

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

DARLAN MACHADO DO AMARAL

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO VARIANDO
O RAIO DO ELETRODO E A CORRENTE**

CAXIAS DO SUL

2020

DARLAN MACHADO DO AMARAL

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO VARIANDO
O RAIO DO ELETRODO E A CORRENTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de Máquinas de Usinagem e Conformação.

Orientador Prof. Rodrigo Panosso Zeilmann.

CAXIAS DO SUL

2020

DARLAN MACHADO DO AMARAL

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO VARIANDO
O RAIOS DO ELETRODO E A CORRENTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de Máquinas de Usinagem e Conformação.

Aprovado em ____/____/____

Banca Examinadora

Prof. Dr. Leandro Luis Corso
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr Marcos Alexandre Luciano
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul – UCS

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, às minhas irmãs, cunhados e sobrinhos, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado ao longo da realização deste projeto, de uma forma ou outra todos contribuíram para que mais esta etapa em minha fosse concluída com êxito.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus, que me fez ser perseverante, me concedeu saúde, me mostrou que nada é impossível quando temos fé, permitido que mais esta etapa da minha vida fosse concluída com sucesso.

À minha família, especialmente minha mãe Jurema e meu pai Ari, que sempre me incentivaram e não permitiram que eu parasse ao longo deste longo caminho que percorri para chegar ao fim da graduação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann, por todo conhecimento que me transmitiu, pelo tempo e paciência ao longo deste projeto e durante a graduação, sempre acompanhando o desenvolvimento do trabalho e me orientando para obter excelência na conclusão.

Aos demais integrantes da minha família, irmãs, cunhados e sobrinhos que sempre me apoiaram e acreditaram no meu potencial.

Agradeço a toda a equipe do grupo de usinagem (GUS), ao Gaston Rossa e o José Giubel pelo auxílio prestado para que fosse possível a realização dos testes necessários.

Agradeço a todos os colegas que conheci e me ajudaram de uma forma ou outra por este longo período de aprendizado.

Agradeço a Universidade de Caxias do Sul (UCS), pela disponibilização do laboratório, equipamentos e matérias necessários para a realização deste projeto.

RESUMO

Para a fabricação de diversos produtos utilizados pelo homem, necessita-se da utilização de um molde, esses puderam ser produzidos através do processo de eletroerosão (EDM). Este processo destacou-se por ser utilizado em materiais de difícil usinabilidade e geometrias complexas. Neste trabalho foi realizado a análise da integridade do aço AISI P20, como variáveis de entrada foram analisados eletrodos com dois raios diferentes, foram erodidas duas cavidades com cada raio, sendo que uma delas foi aplicado o processo de acabamento com corrente mais baixa de 1,5A e na outra foi aplicado apenas a condição de desbaste, com a corrente mais alta de 18A. As amostras foram cortadas e embutidas. Foram realizadas análises na rugosidade, dureza, textura e camada branca. A cavidades apresentaram uma rugosidade maior na saída do fluído dielétrico, do mesmo modo a textura e a dureza apresentaram valores mais elevados nesta região. Nas cavidades onde não foram aplicadas as condições de acabamento, nota-se a presença de uma grande quantidade de material resolidificado, aumentando a rugosidade e a camada branca, prejudicando a qualidade superficial. Comprovou-se que o fluxo do dielétrico influenciou nas regiões das cavidades. Contudo, na comparação entre os quatro raios de estudo, não foram encontradas mudanças significativas.

Palavra chave: Eletroerosão, EDM, Rugosidade.

ABSTRACT

For the manufacture of several products used by man, it is necessary to use a mold, which can be produced through the electrical discharge machining process (EDM). This process stands out for being used in difficult-to-machine materials and complex geometries. In this work, the analysis of the integrity of AISI P20 steel was carried out. Two different electrode radii were used as input variables for the analysis. Two cavities were eroded with each of the chosen radii. In one of them, the finishing process was applied with a lower current of 1,5A and in the other, only the roughing condition was applied, with a higher current of 18A. The samples were cut and embedded in epoxy resin. Roughness, hardness, texture and white layer were analyzed. The cavities showed greater roughness, texture and hardness in the dielectric fluid outlet region. In the cavities where the finishing conditions were not applied, the presence of a large amount of resolidified material was observed, increasing the roughness and the white layer, jeopardizing surface quality. It was verified that the flow of the dielectric influenced the regions of the cavities. However, in the comparison between the four study radii, no significant changes were found.

