Usinagem por Descargas Elétricas**, 2009.
- CHEN, F. L.; **The effect of cutting Jet Variation on Striation Formation in Abasive Water Jet Cutting**. Journal of Materials Processing Tecnology, 2001.
- FERNANDES, A. L. **Efeito da Adição de Pó de Carboneto de Silício nos Fluidos Dielétricos Sobre o Desempenho Das Usinagens Por Descargas Elétricas do Aço Rápido ABNT M2**, Uberlândia, 1999.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 2006.
- FIELD, M., KAHLES, J. F., KOSTER, W. P., 1989, **Surface Finish and Surface Integrity**, **Metcut Research Associates Inc.**, Metals handbook – 9th Ed., Machining, Vol. 16, pp. 19-36
- FULLER, J. E. 1989. **Eletrical Discharge Machine**. *Metals Handbook*. 9 ed. Vol 16., 1989

- GUITRAU, E. P. **The EDM Handbook**. Hansen Gardner Publications. Cincinnati , OH. 1997
- INTECH EDM. **A Guide to Understanding and Select EDM Dielectric Fluids**. Broadview, IL, 1996
- JACOMINE, L.; DUARTE, M. A. V.; RASLAN.A.A. **Avaliação e otimização de parâmetros de usinagem por descargas elétricas via superfície de resposta.**, Uberlândia, 2009.
- KOZAK, JERZY; RAJURKAR, KAMLAKAR P. **Hybrid Machinig Process Evaluation and Development**. University of Nerbraska , Lincon, U.S.A, 2001.
- MCGEOUGH, J. A. **Advanced Methods of Machine**. London: Chapman and Hall, 1988.
- OLINIKI, R. **Influência da combinação entre os parâmetros de Usinagem por Eletroerosão na integridade do aço superficial ASI H13 temperado e revenido**, Curitiba, novembro 2009.
- PERUZZO, F. M.; CANTO, E. L. **Química na abordagem do cotidiano**. 3. ed. Campinas: Moderna, v. 1, 2011.
- RAMASAWMY, H.; BLUNT, L. **Effect of EDM process parameters on 3D surfasse topography**. Journal of Materials Processing Technology 148 p. 155–164. 2004.
- RODRIGUES, J. R. P. **Efeito da Adição de Carboneto de Silício em Pó na Geração de Microtrincas e na Topografia da Superfície Usinada por Descargas Elétricas de Aço Rápido Abnti M2**, Uberlândia, setembro 1999.
- SANTOS, I. **Análise dos parâmetros de entrada na eletroerosão de penetração da liga de titânio Ti-6Al-4V**, Curitiba, 2010.
- SCHMIDT,2008. Disponível em: <www.moldesinjecaoplasticos.com.br/proeletroerosao.asp> Acesso em: 20 outubro 2015.
- SILVA, E. R. D. **Otimização e avaliação dos parâmetros de influência do processo AJEDM**, Uberlândia, 2012.
- STEVENS, L. **Improvement of Surface Qualite in Die- sinking EDM**. Doctoral Thesis. 1998. 181 p. Departament of Mechanical Engineering. Katholieke Universiteit Leuven. Leuven.
- SULMERS, D. A. **Watterjetting Technology**. London. Chapman & Hall, 1995.
- ZAOH, W. S., MENG, Q. G. WANG, Z. L. **The Aplication, of Research on Powder Mixed EDM in Rough Machining**. Journal of Materials Processing Tecnology, Vol 129, 2002.

