

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

GUILHERME CESAR DOS SANTOS PEREIRA

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA NA  
RUGOSIDADE DO AÇO AISI 304 USINADO POR DESCARGAS ELÉTRICAS**

BELO HORIZONTE

2016

GUILHERME CESAR DOS SANTOS PEREIRA

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA NA  
RUGOSIDADE DO AÇO AISI 304 USINADO POR DESCARGAS ELÉTRICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
no curso de 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: Rogério Felício dos Santos

BELO HORIZONTE

2016

GUILHERME CESAR DOS SANTOS PEREIRA

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA NA  
RUGOSIDADE DO AÇO AISI 304 USINADO POR DESCARGAS ELÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
no curso de 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

Aprovado em 30/06/2016

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Rogério Felício dos Santos - Orientador

---

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

---

Prof. Ms. Carlos Eduardo dos Santos

BELO HORIZONTE

2016

Dedico este trabalho a Deus,  
aos meus pais, Fernando Cesar Rocha Pereira e  
Sônia Aparecida dos Santos Pereira,  
à minha noiva, Laura Mariana Lisboa da Costa e Silva,  
a minha família  
e todos os meus amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Doutor Rogério Felício dos Santos pelo apoio e orientação durante a realização desse trabalho.

Aos professores Ernane Rodrigues da Silva e Carlos Eduardo dos Santos, como participantes da banca examinadora. Ao professor Carlos, em especial, pelo apoio com a medição das rugosidades.

Ao CEFET-MG e todos os seus funcionários e professores, por proporcionarem um ensino de qualidade e a estrutura de laboratórios e técnicos que possibilitou este estudo.

Aos colegas alunos do curso de Engenharia de Materiais, que fizeram com que essa jornada fosse mais agradável, sempre ajudando e descontraindo quando necessário.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da intensidade de corrente na rugosidade do aço AISI 304 usinado por descargas elétricas. Para tanto, uma barra chata de aço inoxidável AISI 304 foi usinada utilizando uma máquina de EDM por penetração. Foram usinadas cavidades na barra, utilizando correntes variando de 3 a 33 A, mantendo-se os demais parâmetros de usinagem. A rugosidade das cavidades foi então medida e avaliada para cada intensidade de corrente. Foram feitas imagens de MEV com o objetivo de observar o aspecto das crateras geradas em quatro patamares de corrente. Os resultados obtidos demonstraram que há uma relação direta entre intensidade de corrente e rugosidade superficial de peças usinadas por EDM, pois a medida que se aumentou a intensidade da corrente elétrica ocorreu um aumento da rugosidade. Correntes menores levam a melhor acabamento superficial.

Palavras-chave: EDM, Rugosidade, aço AISI 304, Intensidade de Corrente

## **ABSTRACT**

The main goal of this paper, is to evaluate the influence of the electric current intensity on the roughness of AISI 304 stainless steel machined by electrical discharge. For such, a stainless steel flat rod was machined using a sinking EDM machine. Cavities were machined in the rod, using current intensities ranging from 3 to 33 A, with all the other parameters being kept unchanged. The roughness in the cavities was than measured and evaluated for each current intensity value. SEM images were also taken from cavities machined with four different current values, in order to observe the aspect of each crater generated. Results showed that there is a direct relation between current intensity and surface roughness in pieces machined by EDM, since as the current increases, so does the roughness, lower current values result in a better surface finish.

Palavras-chave: EDM, Roughness, AISI 304 steel, Current Intensity

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1	Justificativa .....	15
1.2	Objetivos.....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1	Usinagem por descargas elétricas (EDM) .....	18
2.1.1	<i>Tempo de ligamento e desligamento (<math>T_{on}</math> e <math>T_{off}</math>)</i> .....	21
2.1.2	<i>Velocidade de pulsação</i> .....	22
2.1.3	<i>Corrente elétrica</i> .....	24
2.1.4	<i>Fluido dielétrico</i> .....	25
2.1.5	<i>Material do eletrodo ferramenta</i> .....	26
2.1.6	<i>Rugosidade</i> .....	27
2.1.6.1	<i>Rugosidade média (<math>R_a</math>)</i> .....	27
2.1.6.2	<i>Raiz quadrada da média dos quadrados (<math>R_q</math>)</i> .....	28
2.1.6.3	<i>Altura máxima de rugosidade (<math>R_t</math>)</i> .....	28
2.1.6.4	<i>Média das amplitudes dos maiores picos e vales no cut-off (<math>R_z</math> ou <math>R_{tm}</math>)</i> .....	29
2.2	<b>Aço inoxidável AISI 304</b> .....	30
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	32
3.1	<b>Material do eletrodo-peça</b> .....	32
3.2	<b>Máquina de EDM</b> .....	34
3.3	<b>Eletrodo-Ferramenta</b> .....	37
3.4	<b>Parâmetros de usinagem</b> .....	38
3.5	<b>Análise da topografia do material usinado por EDM</b> .....	41
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	44
4.1	<b>Rugosidade</b> .....	44
4.1.1	<i>Rugosidade média aritmética <math>R_a</math></i> .....	44
4.1.2	<i>Rugosidade média das amplitudes dos maiores picos e vales no cut-off (<math>R_z</math>)</i> .....	46

<b>4.2</b>	<b>Microscopia Eletrônica de Varredura.....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de pesquisas coletadas sobre EDM. ....	16
Figura 2 - Circuito de relaxação de Lazarenko.....	18
Figura 3 - Ciclo típico de um processo de EDM utilizando um gerador de pulso controlado. ....	21
Figura 4 - Desbaste - Baixa velocidade.....	23
Figura 5 - Operação de Semi-Acabamento - velocidade moderada. ....	23
Figura 6 - Acabamento - Alta velocidade.....	24
Figura 7 - Fases de uma descarga elétrica no processo de EDM. ....	25
Figura 8 - Parâmetro de Rugosidade média $R_a$ .....	28
Figura 9 - Parâmetro de altura máxima de rugosidade $R_t$ . ....	29
Figura 10 - Parâmetro de Rugosidade total $R_z$ . ....	30
Figura 11 - Fluxograma de planejamento do experimento.....	32
Figura 12 - Barra chata de aço inoxidável AISI 304 retificada. ....	33
Figura 13 - Peças cilíndricas de aço inoxidável AISI 304 para análise por MEV. ....	33
Figura 14 - Máquina de EDM por penetração Servspark Eletroplis EDM-540 do Laboratório de Ajustagem do CEFET-MG. ....	35
Figura 15 - Fixação da peça na mesa.....	36
Figura 16 - Fixação da amostra para MEV no porta-amostra e na mesa da máquina. ....	36
Figura 17 - Eletrodos-ferramenta de cobre eletrolítico $\varnothing = 12$ mm e comprimento de 30 mm. ....	37
Figura 18 - Pinça de latão fundido para fixação do eletrodo-ferramenta. ....	37
Figura 19 - Figura esquemática da sequência de usinagem da barra.....	40
Figura 20 - Usinagem por descarga elétrica. ....	41
Figura 21 - Rugosímetro TESA Rugosurf 20.....	42
Figura 22 - Microscópio Eletrônico de Varredura SHIMADZU SSX-550 Superscan. ....	43
Figura 23 - Barra chata de aço AISI 304 usinada por EDM.....	44

Figura 24 - Rugosidade média aritmética Ra nas cavidades com cada intensidade de corrente analisada. ....	45
Figura 25 - Rugosidade Rz nas cavidades com cada intensidade de corrente analisada.....	47
Figura 26 - MEV do aço AISI 304 usinado por EDM com corrente de 3 A com aumentos de 50x (a) e 100x (b) .....	49
Figura 27 - MEV do aço AISI 304 usinado por EDM com corrente de 12 A com aumentos de 50x (a) e 100x (b) .....	50
Figura 28 - MEV do aço AISI 304 usinado por EDM com corrente de 22 A com aumentos de 50x (a) e 100x (b) .....	51
Figura 29 - MEV do aço AISI 304 usinado por EDM com corrente de 33 A com aumentos de 50x (a) e 100x (b) .....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço AISI 304.....	33
Tabela 2 - Propriedades físicas do cobre eletrolítico.....	38
Tabela 3 - Parâmetros de usinagem fixados para experimento. ....	39
Tabela 4 - Intensidade de corrente medida de acordo com quantidade de TS. ....	40
Tabela 5 - Rugosidade $\bar{R}_a$ dos eletrodos de cobre.....	46
Tabela 6 - Rugosidade $\bar{R}_z$ dos eletrodos de cobre.....	48

## LISTA DE SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AISI – *American Iron and Steel Institute*
- DEMAT – Departamento de Engenharia de Materiais
- EDM – *Electrical Discharge Machining*
- ISO – *International Standardization Organization*
- MEV – Microscopia eletrônica de Varredura
- TRM – Taxa de Remoção de Material
- TS – *Transistor Standard*
- VDI – *Verein Deutscher Ingenieure*
- WEDM – *Wire Electrical Discharge Machining*
- ZTA – Zona Termicamente afetada

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de fabricação por usinagem é largamente utilizado na indústria mecânica como um dos principais meios de obtenção de peças, juntamente aos processos de fundição, conformação mecânica, etc. Esse processo consiste na remoção de material de uma peça bruta, de modo a dar forma e geometria específica com um grau definido de precisão e acabamento de superfície.

Os processos de usinagem são divididos em usinagem convencional, por corte ou abrasão, e em usinagem não convencional, que utilizam sistemas de erosão química, elétricos, mecânicos ou híbridos para remoção de material. Com a evolução da engenharia de materiais e o desenvolvimento de materiais com propriedades químicas, físicas, térmicas e mecânicas cada vez melhores, torna-se cada vez mais difícil usar esses materiais pelos métodos convencionais por corte ou abrasão. Isso ocorre devido aos métodos tradicionais serem baseados, principalmente, na remoção de materiais utilizando ferramentas que são por definição, mais duras que o material da peça usinada (EL-HOFY, 2005).

Com o desenvolvimento de materiais com dureza extremamente elevada, ocorre um desgaste maior das ferramentas, o que acarreta numa quantidade maior de trocas das mesmas e um conseqüente aumento no número de paradas de manutenção do equipamento, tornando o processo de usinagem convencional menos eficiente, com menor produtividade, e causando maior desgaste da máquina e redução da qualidade da peça usinada. Ocorre também a alteração da peça usinada, devido a interação entre os materiais, que pode gerar reações químicas e metalúrgicas, que podem modificar a microestrutura da superfície da peça (EL-HOFY, 2005).

As máquinas operatrizes envolvidas nos processos de fabricação, convencional ou não, vem sofrendo diversas inovações tecnológicas, como o uso do comando numérico computadorizado, motores mais eficientes, que atingem rotações mais elevadas, com menor consumo de energia, e estruturas mais rígidas e estáveis, que permitem alcançar maior precisão e desempenho. Essa evolução, tem permitido alcançar acabamento superficial de qualidade cada vez mais elevada, com baixíssimas rugosidades, aliando-se uma combinação de parâmetros como velocidade de corte, avanços e profundidades (GUITRAU, 1997).

Os métodos não convencionais são utilizados quando são requeridas geometrias de alta complexidade, em estruturas com baixa rigidez, precisão micrométrica, acabamento superficial de baixíssima rugosidade e tolerâncias muito apertadas (EL-HOFY, 2005). Os métodos não convencionais utilizados nos dias de hoje são, entre outros, usinagem por erosão eletroquímica, por descargas elétricas, por fluxo abrasivo, jato de água, ultrassônica e são utilizados na

fabricação de moldes para extrusão e prensagem (cerâmica e polimérica), matrizes para conformação, ferramentas de corte, na indústria automobilística, aeronáutica, entre outras. Esses métodos permitem a usinagem de materiais de elevada dureza, como aços ferramentas, diamantes poli-cristalinos, carbeto de tungstênio, aços beneficiados, aços inoxidáveis, etc.

O processo de usinagem por descarga elétrica, ou EDM, consiste na remoção de material por sublimação, que ocorre devido a geração de um arco elétrico entre dois materiais condutores, denominados eletrodo-ferramenta e eletrodo-peça, enquanto submersos em um fluido dielétrico. Durante a geração do arco, ocorre um bombardeamento da peça por elétrons ou íons originários do eletrodo, o que causa a sublimação de material da superfície da peça (EL-HOFY, 2005). O processo de EDM tem um destaque entre os processos não convencionais, por ser capaz de usinar materiais de elevada dureza, sem contato direto entre ferramenta e peça, e possibilitando a confecção de peças de alta complexidade e dimensões reduzidas.