Keywords: Electrical discharge machining, EDM, Roughness.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: FASES DE UMA DESCARGA ELÉTRICA NO PROCESSO.....	18
FIGURA 2: PRINCÍPIO OPERACIONAL DO EQUIPAMENTO DE ELETROEROSÃO.....	19
FIGURA 3: ESQUEMA DA USINAGEM DE ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO.....	20
FIGURA 4: ESQUEMA DA USINAGEM POR ELETROEROSÃO A FIO.....	21
FIGURA 5: CAMADAS EXISTENTES NA SUPERFÍCIE GERADA PELA ELETROEROSÃO.....	27
FIGURA 6: SUPERFÍCIES ERODIDAS: A) ALUMÍNIO; B) PRATA; C) LATÃO; D) COBRE; E) NÍQUEL; F) AÇO; G) PLATINA H) TITÂNIO; I) AÇO INOXIDÁVEL; J) TÂNTALO; K) MOLIBDÊNIO; L) TUNGSTÊNIO.....	28
FIGURA 7: RAIOS DOS ELETRODOS.....	30
FIGURA 8: PONTOS DE ANÁLISE NO CORPO DE PROVA.....	31
FIGURA 9: ENGEMAQ 440 NC.....	32
FIGURA 10: DURÔMETRO VICKERS MICROINDENTER SHIMADZU MITUTOYO.....	33
FIGURA 11: FLUXOGRAMA.....	34
FIGURA 12: ELETRODOS APÓS PROCESSO DE ELETROEROSÃO.....	36
FIGURA 13: ELETRODO COM RAIOS DE 0,5 MM ANTES DA ELETROEROSÃO.....	36
FIGURA 14: ELETRODO COM RAIOS DE 0,5 MM DEPOIS DA ELETROEROSÃO.....	37
FIGURA 15: ELETRODO COM RAIOS DE 1,5 MM ANTES DA ELETROEROSÃO.....	37
FIGURA 16: ELETRODO COM RAIOS DE 1,5 MM APÓS ELETROEROSÃO.....	38
FIGURA 17: CAMADA AFETADA CONDIÇÃO 1 (RAIO DE 1,5 MM; DESBASTE).....	38
FIGURA 18: ÁREA SELECIONADA PARA MEDIDA CAMADA BRANCA CONDIÇÃO 1.....	39
FIGURA 19: CAMADA AFETADA CONDIÇÃO 2 (RAIO DE 0,5 MM; DESBASTE).....	39
FIGURA 20: ÁREA SELECIONADA PARA MEDIDA CAMADA BRANCA CONDIÇÃO 2.....	40
FIGURA 21: CAMADA AFETADA CONDIÇÃO 3 (RAIO DE 0,5 MM; ACABAMENTO).....	40
FIGURA 22: ÁREA SELECIONADA PARA MEDIDA CAMADA BRANCA CONDIÇÃO 3.....	41
FIGURA 23: CAMADA AFETADA CONDIÇÃO 4 (RAIO DE 1,5 MM; ACABAMENTO).....	41
FIGURA 24: ÁREA SELECIONADA PARA MEDIDA CAMADA BRANCA CONDIÇÃO 4.....	42
FIGURA 25: REGIÕES DE ANÁLISES.....	43
FIGURA 26: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA MÉDIA DAS RUGOSIDADES.....	44
FIGURA 27: REPRESENTAÇÃO DA ANÁLISE REALIZADA POR MICRO - INDENTAÇÃO.....	45
FIGURA 28: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DUREZA POR MICRO-INDENTAÇÃO CONDIÇÃO 1.....	45
FIGURA 29: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DUREZA POR MICRO-INDENTAÇÃO CONDIÇÃO 2.....	46
FIGURA 30: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DUREZA POR MICRO-INDENTAÇÃO CONDIÇÃO 3.....	46

FIGURA 31: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DUREZA POR MICRO-INDENTAÇÃO CONDIÇÃO 4.....	47
FIGURA 32: TEXTURA DO FUNDO DAS CAVIDADES ERODIDAS	48

LISTA DE SIGLAS

CNC	Comando Numérico Computadorizado
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i> (Usinagem por Descarga Elétrica)
UCS	Universidade de Caxias do Sul
GUS	Grupo de Usinagem

LISTA DE SÍMBOLOS

i	Corrente (A)
T_{OFF}	Tempo de onda desligado (μs)
T_{ON}	Tempo de onda ligado (μs)
Ra	Rugosidade média aritmética; (μm)
Rq	Rugosidade média quadrática; (μm)
Rz	Rugosidade Máxima; (μm)
DT	Relação de tempo de trabalho; (%)

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS	29
TABELA 2: QUANTIDADE DE ELEMENTOS DE LIGA NO AÇO P2O (%)	31
TABELA 3: PARÂMETROS UTILIZADOS PARA ELETROEROSÃO	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	AMBIENTE DE TRABALHO	15
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	15
1.3	OBJETIVOS.....	16
1.3.1	Objetivo geral.....	16
1.3.2	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO BILIOGRAFICA.....	17
2.1	ELETROEROSÃO	17
2.1.1	Tipos de eletroerosão	20
2.2	PARAMETROS INFLUENTES NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO	22
2.2.1	Parâmetros de controle.....	22
2.3	QUALIDADE SUPERFICIAL NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO	25
2.3.1	Integridade superficial.....	25
2.3.2	Textura.....	25
2.3.3	Rugosidade.....	25
2.3.4	Camadas e sub-superfícies	26
3	MATERIAS E MÉTODOS	29
3.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	29
3.2	MATERIAL DO ELETRODO	30
3.3	MATERIAL DO CORPO DE PROVA.....	31
3.4	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	32
3.5	VARIAVEIS À SEREM MEDIDAS	33
3.6	FLUXOGRAMA.....	34
3.7	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS	34

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1	ELETRODO	35
4.2	CAMADA AFETADA.....	38
4.3	RUGOSIDADE.....	43
4.4	DUREZA POR MICRO-INDENTAÇÃO.....	44
4.5	TEXTURA	47
5	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
	ANEXO A.....	54
	AXEXO B.....	56
	AXEXO C.....	57

1 INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação de superfícies têm por finalidade atender às exigências de qualidade e precisão cada vez maiores em componentes.

São muitos os processos de fabricação de superfícies encontrados na indústria, podendo ser por soldagem, usinagem, injeção, fundição entre outros. Quando surge a necessidade de garantir um melhor acabamento superficial, a usinagem é sem dúvida o processo de finalização mais procurado.

O processo de eletroerosão, representado pela sigla EDM (*Electrial Discharge Machining*), é um processo de usinagem não convencional, pelo qual a peça de trabalho não entra em contato mecânico com a ferramenta, o desbaste do componente é realizado pela descarga de capacitores elétricos. Essas descargas são disparadas em diversos pontos de um eletrodo, deixando o mesmo a uma distância da peça onde será reproduzido a molde negativo do eletrodo, essa distância é conhecida com *gap*, na qual influencia na velocidade de fabricação do componente usinado e também na qualidade superficial do mesmo. Os materiais utilizados para a fabricação do eletrodo geralmente são materiais condutores tais como cobre ou grafite, os mesmos são usinados conforme é desejado a geometria da cavidade.

Segundo Ho e Newman (2003), os processos EDM tem obtido melhor eficiência com o avanço da tecnologia CNC (Comando Numérico Computadorizado), podendo assim ser realizada a troca automática de eletrodos e ferramentas, e também dando maior controle sobre diversos parâmetros, fazendo com que a indústria demonstre cada vez mais interesse por este processo.

Muitos processos tradicionais de usinagem geram bastante tensões e calor na superfície da peça, alterando suas propriedades estruturais e gerando grande quantidade de cavaco, então quando necessita-se produzir peças com grande qualidade superficial e sem alterações estruturais utiliza-se a eletroerosão, neste processo a peça que está sendo usinada fica submersa em um liquido, havendo uma rápida dissipação do calor gerado durante o processo.

Devido a inexistência de contato mecânico entre a peça e o eletrodo, não existe força de corte neste processo, assim não geram as tensões comuns encontradas durante a usinagem convencional. Tudo isso faz da eletroerosão um processo adequado para atender altas exigências de qualidade e produtividade, tendo grande

aplicação na fabricação de moldes de injeção, forjaria, estampos de corte e fabricação de ferramentas de metal-duro.

Visto isso, este trabalho teve como objetivo analisar a qualidade superficial de um aço carbono, observando os parâmetros de corte e a geometria do eletrodo, afim de verificar a influência do raio e da corrente na usinagem do material escolhido para a obtenção de melhores resultados, que serão obtidos através de ensaios experimentais realizados junto ao Grupo de Usinagem (GUS), os testes foram realizados no Centro Integrado de Manufatura, localizado no Bloco D da Universidade de Caxias do Sul (UCS).

1.1 AMBIENTE DE TRABALHO

Este trabalho foi realizado na Universidade de Caxias do Sul (UCS), o GUS disponibiliza os laboratórios de usinagem e equipamentos necessários para o desenvolvimento do mesmo. A UCS é uma instituição comunitária de educação superior com atuação na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul desde 1967. Com unidades em oito cidades, o campus sede está na cidade de Caxias do Sul.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O processo EDM possibilita a usinagem de geometrias complexas em qualquer material que seja condutor e tem se fortalecido cada vez mais pela necessidade de usinar matérias com difícil usinabilidade. Tendo em vista essa necessidade e também a precisão nas dimensões superficiais, junto com o aumento da produtividade, é necessário estabelecer parâmetros que influenciam no processo, tais como corrente elétrica, gap, o material utilizado, a geometria do eletrodo, afim de analisar a qualidade superficial após o processo de eletroerosão.

Este trabalho teve por finalidade avaliar a qualidade superficial de componentes usinados pelo processo de eletroerosão com variação do raio do eletrodo, alteração da corrente e a melhora no sistema de lavagem, visando estabelecer uma relação entre o raio, a corrente e o fluxo do fluido dielétrico a fim de reduzir a camada afetada, foram utilizados eletrodos com raios de 0,5 mm e 1,5 mm e analisadas as regiões de entrada, região central e saída do fluido dielétrico.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar e analisar a qualidade superficial de um material aço AISI P20 usinado pelo processo de eletroerosão (EDM).

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos abaixo foram definidos para sustentar o objetivo geral:

- a) compreender o processo EDM, qualidade superficial, rugosidade e sub-superfície;
- b) analisar a influência do raio na qualidade superficial;
- c) analisar os efeitos do acabamento ou desgaste sobre a qualidade superficial;
- d) analisar o efeito da corrente sobre a qualidade superficial;

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Este capítulo apresenta conceitos básicos sobre o método de usinagem por eletroerosão, este processo é considerado não tradicional e vem crescendo cada vez mais dentro da área industrial, estes estudos serviram de fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do trabalho.