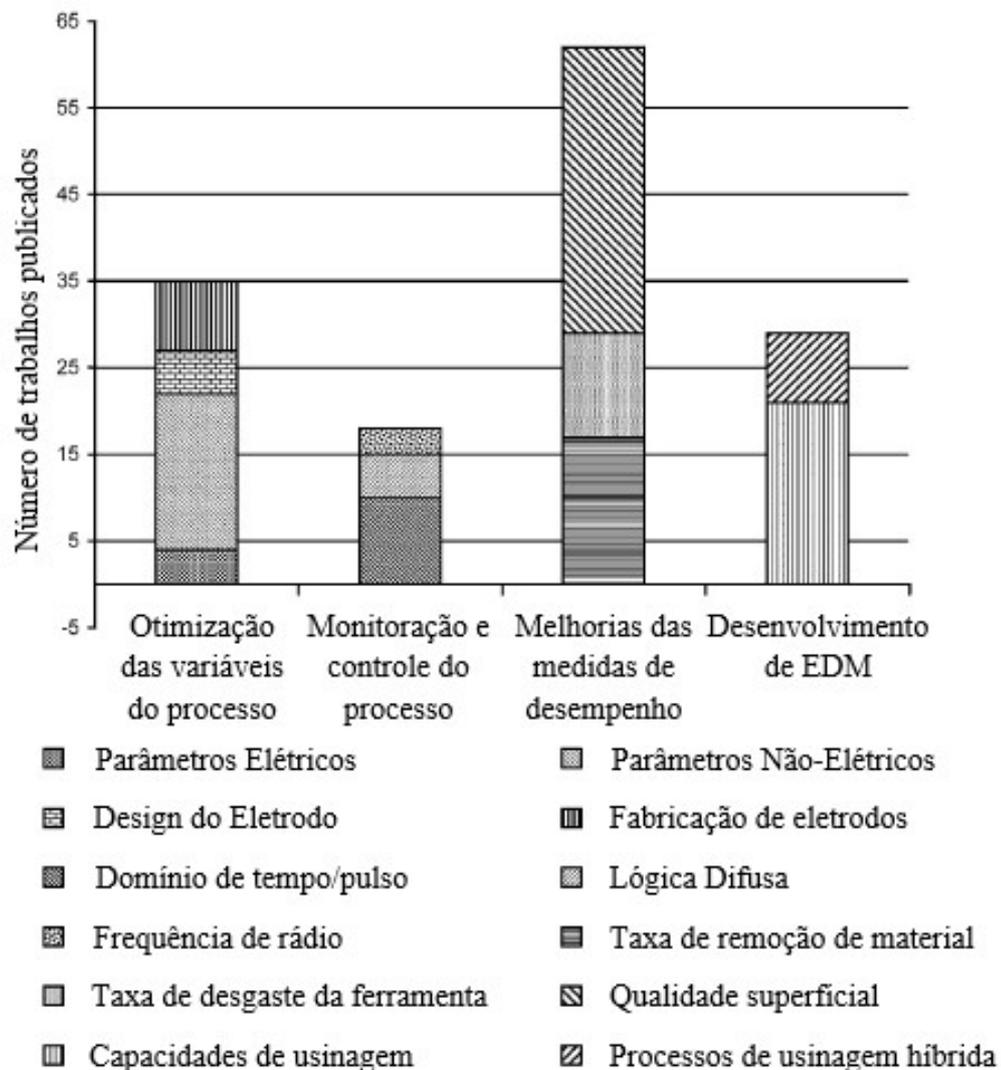
Os processos de EDM se dividem, basicamente, em dois tipos: o por penetração e a EDM a fio. O primeiro, que será o enfoque principal desse trabalho, foi desenvolvido inicialmente para a remoção de machos e brocas presas em peças de custo muito elevado, e em seguida, iniciou-se sua utilização para a fabricação de matrizes e moldes. Com a evolução dos controles numéricos computacionais, dos servos motores das máquinas e de tecnologias de troca rápida de eletrodo, as máquinas de EDM, atualmente, conseguem usinar em até 6 eixos, produzindo peças dos mais diversos tipos e geometrias. Outro fator que colaborou para o desenvolvimento das máquinas de EDM foi a evolução das fontes de energia para as máquinas, dos materiais para eletrodos e fluidos dielétricos aplicados, o que permitiu que se alcançassem correntes cada vez mais elevadas, modulando a velocidade de pulsação e controlando parâmetros refinados como o formato do arco, que são fatores que influenciam diretamente na velocidade de usinagem e no acabamento da peça (GUITRAU, 1997).

## **1.1 Justificativa**

Com o avanço dos equipamentos, materiais e do processo de EDM, se torna, cada vez mais importante o conhecimento da influência dos parâmetros de usinagem nos resultados finais da peça. A fabricação de peças de alta complexidade e com aplicações críticas, como a indústria aeronáutica, exige um controle dimensional, de acabamento superficial e de propriedades muito rígido, isso faz com que haja uma exigência cada vez maior de conhecimento sobre o processo de EDM.

A rugosidade, é uma propriedade chave em aplicações mecânicas, já que é um fator importante na composição do atrito e do desgaste tribológico gerados pelo contato entre os materiais, assim sendo decisivo nas aplicações desse material, além de influenciar nas características visuais das peças (AGOSTINHO et al. 1986). Por essa razão há a necessidade de se estudar a influência dos parâmetros de usinagem por EDM na rugosidade dos materiais usinados. Segundo HO e NEWMAN, 2003, como mostrado na Figura 1 diversas pesquisas que são relacionadas a melhorias na medição de desempenho do processo de EDM tem como principal objetivo a melhoria do acabamento superficial, seguido pela taxa de remoção de material e taxa de desgaste do eletrodo.

**Figura 1 - Distribuição de pesquisas coletadas sobre EDM.**



Fonte: HO e NEWMAN, 2003.

O aço inoxidável AISI 304 foi escolhido para os testes deste estudo devido a sua baixa corrosão por oxidação mesmo em temperaturas mais elevadas, como ocorrem no processo de EDM. Essas características fazem com que ele seja um material favorável, pois o acabamento superficial permite uma primeira avaliação visual da rugosidade anterior à avaliação por equipamentos. (ASM HANDBOOK, 1991)

## 1.2 Objetivos

Esse trabalho tem por objetivo avaliar a influência da intensidade de corrente elétrica na rugosidade de cavidades em uma peça de aço inoxidável AISI 304, fabricado por usinagem por descargas elétricas.

Como objetivos específicos desse trabalho estão:

- Usinar por EDM, o aço AISI 304, utilizando diferentes intensidades de corrente elétrica;
- Avaliar a rugosidade  $R_a$  e  $R_z$  de cada cavidade usinada com cada intensidade de corrente elétrica;
- Analisar as imagens geradas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das cavidades geradas.

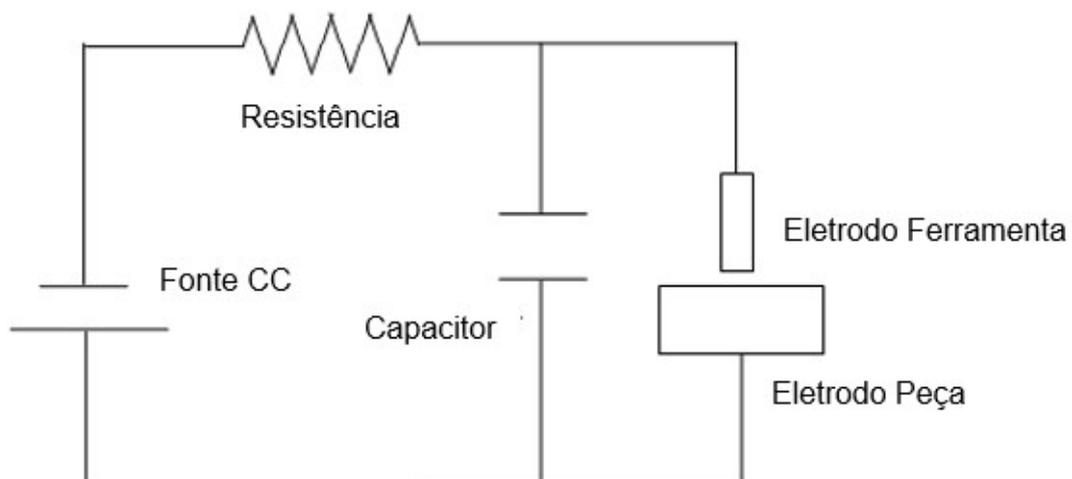
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Usinagem por descargas elétricas (EDM)

O processo de remoção de metais por descargas elétricas, foi observado inicialmente, em 1768, por Sir Joseph Priestley. Porém, a aplicação efetiva desse processo somente foi iniciada mais de um século depois, principalmente para a extração de machos, brocas e mandris quebrados. Somente em 1943, dois russos, B. R. e N. I. Lazarenko, deduziram que as descargas elétricas poderiam ser utilizadas para usinar materiais que, à época, eram extremamente difíceis de usinar. Suas observações foram fundamentais para o desenvolvimento do processo de EDM (MCGEOUGH, 1988).

De acordo com McGeough (1988), os Lazarenko observaram que uma série de arcos elétricos de curta duração e alta taxa de repetição, levavam a uma usinagem efetiva, com acabamento superficial de peça satisfatório. Eles perceberam, também, que quando submerso em um líquido dielétrico, toda a energia do arco é concentrada em uma área ainda menor. A partir dessa observação, eles desenvolveram o conceito do circuito de relaxação, que consistia na montagem de um circuito elétrico em que se conectavam a ferramenta e a peça de trabalho aos terminais de um capacitor, que era carregado por uma fonte de corrente contínua, como podemos observar na Figura 2.

**Figura 2 - Circuito de relaxação de Lazarenko.**



Fonte: <http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarollo/edm/>, acesso em 01/05/2016.

Esse circuito fazia que a medida de carga nos capacitores aumentasse, até que a tensão se tornasse suficiente para quebrar a rigidez dielétrica do fluido formando o arco entre a peça e a ferramenta, provocando remoção de material de ambos os eletrodos no processo. A descarga elétrica ocorre no fluido dielétrico e devido a característica isolante do mesmo, induz uma descarga por uma seção transversal reduzida, controlando assim a área de erosão do material da peça. A velocidade e a energia do arco dependem principalmente das condições de operação da região entre eletrodo e peça contendo um fluido dielétrico, também conhecida como *gap*, que, em tempo, são afetadas pelos resíduos de metais durante a operação, o que torna essencial uma limpeza efetiva dessa região durante o desligamento do arco.

O *gap* nos processos de EDM por penetração pode possuir de 0,005 a 2 mm de dimensão, dependendo das condições de usinagem (AMORIM, 2002).

A temperatura no arco elétrico durante operação, geralmente é em torno de 8000 à 12000°C, mas pode atingir até 20000 °C (HO e NEWMAN, 2003). Como a fagulha é concentrada em uma pequena área da peça, ela causa a erosão e vaporização de uma pequena porção de material, com pouco efeito sobre as regiões adjacentes. O sistema motriz da máquina é de extrema importância, para garantir estabilidade do *gap* e uma usinagem uniforme durante o processo de EDM (GUITRAU,1997).

O processo de usinagem por descargas elétricas independe da dureza do material usinado. A principal característica exigida do material a ser usinado, bem como do eletrodo, é sua condutividade elétrica. Atualmente, com o avanço da tecnologia de geração elétrica, o sistema de Lazarenko foi substituído por sistemas mais eficientes, como tubos de vácuo ou transistores sólidos, que permitem maior controle sobre o arco e o tempo de pulsação (GUITRAU,1997).

O estudo das etapas do processo de ignição da fagulha e remoção dos materiais são fundamentais para o entendimento do processo de usinagem por descargas elétricas. Segundo Guitrau (1997) o processo de ignição pode ser definido da seguinte maneira:

- a) Inicialmente, o sistema, imerso em fluido dielétrico, é carregado eletricamente com um potencial de alta-tensão;
- b) Em seguida o eletrodo aproxima-se da ferramenta, gerando um fluxo eletromagnético de alta intensidade (ou coluna de energia), que, eventualmente, quebra as propriedades isolantes do fluido dielétrico devido ao alinhamento de seus íons;
- c) Essa região de íons alinhados, funciona como um “tubo” condutivo, que permite a passagem da corrente elétrica de alta intensidade na forma do arco elétrico;

- d) O arco elétrico eleva a temperatura na peça e no eletrodo a cerca de 8000 °C, de forma que material é vaporizado da peça, do eletrodo e do fluido dielétrico;
- e) A região de gás formado devido a vaporização do fluido dielétrico na ignição do arco, gera um revestimento gasoso ao arco, composto de hidrogênio, carbono e vários óxidos;
- f) Após a descarga do eletrodo, o material vaporizado, novamente se funde, deixando uma cratera na peça;
- g) Devido ao calor da fagulha e dos contaminantes presentes, devido a vaporização de material do eletrodo, da peça e do fluido dielétrico, o campo de partículas ionizadas se torna desorganizado, fazendo com que se perca a característica de alinhamento iônico e a condutividade do fluido dielétrico, aumentando-se a resistividade rapidamente;
- h) Com o retorno dessa característica, novamente se eleva a tensão nos terminais (eletrodo e peça), e deve ser interrompida a passagem de corrente. O tempo desde a ignição da fagulha e esse momento é conhecido como  $T_{on}$ ;
- i) Com a parada da passagem de corrente, o campo de gás gerado pelo arco implode, gerando uma pressão negativa, que faz com que o fluido dielétrico circule, limpando a região de resíduos gerados pelo material refundido e resfriando o líquido dielétrico novamente;
- j) Esse período sem arco, chamado de  $T_{off}$ , permite a reionização do dielétrico, permitindo a continuidade do processo, que se repete milhares de vezes por segundo enquanto ocorre o processo de EDM.

Essas etapas constituem o ciclo unitário do processo de EDM.

Devido a elevada temperatura envolvida no processo, acima de 8000 °C, é um aspecto importante as alterações metalúrgicas que ocorrem na superfície. Na região mais externa da peça, ocorre uma camada ressolidificada, ou refundida, que durante o processo de usinagem, não se desprende da superfície do material durante a lavagem. Imediatamente abaixo dessa camada, ocorre a formação da zona térmica mente afetada (ZTA), que é formada pelo aquecimento e resfriamento e pela difusão de material fundido da camada ressolidificada. As tensões térmicas causadas durante o processo de fusão podem causar danos metalúrgicos severos na ZTA. Particularmente, fragilidade intergranular é acentuada e fraturas intergranulares não são incomuns (MCGOUGH, 1988).

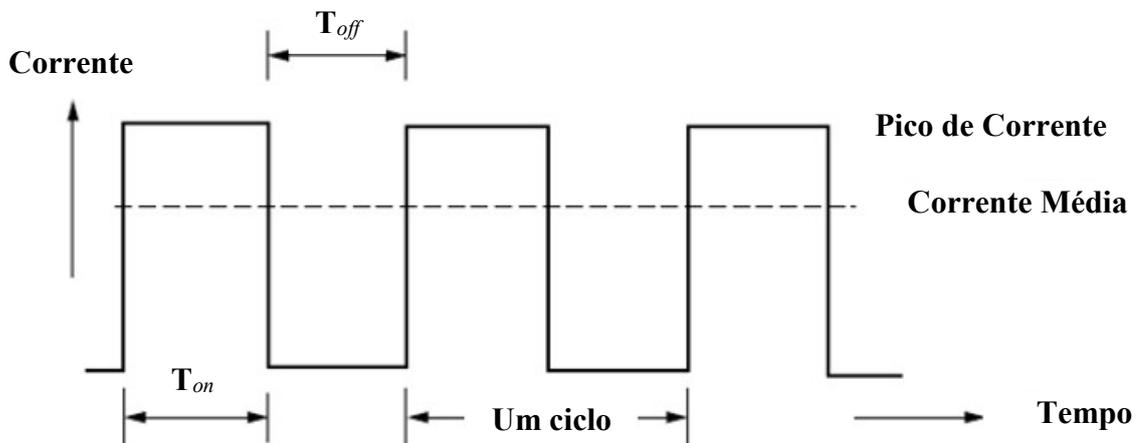
Durante o ciclo unitário, os parâmetros que devem ser controlados são: a tensão em aberto ( $\hat{u}_i$ ), média de descarga ( $\hat{u}_e$ ) e média de trabalho (U); a intensidade da corrente máxima

( $\hat{i}_e$ ) e média ( $\bar{i}_e$ ); os tempos,  $T_{on}$  e  $T_{off}$ , além do tempo de retardo de ignição ( $t_d$ ), que é o tempo entre a aplicação de tensão e o efetivo rompimento da rigidez dielétrica do fluido (AMORIM, 2002). Porém, antes do início da usinagem propriamente dita, devem ser definidos o material do eletrodo, a polaridade dos eletrodos e o fluido dielétrico a utilizar, pois esses irão influenciar diretamente na escolha dos parâmetros de usinagem.