2.1 ELETROEROSÃO

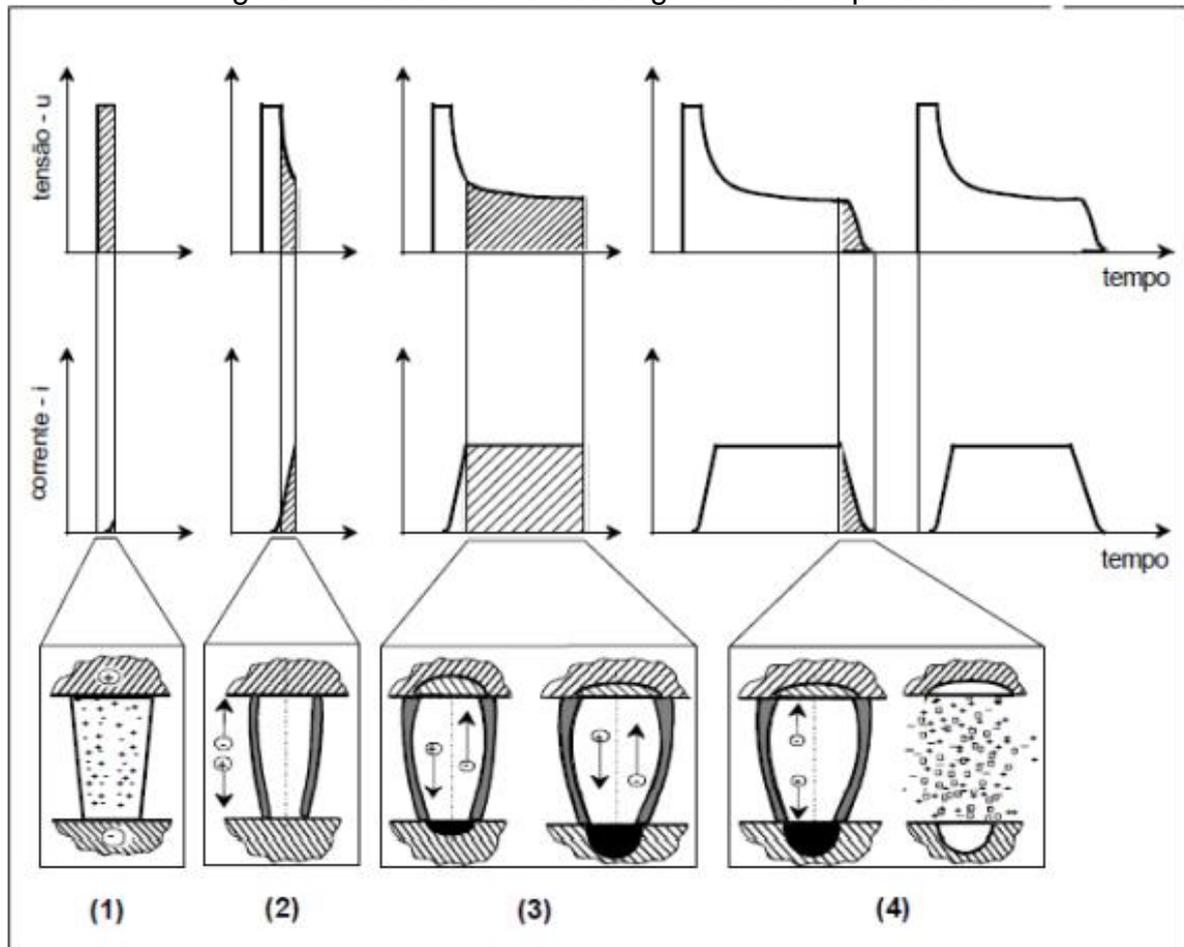
A eletroerosão baseia-se no fenômeno de descargas elétricas não estacionárias, também chamada de faíscas, utilizadas para fundir e remover parcelas do material de uma determinada superfície. É conhecida também por EDM (*Electrical Discharge Machining*), este processo se fortaleceu na década de 40 em Moscou por dois cientistas, Boris R.Lazarenko e Natalie I. Lazarenko. A partir da década de 80 obteve-se grande avanço, devido a utilização da tecnologia CNC (HO e NEWMAN, 2003).

A eletroerosão por penetração é um processo de usinagem utilizado na fabricação de cavidades para moldes e matrizes, na usinagem de sistemas mecânicos e microeletrônicos (LEE, HSU e TAI, 2004; CHE HARON E JAWAID, 2005; AMORIM, 2002). Nos possibilita realizar usinagens complexas em matérias de extrema dureza, mesmo sendo um processo relativamente caro comparado aos processos de usinagem convencionais, e possível aumentar a taxa de remoção de material através da utilização de eletrodos de grafite ou de cobre, assim aumentando a corrente utilizada. Este aumento da corrente também pode causar algum dano no material, como fissuras e modificação nas propriedades mecânicas do material, este problema pode ser minimizado alterando parâmetros de entrada, tais como a corrente e o tempo de onda ligado, diminuindo assim os danos causados na peça e possibilitando a viabilidade econômica

Já foram desenvolvidas algumas teorias para explicar o fenômeno que ocorre no processo de eletroerosão, porém a teoria mais aceita até hoje é a termoelétrica, que mostra quatro fases durante a ocorrência de uma descarga elétrica, as mesmas são identificadas na Figura (1): ignição(fase 1), formação do canal do plasma (fase 2),

fusão e evaporação do material (fase 3), e ejeção do material fundido (fase 4) (DIBITONTO.,1989).

Figura 1: Fases de uma descarga elétrica no processo.



Fonte: Koning e Klocke (1997)

No primeiro estágio, na fase de ignição, ocasiona uma emissão primária de elétrons da ferramenta, onde um campo elétrico é gerado através da diferença de potencial, ocorrendo uma aceleração das cargas em direção a peça, que se chocam com as moléculas do fluido dielétrico durante o movimento liberando mais elétrons, assim uma reação é provocada multiplicando o transporte de energia elétrica.