### 2.1.1 Tempo de ligamento e desligamento ( $T_{on}$ e $T_{off}$ )

Os parâmetros de  $T_{on}$  e  $T_{off}$  são críticos para o processo de EDM, pois definem a duração do ciclo unitário da usinagem por descarga elétrica. Além disso, eles irão influenciar diretamente nas características do processo e da peça acabada. A Figura 3 mostra o ciclo típico de um processo de EDM, destacando os parâmetros  $T_{on}$  e  $T_{off}$ .

**Figura 3 - Ciclo típico de um processo de EDM utilizando um gerador de pulso controlado.**



Fonte: EL-HOFY, 2005.

$T_{on}$  terá maior influência sobre os seguintes aspectos da EDM:

- Velocidade – Todo o trabalho é realizado durante o tempo de incidência do arco, quanto maior o tempo de  $T_{on}$ , maior será o tempo de incidência do arco sobre a peça e maior será a quantidade de material retirado.
- Acabamento – Com um maior tempo de incidência do arco, as crateras formadas serão mais largas e profundas, o que irá gerar um acabamento mais grosseiro da superfície, com uma maior rugosidade resultante. O mesmo se aplica ao contrário, com menores tempos de incidência, menor rugosidade e superfícies mais suaves.

- Desgaste – Como citado anteriormente, utilizando-se eletrodos carregados positivamente, os íons deixam o eletrodo e atingem a peça, causando, na maior parte das vezes, maior “dano” à peça. Para cada fagulha que deixa o eletrodo, é levada uma pequena partícula do mesmo. Por essa razão, maiores tempos de incidência do arco geram menor desgaste do eletrodo, assim, operações de desbaste na EDM, ao contrário dos processos convencionais de usinagem, causam menor desgaste a ferramenta que operações de acabamento.

$T_{off}$  por sua vez, tem maior influência nos seguintes aspectos:

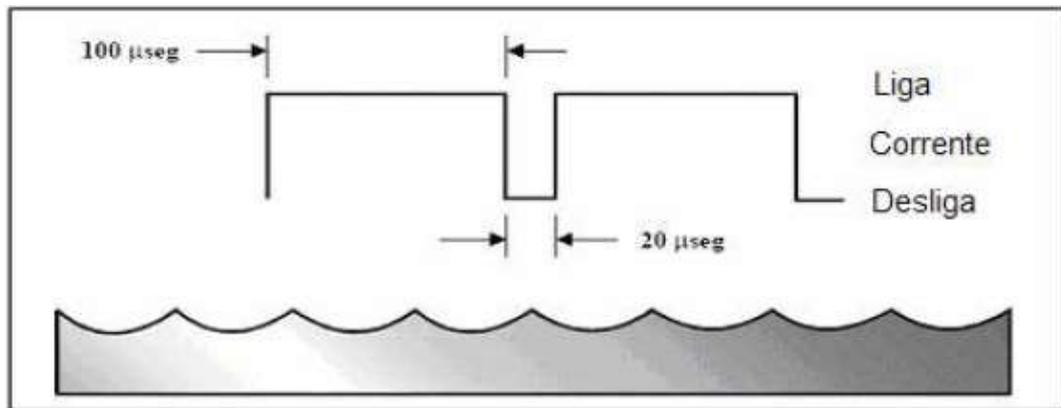
- Velocidade – Apesar do trabalho efetivamente ocorrer no  $T_{on}$ , o  $T_{off}$  é fundamental para a continuação do processo de usinagem. Pois é durante esse tempo de descanso da ferramenta que ocorre a circulação do fluido dielétrico, necessária para limpeza do processo, bem como a reionização do fluido. No processo de usinagem, deseja-se que esse tempo de desligamento seja o menor possível.
- Estabilidade – Tão importante para o processo de usinagem por descargas elétricas, é a estabilidade do mesmo. Enquanto um  $T_{off}$  mais longo causa uma usinagem mais lenta, se o tempo de descanso for insuficiente, ele causará um ciclo errático e dificultará a retração adequada do servo mecânico, dessa forma causando um resultado não conforme, ou até mesmo um tempo maior de usinagem devido ao ajuste que deverá ser feito pelo servo.

### **2.1.2 Velocidade de pulsação**

Esse parâmetro mede o número de vezes que a corrente é ligada e desligada no processo de EDM. Durante operações de desbaste, o  $T_{on}$  possui valores mais altos, portanto ocorrerão menos ciclos por segundo, ou seja, possui uma velocidade mais baixa. Operações de acabamento, analogamente, possuem velocidades mais altas. Essas diferenças podem ser observadas esquematicamente nas figuras abaixo.

Conforme pode ser observado na Figura 4, o acabamento causado por longos períodos  $T_{on}$  é grosseiro. Isso ocorre porque a longa duração do arco é suficiente para permitir a transferência de grande quantidade calor para a peça, fundindo uma cratera maior, ao invés de vaporizar uma pequena área. Adicionalmente, a zona refundida seria consideravelmente mais espessa com uma ZTA potencialmente maior. Isso pode causar problemas a integridade superficial da peça em alguns casos, mas pode ser mitigada por processos adicionais de remoção dessa camada, como polimento ou outros métodos de usinagem.

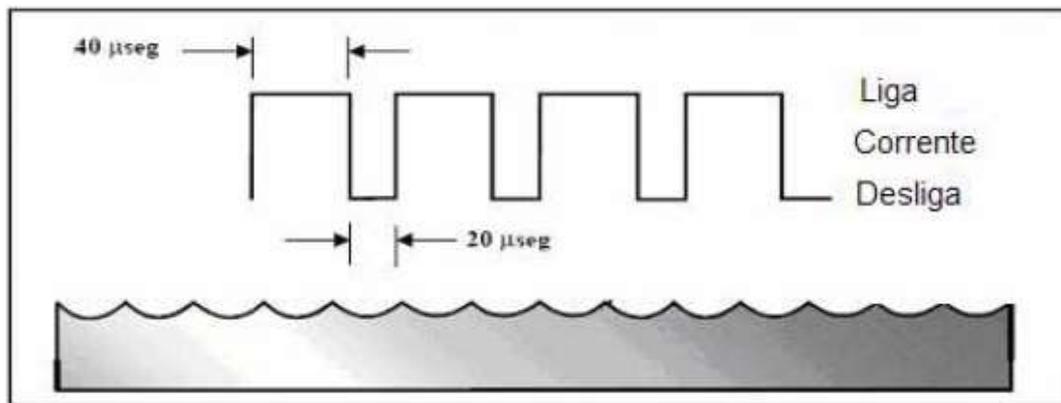
**Figura 4 - Desbaste - Baixa velocidade.**



Fonte: GUITRAU, 1997.

Nota-se na Figura 5, que a duração do arco é diminuída, causando menores crateras. O acabamento superficial é melhorado em detrimento a um maior tempo de usinagem e um maior desgaste da ferramenta (GUITRAU, 1997).

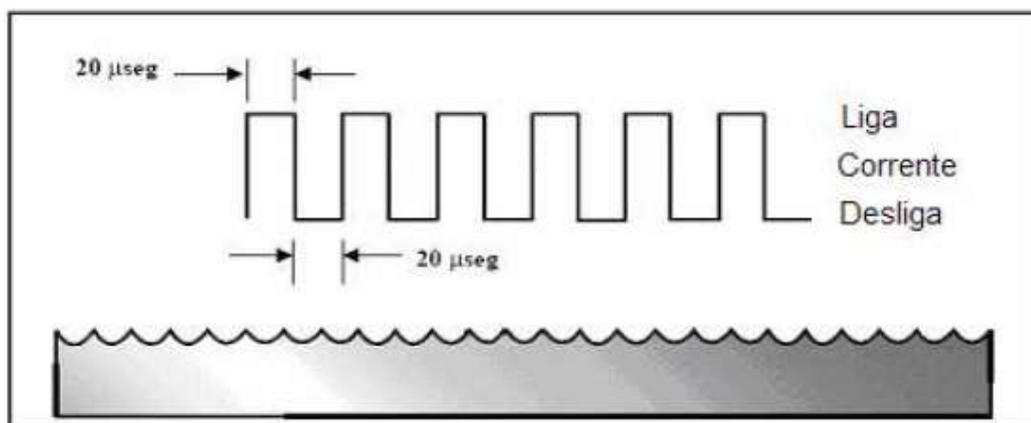
**Figura 5 - Operação de Semi-Acabamento - velocidade moderada.**



Fonte: GUITRAU, 1997.

Na Figura 6, pode-se observar que ocorre redução considerável na duração do ciclo, e gera uma densidade de onda consideravelmente mais elevada durante o acabamento. Com arcos de menor duração, uma quantidade menor de material é removida, causando crateras menores. Esse processo de acabamento por EDM, geralmente, reduzindo-se a potência e o  $T_{on}$ . Isso gera um dano potencial muito menor a superfície da peça acabada.

**Figura 6 - Acabamento - Alta velocidade.**



Fonte: GUITRAU, 1997.

### 2.1.3 Corrente elétrica

A corrente elétrica, ou corrente de pico, é o parâmetro que define a quantidade de energia usada na usinagem por descargas elétricas. Tanto para EDM por penetração, quanto para EDM a fio (WEDM), a quantidade máxima de corrente é dependente da área superficial do corte, ou seja, quanto maior a quantidade de área superficial, mais elevada a corrente a ser utilizada. Correntes elevadas são geralmente usadas para operações de desbaste (GUITRAU, 1997).

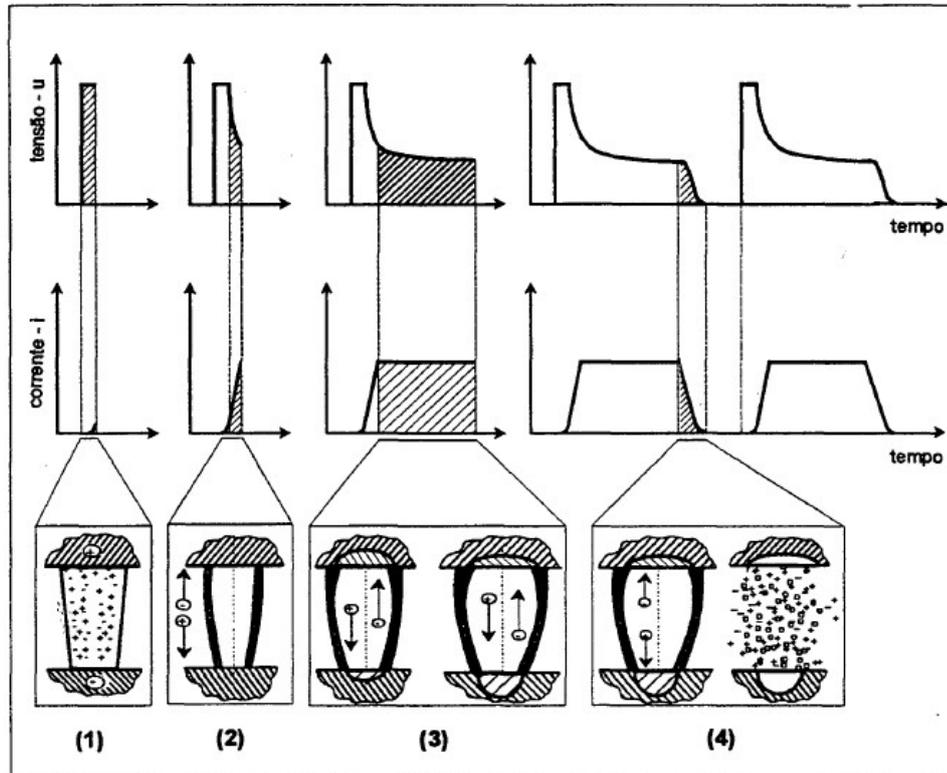
Uma corrente mais elevada irá gerar uma maior Taxa de Remoção de Material (TRM), ao custo de pior acabamento superficial e maior desgaste da ferramenta. Esse aspecto é ainda mais importante em EDM por penetração, a superfície usinada espelha aquela do eletrodo ferramenta e o desgaste excessivo do mesmo irá acarretar na degradação da precisão do processo.

Durante as etapas do ciclo unitário, o comportamento da corrente ( $i$ ) ocorre como pode ser observado na Figura 7.

- No estágio 1 em que ocorre a ionização do canal, ocorre o máximo de diferença de potencial, ou tensão ( $u$ ) entre os eletrodos, com a ignição da fagulha, ocorre o início da passagem de corrente pelo fluido.
- No estágio 2 ocorre a elevação rápida da corrente durante a formação do arco elétrico, analogamente ocorre uma queda brusca da tensão entre os polos.
- No estágio 3 ocorre a remoção efetiva de material, com a estabilização do arco elétrico e a manutenção da corrente de trabalho, bem como da tensão.

- No estágio 4, ocorre o rompimento do arco elétrico, com a queda brusca da corrente e da tensão.

**Figura 7 - Fases de uma descarga elétrica no processo de EDM.**



Fonte: AMORIM, 2002.

#### 2.1.4 Fluido dielétrico

A escolha do fluido dielétrico influencia diretamente a usinagem por descargas elétricas. De acordo com McGeough (1988), as características principais a serem observadas em um fluido dielétrico são:

- Possuir força dielétrica suficiente para permanecer não-condutor de eletricidade até que a tensão de pico seja atingida;
- Ser capaz de deionizar rapidamente após o encerramento da descarga.

Entre as funções do fluido dielétrico no processo de EDM estão: concentração de energia da descarga, limpeza da região usinada e resfriamento da peça e do eletrodo.

Quanto menor o volume da região do arco, maior a concentração de energia irradiada para os eletrodos, causando um melhor rendimento do processo. O fluido dielétrico é, em geral, constituído de hidrocarbonetos. A viscosidade do dielétrico influencia diretamente nos índices de TRM e desgaste relativo, devido a sua influência nas condições de lavagem e implosão do canal de plasma, bem como a refrigeração dos eletrodos (AMORIM, 2002)

Ainda de acordo com Amorim (2002), devido a temperatura elevada envolvida no processo, o fluido dielétrico é fundamental para evitar um aumento excessivo da temperatura dos eletrodos, principalmente no eletrodo ferramenta para que não ocorra uma dilatação volumétrica excessiva do mesmo, que pode ocasionar em instabilidade da operação e deficiência de lavagem.

A lavagem da região do *gap* e do fluido dielétrico durante a EDM é fundamental. No início da usinagem, o dielétrico se encontra livre de partículas erodidas e outros contaminantes, nesse momento, sua rigidez dielétrica é máxima. Com o início do ciclo, as partículas de material removido ajudam a reduzir a rigidez dielétrica do fluido e, assim, permitem a continuação da descarga elétrica. Porém, um excesso de partículas erodidas podem gerar caminhos para descargas indesejadas na região usinada, prejudicando o acabamento superficial e gerando um desgaste excessivo da ferramenta (MCGEOUGH, 1988).

A lavagem do fluido dielétrico pode ocorrer de várias maneiras, dependendo do equipamento e do tipo de forma sendo usinada, podendo ocorrer por sucção ou injeção, através da peça ou do eletrodo (MCGEOUGH, 1988). O processo de lavagem é também responsável pelo aspecto superficial da peça usinada, pois o arraste adequado de material da superfície irá ser o principal fator para a geração de uma camada refundida mais ou menos profunda (SCHMITZ, 2007).

### **2.1.5 *Material do eletrodo ferramenta***

O material do eletrodo ferramenta deve, imperativamente, ser condutor de eletricidade, porém, essa propriedade não será a única a definir a escolha de um eletrodo. Outras propriedades como a condutividade térmica e o ponto de fusão do material terão influência direta sobre o processo de usinagem, podendo limitar a quantidade de energia permitida durante o processo, definir a qualidade do acabamento superficial da peça e a taxa de remoção de material (GUITRAU, 1997; AMORIM, 2002).

Os eletrodos podem ser divididos em dois tipos principais: os metálicos e as grafitas (GUITRAU, 1997). Esses tipos de materiais possuem características específicas que devem ser levadas em conta quando da sua escolha.

Os principais materiais metálicos utilizados como eletrodos são: cobre, ligas cobre-tungstênio, ligas prata-tungstênio e tungstênio. Para as grafitas, a divisão pode ser feita em: retas e infiltradas, que são eletrodos de grafita com uma mistura de partículas superfinais de cobre (GUITRAU, 1997).

Os eletrodos metálicos têm como principais vantagens, quando comparados aos eletrodos de grafita: alta resistência, segurança de usinagem, maior facilidade de manuseio e fabricação e uniformidade da descarga. Como desvantagens, pode-se citar: baixa taxa de remoção de material, rebarbas e maior desgaste do eletrodo (GUITRAU, 1997).

O material metálico mais utilizado para EDM é o cobre. O cobre é um material de alta condutividade elétrica, é estável em condições de fagulha, é de fácil fabricação, devido a sua baixa dureza e alta ductilidade e permite a usinagem em condições desfavoráveis (grande profundidade e de difícil lavagem). Seu baixo ponto de fusão e alta condutividade térmica, permite melhor acabamento superficial, ao custo de um maior desgaste do eletrodo, pois o cobre dissipa rapidamente o calor gerado pela descarga elétrica reduzindo o tamanho da camada refundida e da zona termicamente afetada (MCGEOUGH, 1988; GUITRAU, 1997; AMORIM, 2002). Devido a sua menor TRM, os eletrodos de cobre são comumente utilizados em operações de acabamento, onde são exigidas menores rugosidades, como aplicações hospitalares e equipamentos com tolerâncias estreitas, essa característica se deve principalmente a maior densidade do cobre quando comparado a grafita (GUITRAU, 1997).

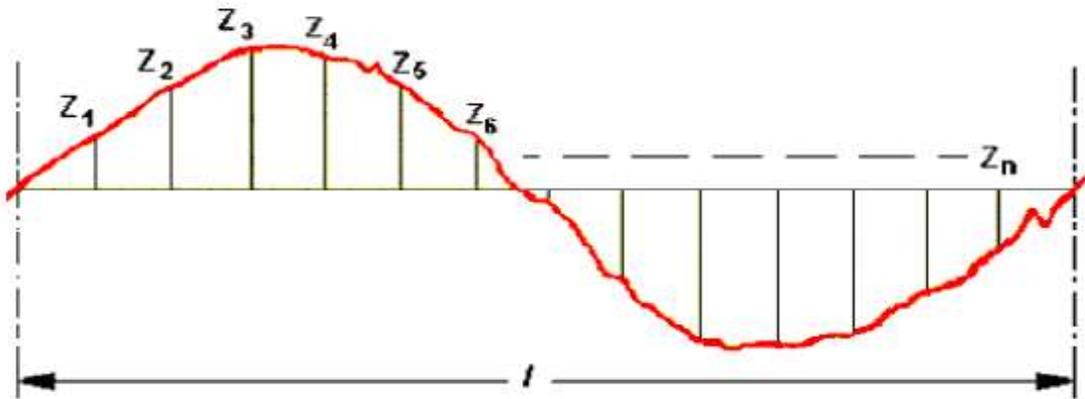
### **2.1.6 Rugosidade**

A rugosidade é a textura superficial, formada por sulcos ou cavidades resultantes de algum processo de fabricação a que uma peça foi submetida (NOVASKI, 1994). A rugosidade pode ser medida por diversos parâmetros baseados na linha média em um comprimento  $l$ , que pode ser dividido em regiões menores, chamadas *cut-off*, para diferentes tipos de análises.

#### **2.1.6.1 Rugosidade média ( $R_a$ )**

Trata-se da média aritmética dos valores absolutos dos desvios do perfil em relação a linha média ao longo de um comprimento  $l$ .

**Figura 8 - Parâmetro de Rugosidade média  $R_a$ .**



Fonte: OLIVEIRA, 2004.

O parâmetro  $R_a$  é representado pela seguinte equação:

$$R_a = \frac{z_1 + z_2 + z_3 + \dots + z_n}{n} \rightarrow R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (1)$$

Esse parâmetro é muito utilizado nas indústrias, principalmente para controle de processos de fabricação. A variação do parâmetro  $R_a$  pode indicar alguma alteração em uma variável (velocidade de corte, quantidade de fluido, etc). Porém, por ser uma medida média ele pode não refletir mudanças pontuais, por isso ele é geralmente utilizado em conjunto com outro parâmetro (OLIVEIRA, 2004).

#### 2.1.6.2 Raiz quadrada da média dos quadrados ( $R_q$ )

O parâmetro  $R_q$  é a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média ao longo de um comprimento  $l$  (AGOSTINHO, 1986). A representação matemática do parâmetro  $R_q$  pode ser observado na Equação 3.

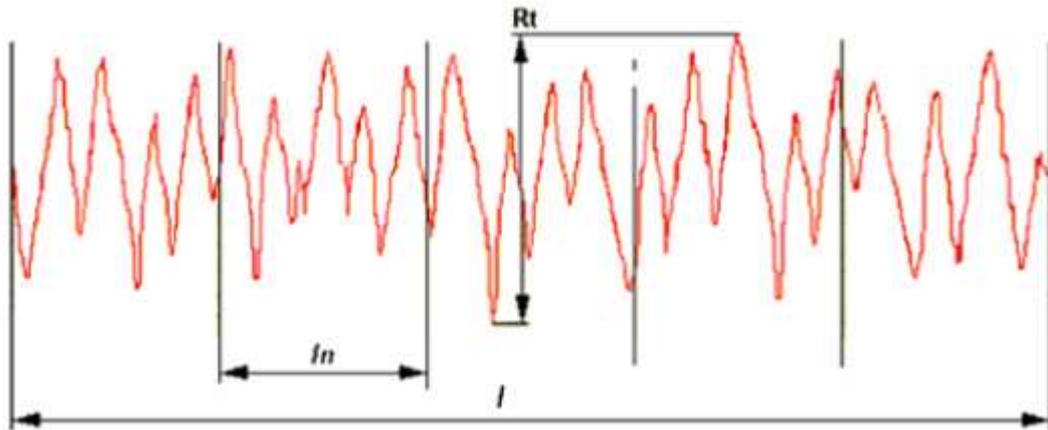
$$R_q = \sqrt{\frac{z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + \dots + z_n^2}{n}} \equiv \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |Z^2(x)| dx} \quad (2)$$

Esse parâmetro é utilizado, principalmente em aplicações ópticas e eletrônicas, por ele ser capaz de identificar oscilações acentuadas em vales e picos, onde essas oscilações podem comprometer as imagens geradas e causar distorções gerais.

#### 2.1.6.3 Altura máxima de rugosidade ( $R_t$ )

O parâmetro  $R_t$  define a amplitude máxima de um pico a um vale no comprimento de avaliação  $l$ . Esse parâmetro pode ser observado na Figura 9 (OLIVEIRA, 2004)

**Figura 9 - Parâmetro de altura máxima de rugosidade  $R_t$ .**



Fonte: OLIVEIRA, 2004.

Onde:

- $l$  = comprimento total de avaliação;
- $l_n$  = comprimento de amostragem, ou *cut-off*.

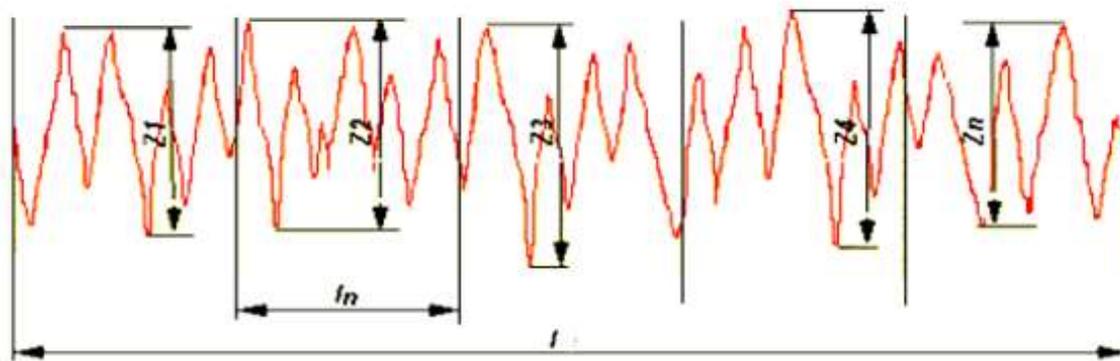
A utilização do  $R_t$  é, principalmente, em superfícies onde não convém a presença de grandes amplitudes, como sedes de retentores (OLIVEIRA, 2004).

#### 2.1.6.4 Média das amplitudes dos maiores picos e vales no cut-off ( $R_z$ ou $R_{tm}$ )

$R_z$  é a média dos valores  $Z$  no comprimento de avaliação, onde  $Z$  é a amplitude máxima em cada um dos *cut-offs*. As medidas envolvidas no parâmetro podem ser observadas na Figura 10. Esse parâmetro é representado pela Equação 4.

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots + Z_n}{n} \quad (3)$$

**Figura 10 - Parâmetro de Rugosidade total  $R_z$ .**



Fonte: OLIVEIRA, 2004.

O parâmetro  $R_z$  possui aplicação similar ao parâmetro  $R_t$ . A principal diferença entre os parâmetros está na consequência de uma amplitude isolada entre pico e vale e na amplitude média entre todos os picos e vales.

## 2.2 Aço inoxidável AISI 304

Os aços inoxidáveis, são ligas de aço-cromo, que tem como principal característica sua resistência a oxidação. Tal característica é conferida devido a formação espontânea de uma camada de  $Cr_2O_3$  na superfície do material, quando do contato do mesmo com a atmosfera rica em oxigênio (ASM HANDBOOK, 1993). Esses aços são divididos em três classes principais, de acordo com sua microestrutura metalográfica: Ferríticos, Austeníticos e Martensíticos (COUTINHO, 1992).

Os aços inoxidáveis austeníticos são ligas de Fe-Cr que possuem adições de materiais austenitizantes, como Ni, Mn e N. Esses aços possuem estrutura cúbica de face centrada (CFC), são, geralmente, não magnéticos, quando recozidos, e podem ser endurecidos por encruamento a frio. Esses aços são representados na norma AISI pela classe 3xx, podendo possuir teores de cromo de 16 a 26%, níquel até 35% e até 2% de manganês, sendo o níquel o elemento estabilizador da austenita, uma vez que o cromo é um elemento que favorece fortemente a formação de martensita. Outros elementos podem ser adicionados para conferir características adicionais (ASM HANDBOOK, 1993).

O aço AISI 304 possui elevada resistência a corrosão por oxidação, e pode ser utilizado em ambientes agressivos em aplicações industriais, sob presença de ácidos fosfóricos, sulfúricos, acéticos, nítricos em certa concentração, além de outras substâncias, como aldeídos,

aminas, etc. Esse aço não é indicado para uso em ambientes ricos em ácidos nítricos de alta concentração e na presença de ácido clorídrico, que pode gerar corrosão por *pitting* e quebra da camada passivadora desse material (ASM HANDBOOK, 1993). Ele está dentro da classe convencional de aços inoxidáveis austeníticos (ASM HANDBOOK, 1991).