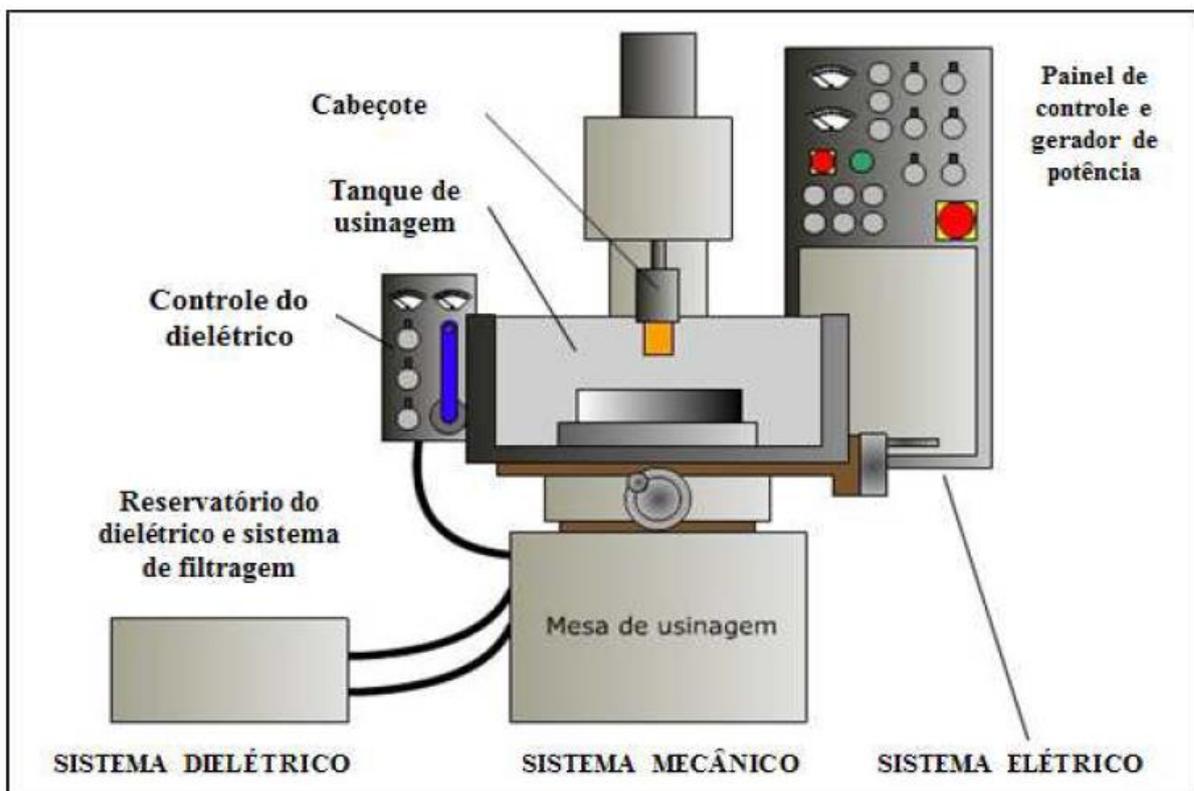
No segundo estágio, é onde se desenvolve o canal de descarga, há diferentes compreensões do que se ocorre nesse período, autores como Koning e Klocke (1997), afirmam ocorrer efeitos conhecidos como “*skin*” e “*pinch*”. Segundo Amorim (2002) ocorre um colapso de tensão em aberto, decaindo a tensão rapidamente para a tensão de ruptura do dielétrico, ocorrendo assim o tempo de retardo.

No terceiro estágio ocorre a fusão e a evaporação do material, aumentando a formação de bolhas e do canal de plasma (KONIG, KLOCKE, 1997).

No quarto estágio é onde ocorre a ejeção do material fundido ao fim da descarga. Segundo Amorim (2002), a tensão e a corrente elétrica são interrompidas pelo sistema de controle de energia, criando um intervalo de tempo (T_{OFF}), antes de iniciar um novo ciclo de erosão.

Quando os eletrodos se aproximam e ficam a uma distância aproximada a uma faixa de 0.5 à 1,0 mm, é liberada a tensão entre os eletrodos, conhecida como tensão em aberto não havendo passagem de corrente entre os eletrodos devido a resistência do fluido dielétrico (AMORIM, 2002).

Figura 2: Princípio operacional do equipamento de eletroerosão



Fonte: Schimitz (2007)

A figura (2) mostra os principais sistemas para o processo de usinagem por eletroerosão. A tensão, a corrente elétrica e o eixo (Z) do cabeçote são controlados pelo gerador de pulsos, a movimentação nos sentidos X-Y e realizada pela meada de

usinagem. Durante o processo, o tanque de usinagem é cheio por um fluido dielétrico, o mesmo possui um sistema de controle de vazão.

O sistema dielétrico possui uma cuba responsável pelo armazenamento do fluido dielétrico e também possui um sistema de filtragem responsável pela durabilidade e para garantir a qualidade do fluido.

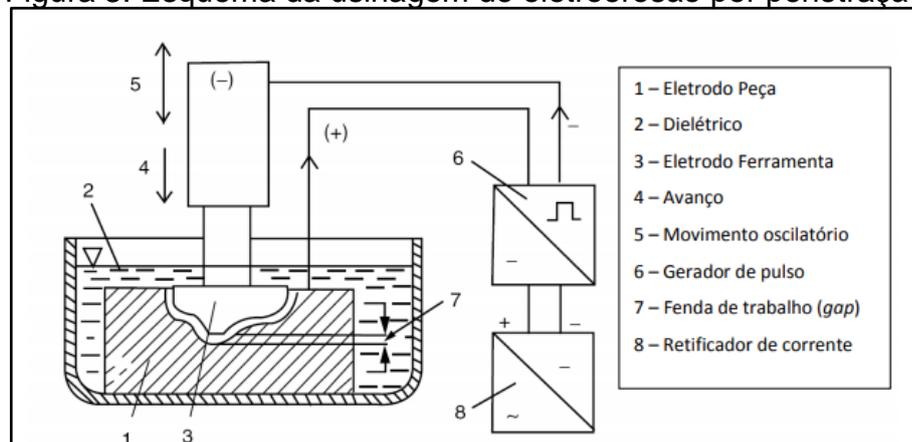
Uma moto bomba complementa o sistema dielétrico, esta é responsável pelo estreitamento do canal de descarga, aumentando a densidade de energia, também é capaz de resfriar o local usinado além de remover as partículas erodidas na fenda de trabalho.

Devido as altas temperaturas envolvidas no processo de eletroerosão, a remoção de material ocorre por vaporização. Na superfície da peça erodida, o material resolidifica e esfria rapidamente, gerando fadiga térmica (IVANISKI, 2015).