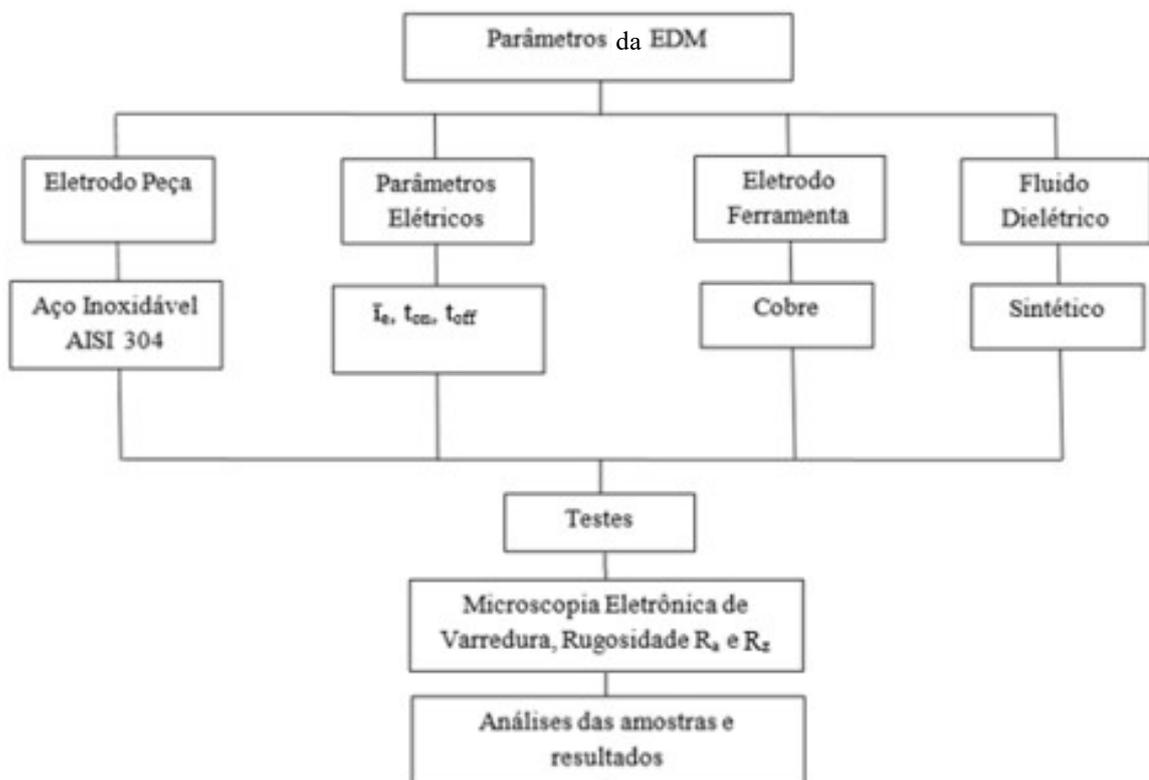
O AISI 304 possui como composição teórica 0,08% de Carbono, 2% de Manganês, 1% de Silício, de 18 a 20% de Cromo, de 8 a 10,5% de Níquel e teores máximos de 0,045% de Fósforo e 0,03 de enxofre. (ASM HANDBOOK, 1991).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo será descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa experimental realizada, bem como os experimentos realizados nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

A Figura 11 mostra o fluxograma com a sequência de procedimentos realizados durante este estudo. Este esquema tem como objetivo planejar e organizar o trabalho investigativo.

**Figura 11 - Fluxograma de planejamento do experimento**



#### 3.1 Material do eletrodo-peça

Para fabricação das cavidades usinadas de aço inoxidável AISI 304, foi adquirida uma barra chata laminada de 3" de largura por 3/8" de espessura e 200 mm de comprimento. Para as amostras utilizadas para visualização em microscópio eletrônico de varredura, foram

utilizadas peças cilíndricas de aço AISI 304, com diâmetro de 12 mm e 10 mm de comprimento, com as quinas chanfradas em 45°. A Tabela 1 mostra a composição química teórica do material.

**Tabela 1 - Composição química do aço AISI 304.**

C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S
0,08	18,0-20,0	8,0-10,5	2,00	1,00	0,045	0,03

Fonte: ASM HANDBOOK, 1991

As Figuras 12 e 13 mostram as peças que foram preparadas para os testes.

**Figura 12 - Barra chata de aço inoxidável AISI 304 retificada.**



Fonte: Acervo do Autor.

**Figura 13 - Peças cilíndricas de aço inoxidável AISI 304 para análise por MEV.**



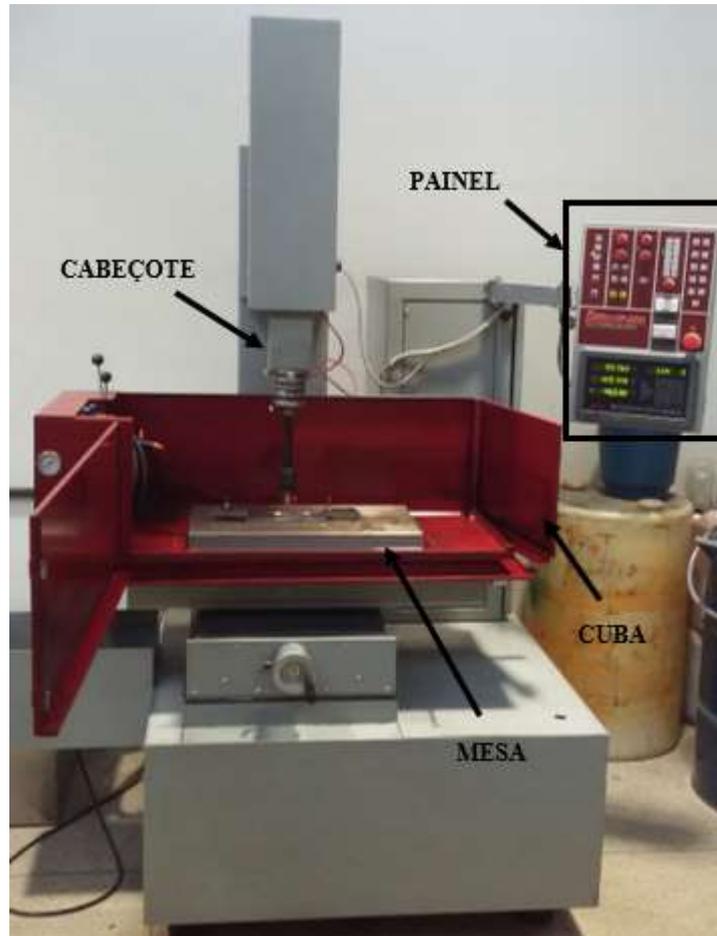
Fonte: Acervo do Autor.

O material foi retificado em uma retificadora plana frontal da marca Zocca, modelo RETT-RPV-650, utilizando rebolo com 6 segmentos de óxido de alumínio branco, formando diâmetro de 250 mm, especificação AA 36 L 5 V com rotação de 1740 rpm. A retificação do material foi feita com velocidade de corte de 1,5 m/min. A fixação da chapa foi feita utilizando morsa fixada à placa magnética da máquina de retífica.

### **3.2 Máquina de EDM**

A máquina de usinagem por descargas elétricas utilizadas para esse estudo é fabricada pela Servspark, modelo Eletroplus EDM-540. A máquina possui cabeçote porta-eletrodo-ferramenta com movimento no eixo Z, com resolução de medida do eixo de 0,001 mm e curso máximo de 270 mm, acionado por motor de passo e capacidade para eletrodos-ferramenta de até 40 kg. A programação dos parâmetros de usinagem é feita utilizando o painel eletrônico, que possui comandos por botoeiras e reguladores e podem ser visualizados em contadores de LED, um amperímetro e um voltímetro na parte inferior do painel. A mesa é apoiada por rolamentos lineares sobre guias temperadas e retificadas para garantir durabilidade e precisão dos movimentos e posicionamentos. A bandeja de trabalho, também denominada cuba, tem abertura lateral e frontal, foi pintada em tinta epóxi e possui capacidade de 350 lts. A potência total, informada no manual da máquina, é de 5 kVA. A Figura 14 mostra a máquina de EDM utilizada no Laboratório de Ajustagem do CEFET-MG.

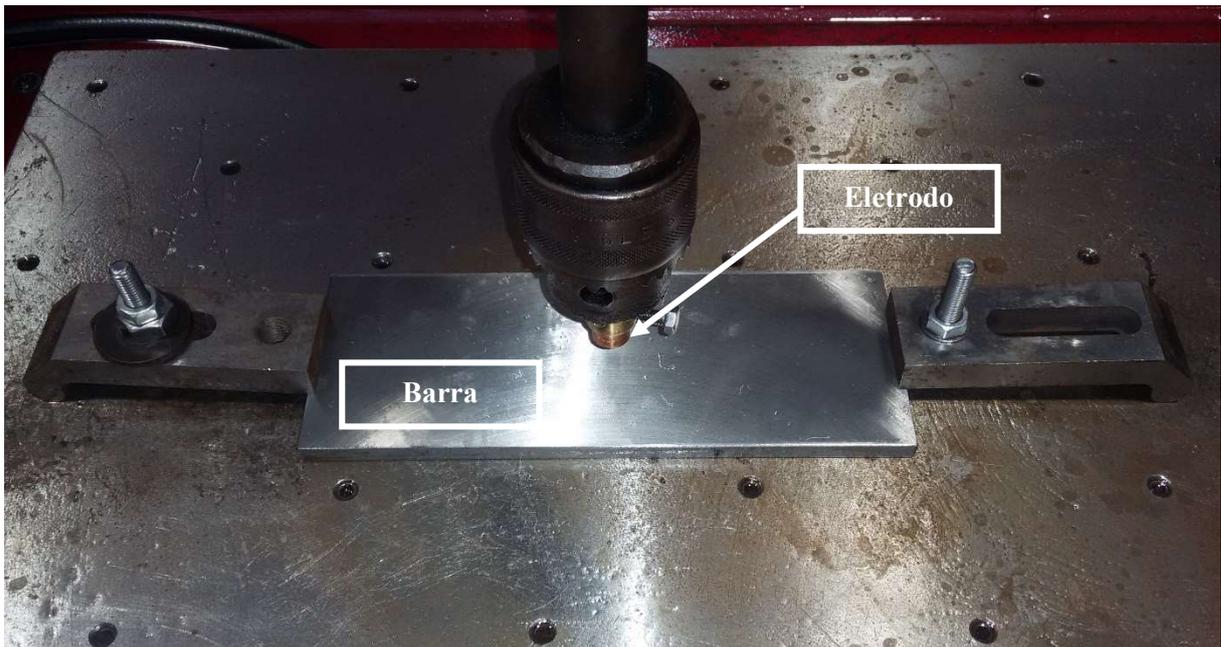
**Figura 14 - Máquina de EDM por penetração Servspark Eletroplus EDM-540 do Laboratório de Ajustagem do CEFET-MG.**



Fonte: Acervo do autor.

A fixação da peça na mesa da máquina foi feita utilizando calços fixados por meio de parafusos, porcas e arruelas, como pode ser observado na Figura 15.

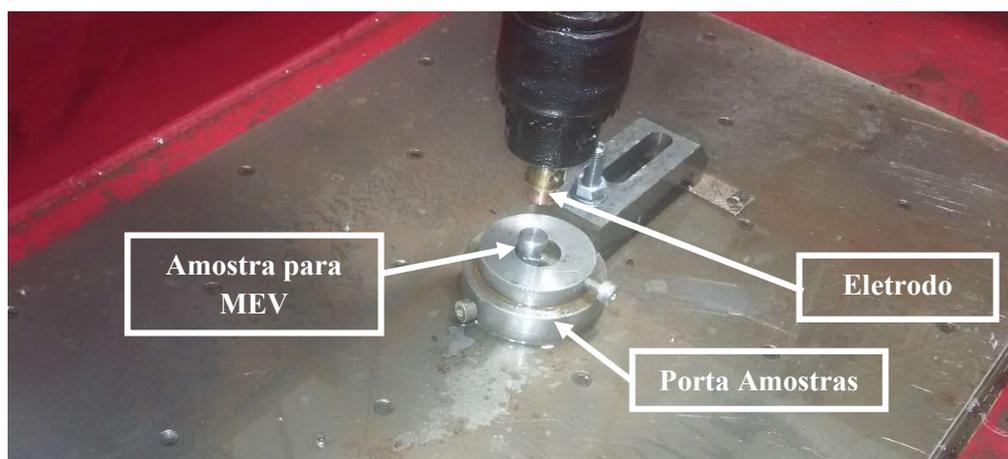
**Figura 15 - Fixação da peça na mesa.**



Fonte: Acervo do autor.

A fixação das peças utilizadas para análise no MEV foi realizada utilizando porta-amostra de aço inoxidável AISI 304 disponível no Laboratório de Ajustagem do CEFET-MG, que foi fixado na mesa utilizando o mesmo calço utilizado para fixação da barra.

**Figura 16 - Fixação da amostra utilizadas para análise no MEV no porta-amostra e na mesa da máquina.**



Fonte: Acervo do autor.

O fluido dielétrico utilizado foi o SOLBRAX ECO 195/240 da Petrobrás. O fluido recircula para a cuba principal utilizando uma bomba de 0,75 CV (552W) de potência. O

sistema de filtragem é composto por 2 filtros de papel. Os testes foram realizados com o fluido dielétrico sem bombeamento, porém foi constantemente recirculado pelo sistema da máquina.

### 3.3 Eletrodo-Ferramenta

Os eletrodos-ferramenta utilizados no experimento são de cobre eletrolítico e foram usinados em formato cilíndrico por torneamento com dimensões de 12,5 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento, como pode ser observado na figura 17.

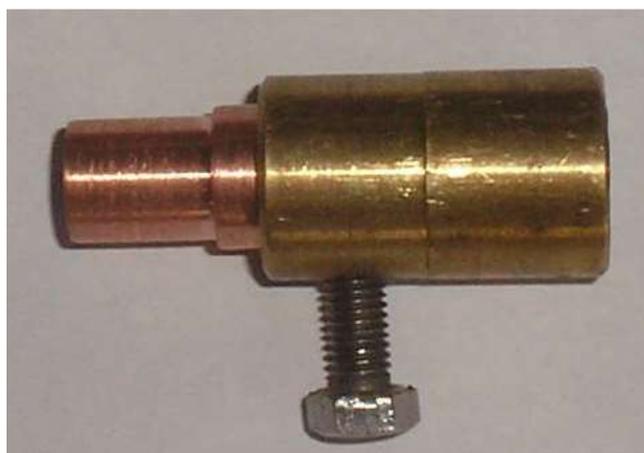
**Figura 17 - Eletrodos-ferramenta de cobre eletrolítico  $\varnothing = 12$  mm e comprimento de 30 mm.**



Fonte: Acervo do autor.

Para a fixação do eletrodo ferramenta no cabeçote da máquina foi utilizada uma pinça de latão, mostrada na Figura 18.

**Figura 18 - Pinça de latão para fixação do eletrodo-ferramenta.**



Fonte: SANTOS, 2007.

Foi escolhido o cobre por ser um material convencionalmente utilizado em EDM devido a sua alta condutividade térmica e a proporcionar um baixo desgaste relativo (ARANTES, 2001). Além disso, de acordo com Lee e Li (2001), o cobre apresenta melhores características de acabamentos superficial quando comparado a outros materiais. A Tabela 2 mostra algumas propriedades do cobre eletrolítico:

**Tabela 2 - Propriedades físicas do cobre eletrolítico.**

<b>Propriedades</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Peso específico	g/cm <sup>3</sup>	8,9
Ponto de Fusão	°C	1083
Resistividade elétrica	Ωmm	0,0167
Condutividade térmica relativa	%	94,3
Condutividade elétrica relativa	%	96,3

Fonte: ARANTES, 2001.

Após a usinagem de cada cavidade ocorria a troca do eletrodo, para retirada da crosta de material carbonetado e garantia de condições semelhantes de usinagem o eletrodo era dressado em um torno mecânico.

### **3.4 Parâmetros de usinagem**

Para escolha dos parâmetros de usinagem e de saídas avaliados, foi realizado um pré-teste, onde foram usinadas peças de aço ABNT 1045 utilizando EDM. Como era pretendido estudar os efeitos da variação da corrente, foram fixados os demais parâmetros de acordo com a Tabela 3.

**Tabela 3 - Parâmetros de usinagem fixados para experimento.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Polaridade do eletrodo-ferramenta (cobre eletrolítico)	+/-	+
Tensão em aberto ( $\hat{u}_i$ )	V	175
Tensão média de trabalho ( $\bar{u}_e$ )	V	50
$T_{on}$	$\mu s$	200
<i>Gap</i>	*	2
Sensibilidade	*	2
Afastamento	*	3
Tempo de erosão	*	2

\* Parâmetros regulados na máquina.

O tempo de desligamento  $T_{off}$  (indicado na máquina) foi variado de modo a garantir melhor desempenho de usinagem, indicado na máquina (SERVSPARK, 2014).

A profundidade das cavidades usinadas foi de 1 mm.

A regulagem de corrente na máquina é realizada por meio de TS e é definida pela equação 2:

$$1 \text{ TS} = 2,5 \text{ A} \quad (4)$$

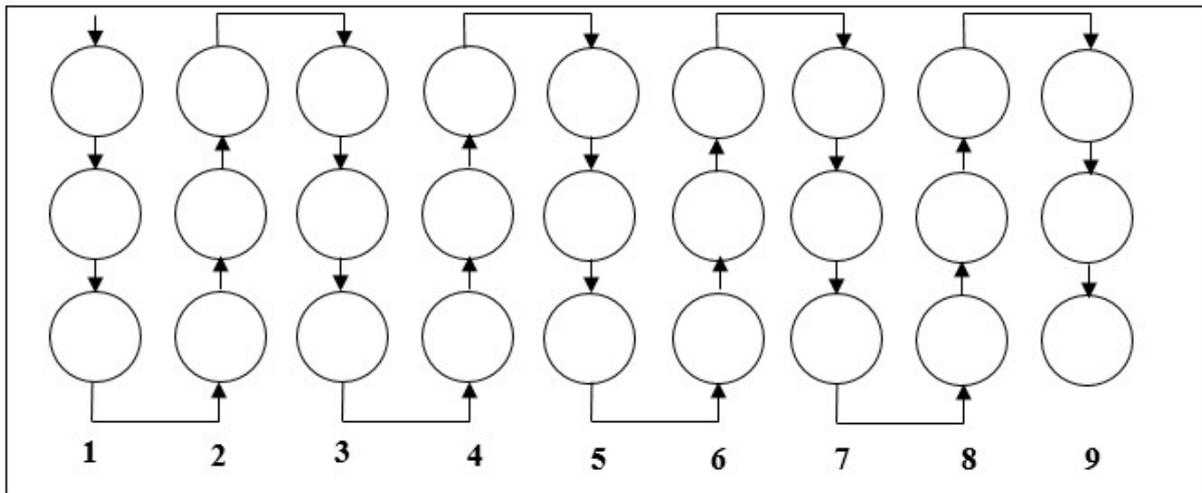
Foram feitas três cavidades utilizando cada intensidade de corrente reguladas pelos TS conforme a Tabela 4. As cavidades foram usinadas em ordem decrescente de TS e foram feitas a partir de 5 mm da borda superior e esquerda da peça, mantendo entre elas um distanciamento de 3 mm. A representação esquemática da ordem de usinagem da barra pode ser observada na Figura 19.

Para a usinagem das amostras para caracterização por MEV, foram utilizadas as configurações com TS = 1,5, TS = 5,5, TS = 10,5 e TS = 19,5. O restante dos parâmetros foram os mesmos utilizados para a confecção das cavidades na peça.

**Tabela 4 - Intensidade de corrente medida de acordo com quantidade de TS.**

Nº das Cavidades	TS	Corrente - $i_c$ (A)
1	19,5	33
2	16,5	29
3	13,5	25
4	10,5	22
5	7,5	16
6	5,5	13
7	3,5	8
8	2,5	6
9	1,5	3

Fonte: Acervo do Autor.

**Figura 19 - Figura esquemática da sequência de usinagem da barra.**

Fonte: Acervo do Autor.

A usinagem por descargas elétricas por penetração foi realizada no sentido perpendicular à espessura da peça. O nível de fluido dielétrico na cuba foi regulado de modo que ambos, a peça e o eletrodo-ferramenta, estivessem completamente submersos, como pode ser observado na Figura 20.

**Figura 20 - Usinagem por descarga elétrica.**



Fonte: Acervo do autor.

### **3.5 Análise da topografia do material usinado por EDM**

Para fazer a avaliação da rugosidade das cavidades usinadas, inicialmente, foi feita uma limpeza superficial das peças, para minimizar a influência da camada carbonetada e de resíduos provenientes da usinagem. Essa limpeza foi realizada utilizando uma escova de cerdas finas e macias para evitar qualquer alteração na superfície das cavidades.

As cavidades foram avaliadas utilizando-se um rugosímetro da marca TESA, modelo Rugosurf 20 mostrado na Figura 21. De acordo com a ficha técnica do equipamento descrita no manual, ele possui resolução de  $0,001 \mu\text{m}$ , podendo utilizar para análise de 1 a 5 *cut-offs*, com comprimentos que devem ser pré-definidos de 0,25, 0,8 ou 2,5 mm, e com força de contato de 0,75 mN conforme norma ISO 3274. Os resultados são obtidos com filtro Gaussiano de acordo com a norma ISO 11562.

O rugosímetro foi posicionado sobre uma superfície plana, livre de vibrações e inclinação que poderiam influenciar a medição.

**Figura 21 - Rugosímetro TESA Rugosurf 20.**



Fonte: Acervo do autor.

Foi analisada a rugosidade para obtenção dos parâmetros  $R_a$  e  $R_z$ . Para as medidas dos parâmetros foram admitidos os seguintes valores:

- Número de *cut-offs* = 5
- *Cut-off* = 0,8 mm
- $l = 4$  mm

De acordo com a norma alemã VDI 3402, os parâmetros de rugosidade considerados como referência para avaliação da textura superficial de peças fabricadas por EDM são  $R_a$  e  $R_z$  (AMORIM, 2002).

Em cada amostra a rugosidade foi medida em três regiões diferentes. Na barra chata, as análises foram feitas no sentido perpendicular ao comprimento. Nas amostras para MEV e nos eletrodos correspondentes foram feitas 3 medidas em um mesmo sentido, que foi definido aleatoriamente.

Foram feitos, ainda, análises de imagem utilizando MEV nas amostras usinadas, conforme indicado anteriormente.

Para a análise da topografia, foi utilizado o MEV da marca SHIMADZU, modelo SSX-550 Superscan, disponível no Laboratório de Caracterização do Departamento de Materiais do CEFET-MG, e foram utilizados aumentos de 50 e 100 vezes.

**Figura 22 - Microscópio Eletrônico de Varredura SHIMADZU SSX-550 Superscan.**



Fonte: Acervo do Autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos na avaliação da influência da variação da intensidade da corrente elétrica no acabamento superficial das peças usinadas por EDM por penetração. Foram feitas as análises estatísticas dos resultados de rugosidade das peças usinadas e, em seguida, foram confeccionados gráficos que foram analisados e utilizados para discussão dos resultados obtidos.

**Figura 23 - Barra chata de aço AISI 304 usinada por EDM**



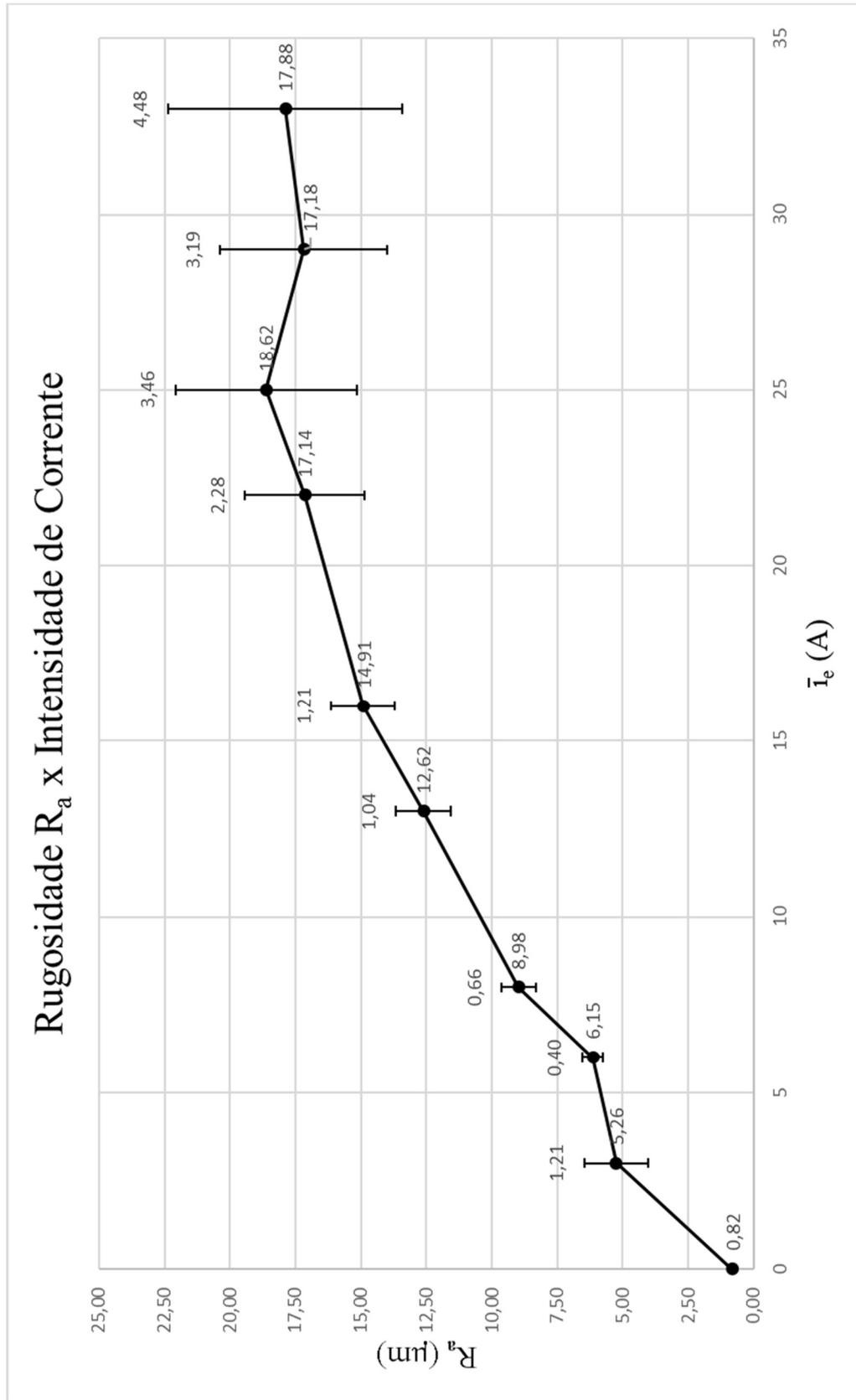
Fonte: Acervo do autor

### 4.1 Rugosidade

#### 4.1.1 *Rugosidade média aritmética $R_a$*

A rugosidade média  $R_a$  das cavidades medida e respectivos desvios padrões podem ser observados no gráfico da Figura 24.

Figura 24 - Rugosidade média aritmética  $R_a$  nas cavidades e desvios padrão com cada intensidade de corrente analisada.



Pode-se perceber que a rugosidade  $R_a$  aumenta à medida que se aumenta a intensidade da corrente até um momento em que se há uma pequena queda seguida de estabilização da rugosidade. Comportamento semelhante foi observado por vários autores (LEE e LI, 2001; ARANTES, 2003; KIYAK e ÇAKIR, 2007; SALEM et al. 2011). Foi medido o  $R_a$  da barra retificada de  $0,82 \mu\text{m}$ , esse valor foi considerado como rugosidade inicial.

O menor valor médio de  $R_a$  observado foi para corrente de 3 A, com  $R_a = 5,256 \mu\text{m}$ , e o maior foi com corrente de 25 A, com  $R_a = 18,615 \mu\text{m}$ .

Os desvios observados no  $R_a$ , principalmente para valores os maiores de corrente, podem ocorrer devido a um desgaste desigual das crateras, que faz com que as mesmas possuam profundidades não uniformes, gerando um desvio maior dos picos e vales em relação a linha média. Além da precipitação de partículas ressolidificadas na superfície que podem gerar não uniformidades maiores na rugosidade (SALEM et al. 2011).

Foi medida a rugosidade  $R_a$  do eletrodo-ferramenta de cobre eletrolítico após o processo de usinagem das amostras para MEV. Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 5.