2.1.1 Tipos de eletroerosão

A eletroerosão por penetração é o processo EDM mais utilizado na atualidade. É utilizado para obtenção de peças com geometrias distintas, através de eletrodo preparado para atender a cada gravura desejada. Este processo também tem grande utilização para a fabricação de cavidades com fundos (conhecidas como cavidades cegas). A desvantagem encontrada na utilização deste processo é a necessidade de fabricação de um eletrodo para cada geometria que irá ser usinada, e também na limpeza da área de trabalho. Na maioria dos casos a limpeza é realizada usando um tipo de óleo hidrocarboneto como dielétrico (LEÃO e PASHBY, 2004)

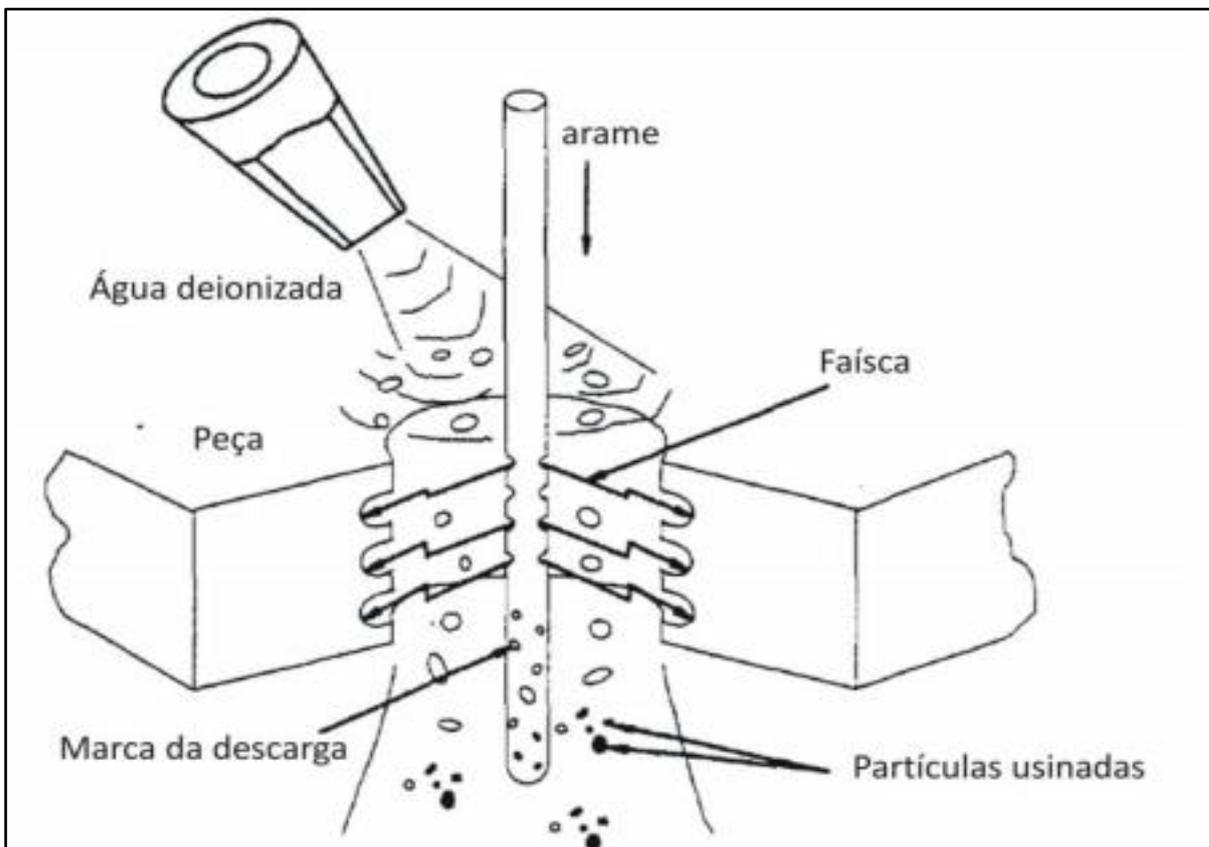
Figura 3: Esquema da usinagem de eletroerosão por penetração



Fonte: Adaptado de YOUSSEF e EL-HOFY, 2008

A eletroerosão a fio é muito comum, para ser realizada utiliza-se um arame metálico como eletrodo para realizar recortes de cavidades. A partir da utilização de comandos CNC com mais de cinco eixos torna-se um processo muito versátil, tendo grande aplicação em matrizaria para a fabricação de moldes. Possui vantagens em termos de velocidade de usinagem, custo e velocidade de reposição de eletrodo em relação ao processo de eletroerosão de penetração. Normalmente usa água deionizada como dielétrico (LEÃO e PASHBY, 2004).

Figura 4: Esquema da usinagem por eletroerosão a fio



Fonte: TARNG, MA e CHUNG, 1995

No processo de retifica eletroerosiva o material é removido através de descargas elétricas entre os eletrodos. As mesas das máquinas utilizadas neste processo possuem o seu avanço controlado. Possui baixa remoção de material, devido a isso, é raramente encontrado na indústria, sendo utilizado em casos específicos, tais como retifica de perfis de precisão quando a relação de comprimento-diâmetro não permite a retifica convencional e na confecção de peças de metal duro (KONING; KLOCKE, 1997).