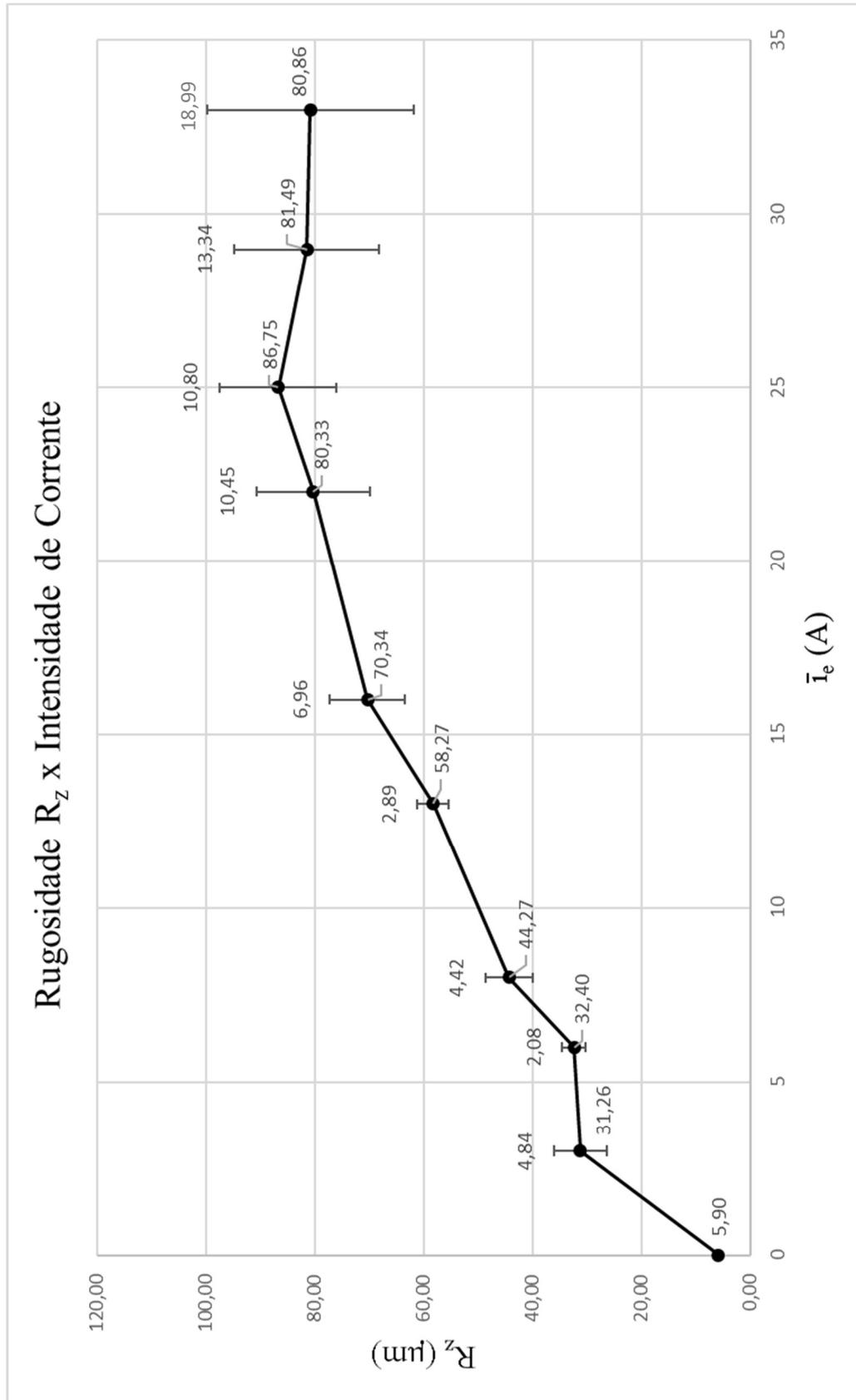
**Tabela 5 - Rugosidade  $\bar{R}_a$  dos eletrodos de cobre.**

Corrente (A)	$\bar{R}_a$	$\sigma$
3	2,14	0,21
13	2,76	0,52
22	2,89	0,43
33	3,40	0,04

#### **4.1.2 Rugosidade média das amplitudes dos maiores picos e vales no cut-off ( $R_z$ )**

A rugosidade  $R_z$  obtida após a usinagem e os desvios padrão estão representados no gráfico da Figura 25. Foi medida o valor de  $R_z$  na barra retificada, com valor de  $5,90 \mu\text{m}$ , esse valor foi considerado como rugosidade inicial no gráfico.

Figura 25 - Rugosidade  $R_z$  nas cavidades e desvios padrão com cada intensidade de corrente analisada.



Observando-se o gráfico de  $R_z$ , percebe-se que o comportamento do gráfico é um aumento gradual da rugosidade das cavidades junto ao aumento da intensidade de corrente até 25 A, quando ocorre estabilização da rugosidade. Os desvios observados na medição do parâmetro  $R_z$  são maiores conforme aumento de corrente e estão relacionados a não uniformidade das crateras produzidas durante o processo (PELLICER et al. 2011).

O aumento da rugosidade com a intensidade da corrente está intrinsecamente relacionado ao aumento do tamanho e profundidade das crateras formadas na EDM. A natureza térmica da remoção de material do processo de usinagem por descargas elétricas causa a formação de crateras mais profundas e mais largas, à medida que quantidades maiores de energia são fornecidas (AMORIM, 2002). Lee e Li (2001), Kiyak e Çakir (2007), Salem et al (2011) observaram que a corrente é o parâmetro que tem maior influência na rugosidade na EDM e uma maior intensidade de corrente irá gerar uma maior rugosidade, quando os outros parâmetros são mantidos constantes.

Analisando os gráficos, a estabilização da rugosidade em patamares maiores de corrente elétrica, pode ser atribuído a superposição de crateras na superfície da peça, devido a esse aumento gradual do tamanho e profundidade das cavidades (TORRES et al. 2015).

A rugosidade  $R_z$  dos eletrodos de cobre também foi medida para as correntes de 3, 13, 22 e 33 A, e pode ser observado na Tabela 6 abaixo. Assim como para a cavidade usinada, observou-se, também, o aumento da rugosidade com o aumento da intensidade da corrente, corroborando a teoria de acabamento “espelho” entre eletrodo-ferramenta e peça defendida por diversos autores, que informam que um maior desgaste no eletrodo irá gerar um acabamento superficial pior (GUITRAU, 1997; MCGEOUGH, 1988; EL-HOFY, 2005).

**Tabela 6 - Rugosidade  $\bar{R}_z$  dos eletrodos de cobre.**

<b>Corrente (A)</b>	<b><math>\bar{R}_z</math></b>	<b><math>\sigma</math></b>
3	13,11	1,97
13	16,36	2,72
22	17,14	1,88
33	20,77	0,30

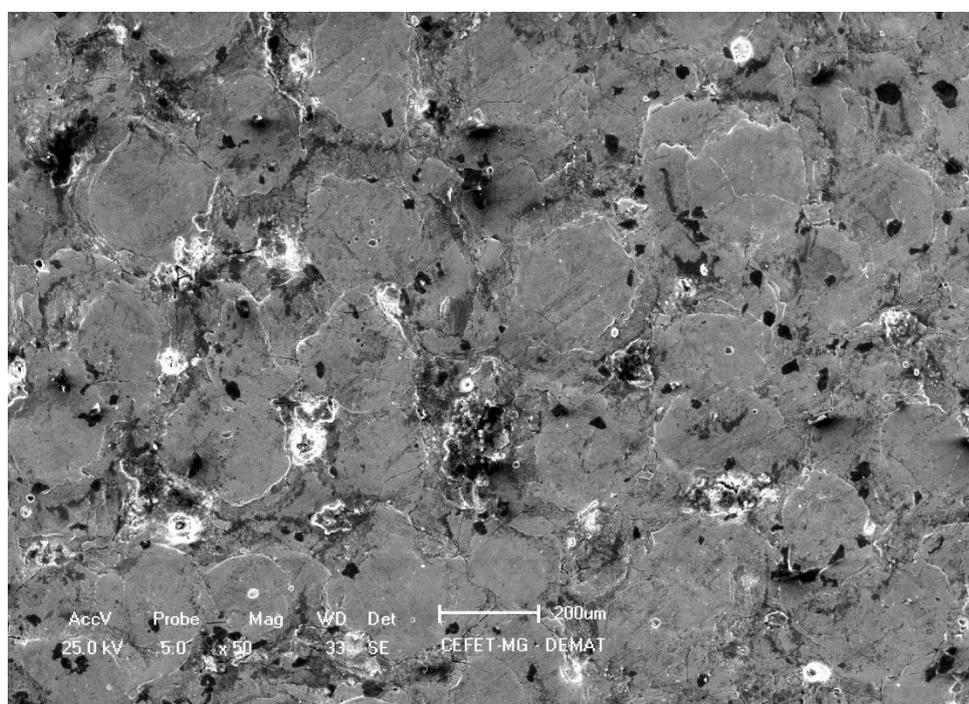
## 4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

As imagens de MEV feitas com os diferentes aumentos podem ser observados nas figuras a seguir em ordem crescente de corrente e aumento.

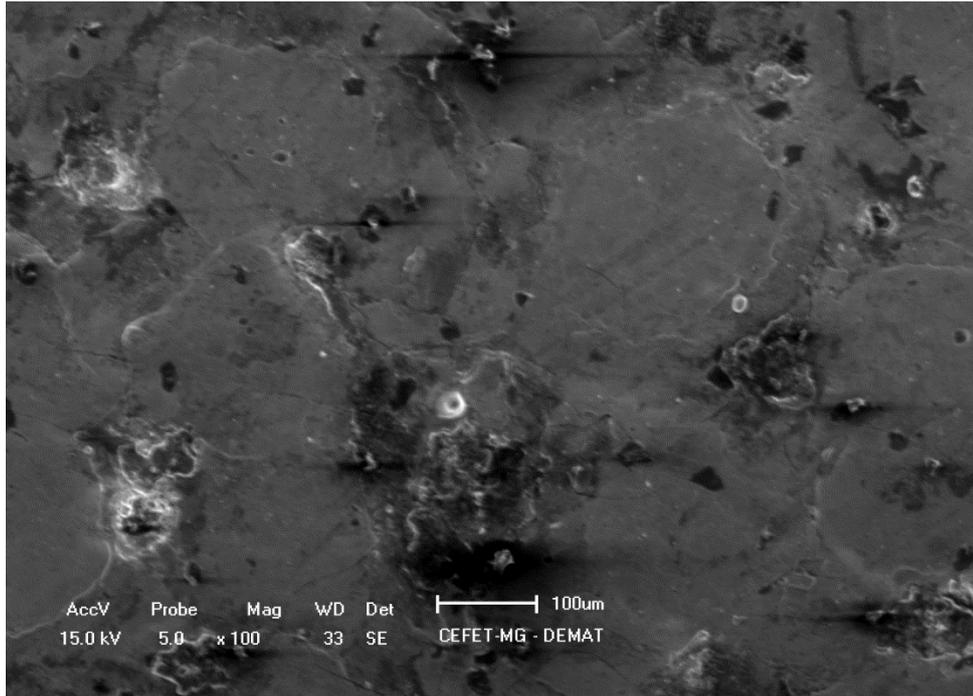
Nas Figuras 26 (a) e (b) podem-se observar a disposição das crateras lado a lado, com formato circular, com a presença de pequenas partículas ressolidificadas, de coloração mais clara, na superfície, principalmente nas bordas das crateras.

**Figura 26 - MEV do aço AISI 304 usinado por EDM com corrente de 3 A com aumentos de 50x (a) e 100x (b)**

(a)



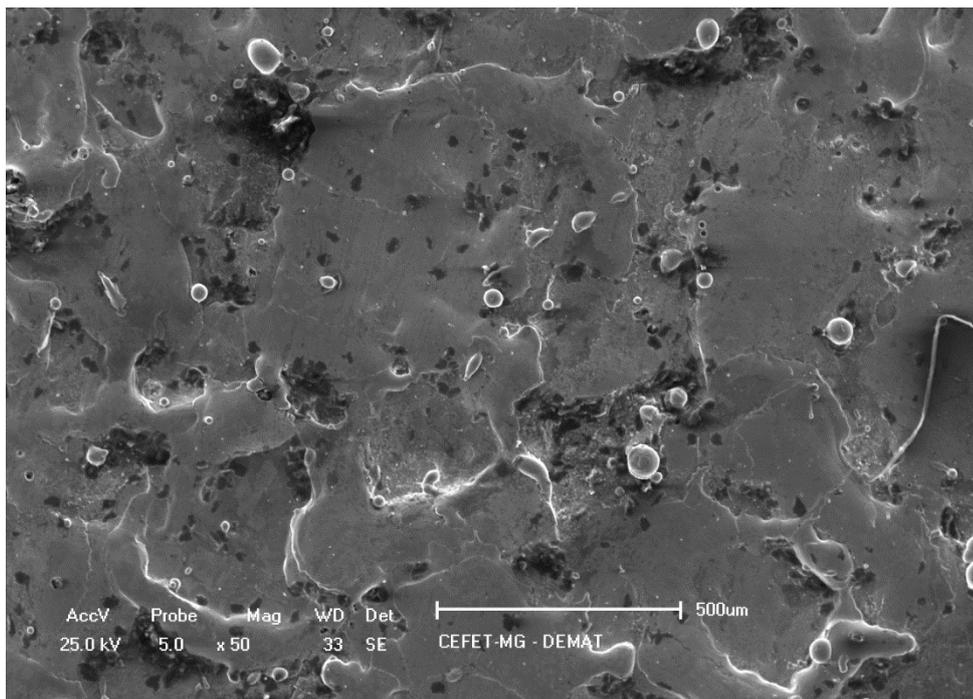
(b)



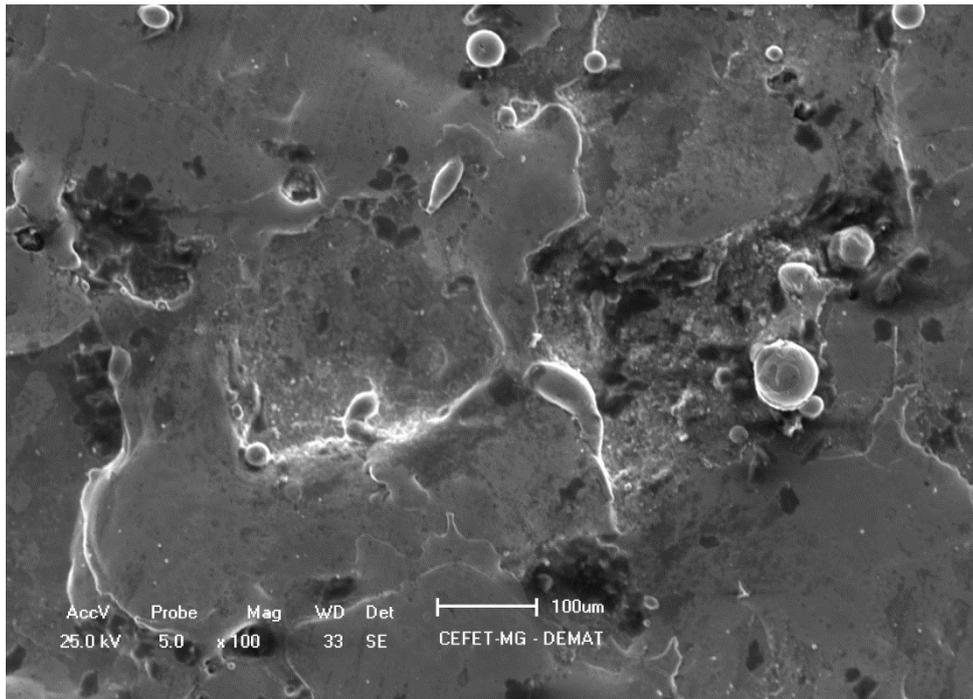
Na Figura 27, pode-se observar o aumento no tamanho das crateras, bem como aumento das partículas ressolidificadas. Observa-se também que o tamanho e formato das crateras se torna mais irregular em comparação com a cavidade usinada com a corrente menor.

**Figura 27 - MEV do aço AISI 304 usinado por EDM com corrente de 12 A com aumentos de 50x (a) e 100x (b)**

(a)



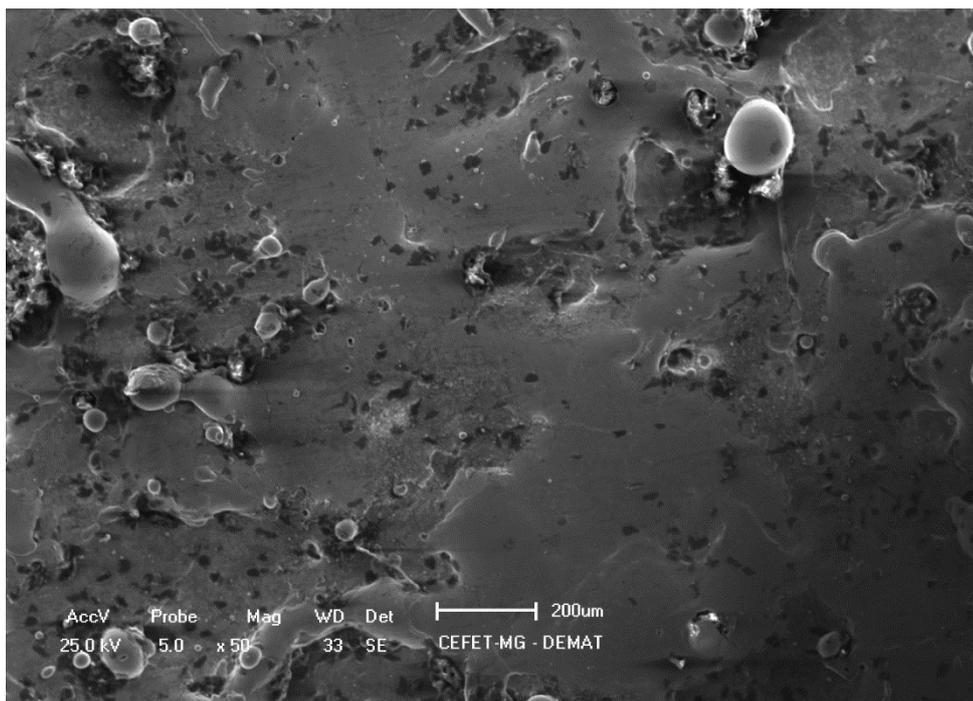
(b)



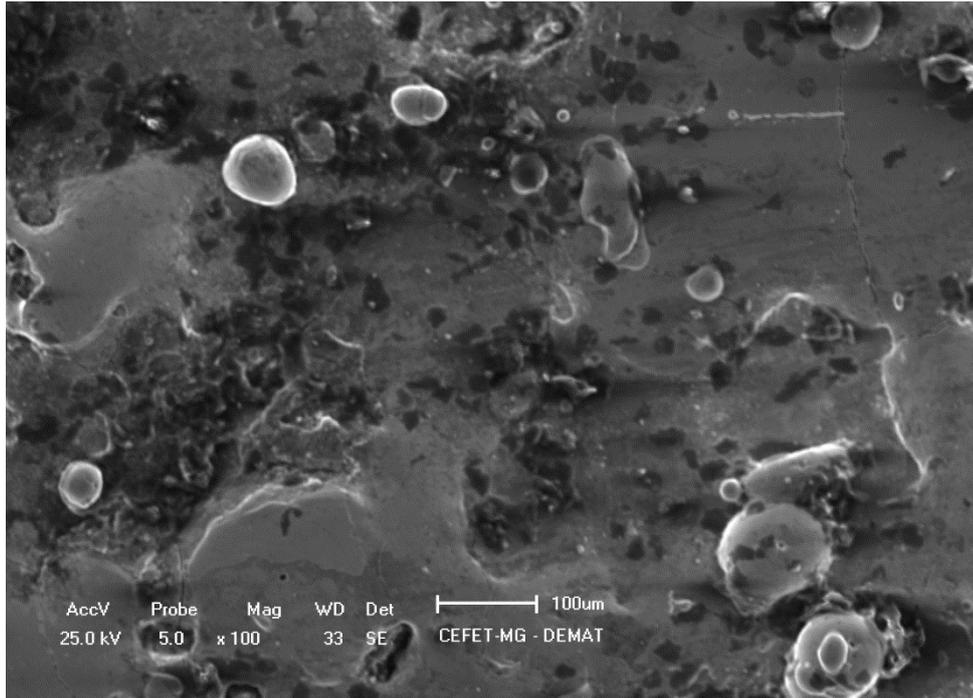
Na Figura 28, com aumento da corrente, há um novo aumento das crateras, com uma grande irregularidade dos formatos e tamanhos das mesmas. Há também aumento na quantidade e no tamanho das partículas refundidas, que estão não somente nas extremidades das crateras.

**Figura 28 - MEV do aço AISI 304 usinado por EDM com corrente de 22 A com aumentos de 50x (a) e 100x (b)**

(a)



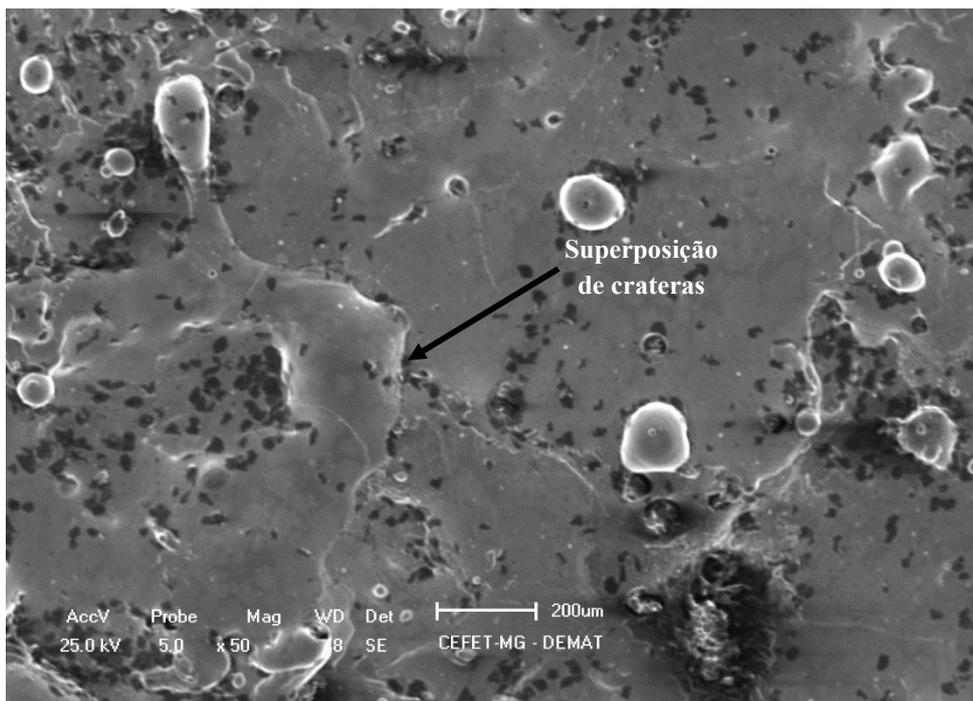
(b)



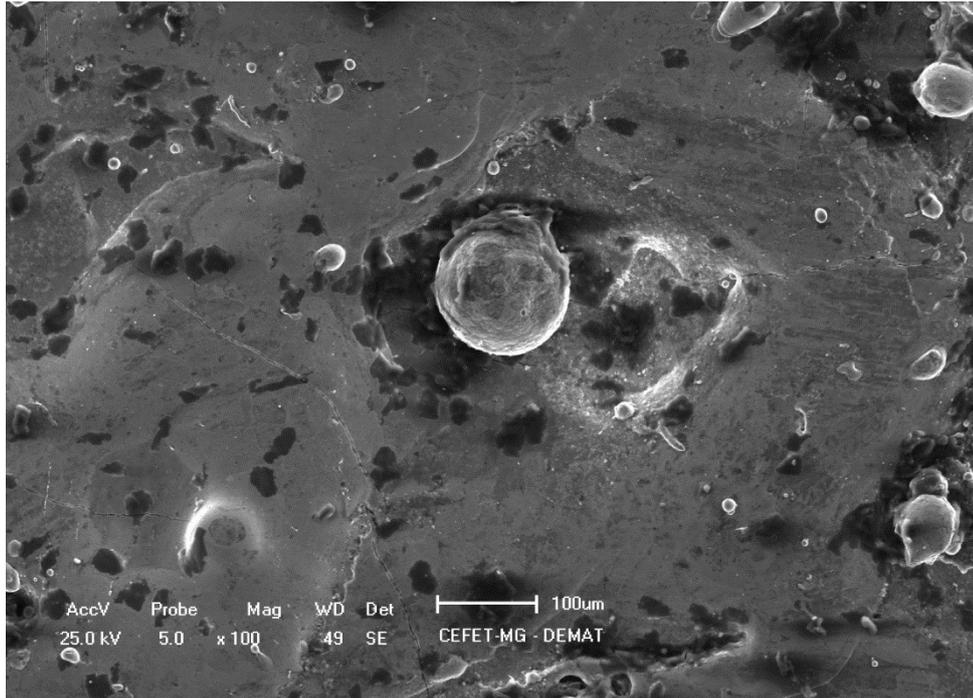
Na Figura 29, pode-se observar a superposição das crateras e um aumento da quantidade de partículas resolidificadas. Observa-se também maior irregularidade das crateras e a presença de respingos nas extremidades das crateras.

**Figura 29 - MEV do aço AISI 304 usinado por EDM com corrente de 33 A com aumentos de 50x (a) e 100x (b)**

(a)



(b)



As imagens demonstram que o aumento da corrente implica no aumento do tamanho e da irregularidade das crateras geradas durante a EDM, podendo ocorrer a sobreposição de crateras. É observado também o aumento no tamanho e na quantidade de partículas ressolidificadas na superfície. (TORRES, 20015)

## 5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões baseadas na análise dos resultados apresentados no Capítulo 4, obtidos utilizando o processo experimental descrito no Capítulo 3.

Depois do desenvolvimento deste trabalho, concluiu-se que:

- A rugosidade resultante do processo de EDM, para ambos os parâmetros estudados ( $R_a$  e  $R_z$ ) está diretamente relacionada a intensidade de corrente no processo. Com a elevação da corrente, há a elevação da rugosidade;
- Para valores mais elevados de corrente, ocorre a formação de crateras mais profundas, o que deveria gerar maiores valores de rugosidade, porém, após um patamar, acima de 25 A, ocorre a estabilização da rugosidade. Esse fato pode estar relacionado ao aumento da largura das crateras, o que gera uma superposição das mesmas e um conseqüente menor número de picos.
- A elevação da corrente também aumenta os desvios encontrados na medição dos parâmetros, pois quanto maior a energia utilizada no processo de descarga elétrica maior a aleatoriedade dos tamanhos e formatos da cratera. Como correntes elevadas são principalmente utilizadas em operações de desbaste, onde a qualidade superficial da peça não é o maior enfoque, a rugosidade das cavidades é uma característica secundária do processo.
- O comportamento da rugosidade do eletrodo-ferramenta com o aumento da corrente é semelhante ao comportamento da rugosidade no eletrodo-peça. Com o aumento da corrente, aumenta-se a rugosidade, tanto para  $R_a$  quanto para  $R_z$ .
- As imagens observadas por MEV corroboram as observações feitas durante a análise das rugosidades medidas, com uma maior irregularidade superficial, com crateras maiores e com quantidade maior de partículas ressolidificadas, podendo-se observar em algumas imagens a superposição de crateras.

## REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análises de Dimensões**. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1986
- 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. 156 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- ARANTES, L. J. et al. **Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão**. Ouro Preto: Revista Escola de Minas, 2003. 6 p.
- ASM HANDBOOK. **Heat Treating**. USA.: Ed. ASM International, 9a Ed.1991. Vol 4.
- ASM HANDBOOK. **Metallography and Microstructures**. USA.: Ed. ASM International, 10a Ed.1993. Vol 1.
- COUTINHO, C. B. **Materiais Metálicos para Engenharia**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1992. 405 p.
- EL-HOFY, H. A. **Advanced Machining Process: Nontraditional and Hybrid Machining Processes**. Cairo: Mcgraw-hill, 2005. 253 p.
- GUITRAU, E. P. **The EDM Handbook**. Cincinnati: Hansen Gardner, 1997.
- HO, K.H; NEWMAN, S.T. State of the art electrical discharge machining (EDM). **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s.l.], v. 43, n. 13, p.1287-1300, out. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955\(03\)00162-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955(03)00162-7)
- KIYAK, M.; ÇAKIR, O. Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 191, n. 1-3, p.141-144, ago. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprot.2007.03.008>
- LEE, S.P.; LI, X.P. Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide. **Journal of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 115, n. 3, p.344-358, set. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(01\)00992-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(01)00992-x).

MCGEOUGH, J. A. **Advanced Methods of Machining**. Londres: Hapman and Hall, 1988. 246 p.

NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**. [s.l.]: Editora Edgard Blücher Ltda., 1994. 128 p.

OLIVEIRA, C. J. DE. **Avaliação da influência de sistemas de filtragem aplicados a topografia de superfícies em usinagem**. 2004. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

PERCILLER, N.; CIURANA, J.; DELGADO, J. Tool electrode geometry and process parameters influence on different feature geometry and surface quality in electrical discharge machining of AISI H13 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. [s.l.], v. 22, n.4, p 575-584, out. 2009. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-009-0320-8>.

SALEM, S. B.; TEBNI, W.; BAYRAKTAR, E. Prediction of Surface roughness by experimental design methodology in Electrical Discharge Machining (EDM). **Journal Of Achievements In Materials And Manufacturing Engineering**. França, p. 1-2. 01 dez. 2011.

SANTOS, R. F. DOS. **Influência do material da peça e do tratamento térmico na eletroerosão nos aços AISI H13 e AISI D6**. 2007. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SCHMITZ, L. L. **Análise da influência da intensidade de corrente no acabamento de superfície e na taxa de remoção de material do aço ABNT 1020, no processo de eletroerosão por penetração**. 2007. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SERVSPARK. **Manual de Operação: Eletroplus EDM-540**. Pirituba: Servspark, 2014.

TORRES, A.; LUIS, C.J.; PUERTAS, I. Analysis of the influence of EDM parameters on surface finish, material removal rate, and electrode wear of an INCONEL 600 alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. [s.l.]. v. 80, n 1-4, p. 123-

140. 23 mar 2015. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-6974-9>.

Disponível em: <http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarollo/edm/>, acesso em 01/05/2016.