2.2 PARAMETROS INFLUENTES NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO

Durante a execução do processo de eletroerosão, existem diversos parâmetros de entrada que influenciam diretamente no resultado do trabalho à ser realizado. (RAMASAWMY e BLUNT, 2004; FENGOO e DAYONG, 2003):

- Material da peça.
- Material do eletrodo.
- Área usinada.
- Profundidade da usinagem (para eletroerosão de penetração).
- Composição e condição do fluido dielétrico.
- Corrente nominal utilizada.
- Tempo de onda ligado (T_{ON}).
- Tempo de onda desligado (T_{OFF}).
- Frequência.
- Tipo do dielétrico.
- Condição de limpeza (pressão e vazão de fluido, número e geometria da aplicação e da cavidade).
- Sistema de usinagem (com ou sem retração do eletrodo), ou no caso de eletroerosão a fio ou retificação eletroerosiva, a velocidade do fio ou rebolo.
- *Duty time* (DT).
- *Gap*

2.2.1 Parâmetros de controle

Ao realizar a regulagem dos parâmetros de uma máquina EDM, devem ser observados as faixas de cada modelo disponibiliza, pois podem variar de um modelo para outro. A qualidade de acabamento superficial é influenciada pela energia da descarga elétrica (We).

Aumentando a corrente de descarga e também o tempo de duração do impulso constante, pode-se observar o crescimento da remoção do material.

Os parâmetros de entrada da máquina que são controlados para garantir a qualidade no processo de eletroerosão serão listados à seguir.

a) Polaridade

Existe a possibilidade de realizar os processos de eletroerosão com corrente alternada, mas está não indicada devido aos desgastes. O processo de eletroerosão por penetração, geralmente utiliza-se geralmente a polaridade do eletrodo positiva, prevenindo o desgaste do eletrodo e diminuindo a velocidade de usinagem (GUITRAU, 1997). Isso é causado devido a diferença dos elétrons e dos íons positivos em direção ao anodo e catodo (DIBITONTO et al. 1989). A melhor opção em relação a taxa de remoção e desgaste é obtida através da utilização de eletrodo com polaridade positiva e a peça com polaridade negativa. São usadas polaridades negativas no eletrodo, em casos de remoção rápida de material, geralmente com eletrodos de grafite e também na eletroerosão a fio (GUITRAU, 1997).

b) Corrente (i)

A corrente é considerada o fator mais influente na rugosidade da superfície gerada (RAMASAWMY e BLUNT, 2004). Para níveis mais altos de corrente utilizada, maior é a taxa de remoção e piora da qualidade superficial. A intensidade de corrente é limitada pela área de usinagem e pelo material do eletrodo (GUITRAU, 1997).

c) Tempo de onda ligado (T_{ON})

O tempo de onda ligado, no qual denomina-se T_{ON} é o tempo que a faísca possui energia elétrica. Este valor fica nas faixas de microssegundos e milissegundos, o mesmo é inserido na máquina, seu aumento causa elevação na taxa de remoção, havendo assim uma piora na qualidade superficial e também aumentando o desgaste do eletrodo (BENEDICT, 1997).

d) Tempo de onda desligado (T_{OFF})

O tempo de onda desligado, no qual denomina-se T_{OFF} , é o tempo necessário para a estabilização do ambiente no gap, incluído o tempo de explosão da bolha de

gases, após o tempo de corrente ligada. Influencia diretamente na velocidade do processo, mas é fundamental para a estabilidade do mesmo (GUITRAU, 1997). O T_{OFF} , não influi no desgaste do eletrodo, uma vez que este ocorre devido à energia disponibilizada apenas durante T_{ON} (GUITRAU, 1997).

e) *Duty time* (DT)

Também conhecido como Duty factor (MARAFONA, 2007; MOHRI et al., 1995) ou Duty cycle (GUITRAU, 1997) ou ainda relação de contato (AMORIM, 2002) é a relação entre o T_{ON} e o tempo do ciclo de uma faísca. Esse valor geralmente é inserido na máquina, mantendo a relação T_{ON} e T_{OFF} , conforme equação 3.1 (ENGEMAC, 2002).

$$DT = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \times 100(\%) \quad (1)$$

f) Tempo de retração (R) e tempo de sequência de descargas (U)

Na usinagem por eletroerosão é difícil o desenvolvimento de maneira contínua sem que haja um retrocesso do eletrodo, facilitando assim a limpeza na região usinada. Amorim e Silva (2010) e Amorim e Weingaertner (2007) descrevem o tempo de retração (R) e tempo de sequência de descargas (U) como sendo os parâmetros a serem definidos durante a o processo de usinagem. O tempo de sequência de descargas (U), é o tempo em que as descargas são disparadas sem haver retrocesso do eletrodo, seguido pelo tempo de retração, que é o tempo que o eletrodo retrocede, não havendo disparos de faíscas.

g) *Gap*

O tamanho do gap pode determinar a rugosidade da superfície da peça e a taxa de remoção de material, quanto maior, menor será o tempo de usinagem, porém, maior será a rugosidade. Já um gap menor, implicará em um tempo maior de usinagem e uma menor rugosidade na superfície (CRUZ JUNIOR, 2015).

2.3 QUALIDADE SUPERFICIAL NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO

2.3.1 Integridade superficial

A qualidade da superfície, é um dos pontos mais importantes para ser considerado ao definir o melhor processo de usinagem à ser realizado. Durante a usinagem diversas transformações ocorrem na microestrutura, recristalizações, alterações de tensões, durezas, deformações plásticas, variação de composição química.

2.3.2 Textura

A quantidade de fissuras espalhadas na camada branca influencia na resistência da superfície, devido à energia das descargas elétricas (HO e NEWMAN, 2003).

É possível estabelecer, em relação à textura superficial das peças, que após a usinagem com o aumento da energia da descarga We , ou seja, maiores picos de corrente "ie", a rugosidade aumenta proporcionalmente. O mesmo ocorre para a espessura da camada superficial e das zonas termicamente afetadas, ou seja, quanto mais energético é o processo maiores serão as espessuras destas zonas.

Nos processos de fabricação existentes, uma das principais características é a análise superficial, influenciando diretamente na atuação técnica superfície. Na eletroerosão algumas alterações na superfície, decorrem das altas temperaturas geradas na região usinada.

Durante a usinagem, alterações subsuperficiais e microestruturais contribuem no desempenho do componente (HIOKI, 2006).

2.3.3 Rugosidade

A medição da rugosidade da superfície é o parâmetro mais utilizado para definição da superfície obtida. A maior parte das publicações se refere aos tradicionais parâmetros bidimensionais de rugosidade. Destes, são mais utilizados o Ra e o Rt embora outros parâmetros, como Ry , Rq , Rz , estejam ganhando espaço (FUKUZAWA

et al., 2004; HAN e KUNIEDA, 2004; LONARDO e BRUZZONE, 1999; TARNG, MA e CHUNG, 1995).

O parâmetro de rugosidade R_a é definido pelo valor da altura do retângulo formado pela média aritmética das áreas do perfil e pela linha disposta de modo que as áreas do perfil sejam as mesmas acima e abaixo desta linha. Entretanto, medindo-se somente o R_a , não podem ser detectadas ocasionais elevações ou reentrâncias, importantes em uma superfície moldante (MESQUITA, 1992 e TABENKIN, 1999).

A rugosidade R_y é o valor correspondente da distância máxima entre picos e vales do perfil obtido no percurso de medição, o qual é dividido em um número de seções, correspondente ao comprimento de amostra definido no aparelho de medição de rugosidade (MESQUITA, 1992 e TABENKIN, 1999).

A rugosidade R_z corresponde ao valor médio das distâncias máximas dos picos e vales obtidos no perfil dividindo o percurso de medição em um número n de seções de comprimentos correspondentes (MESQUITA, 1992 e TABENKIN, 1999).

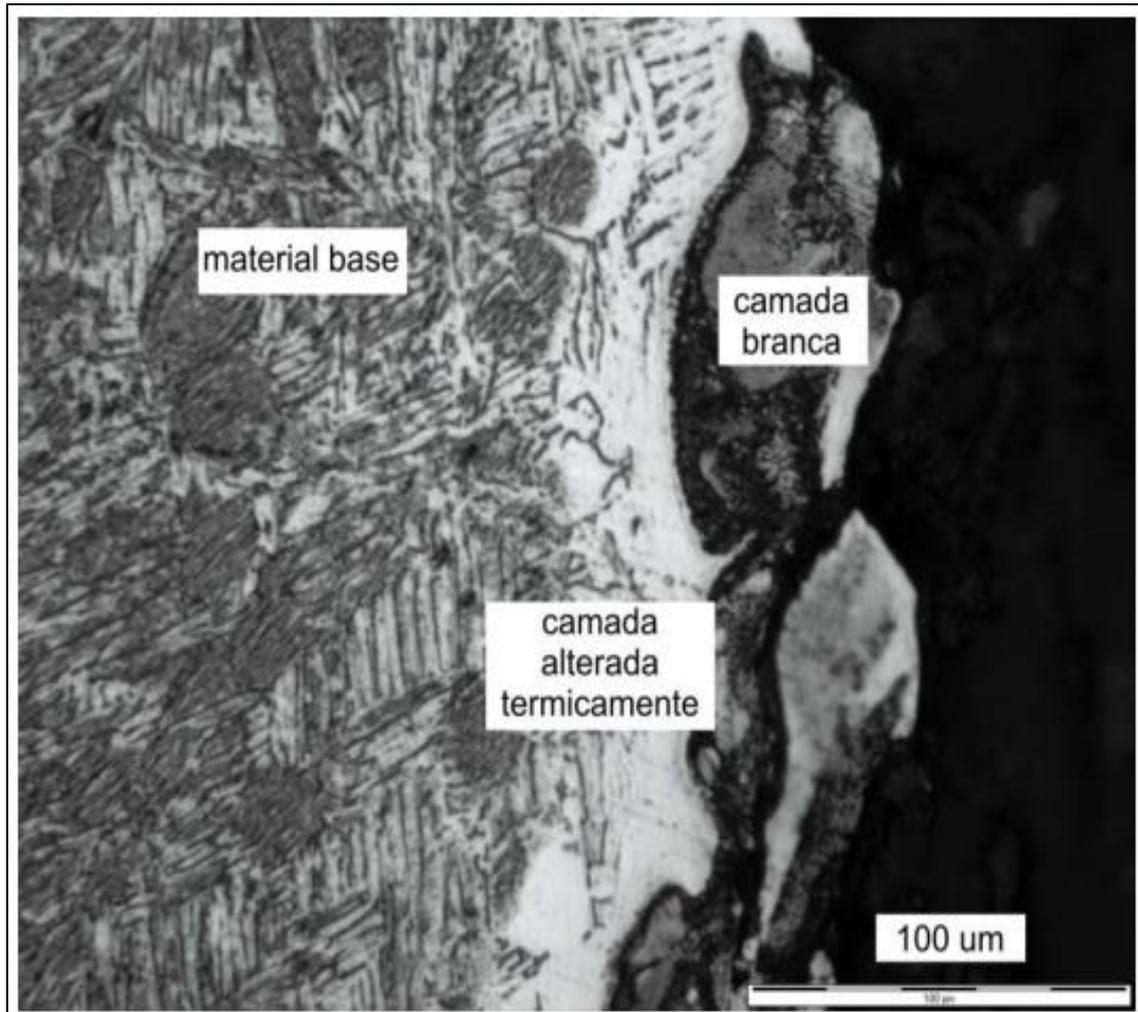
A rugosidade R_y representa o valor máximo obtido no perfil no comprimento de amostra, porém pode tratar-se de um valor isolado e mascarar demais as medidas, enquanto R_z contribui para que o valor medido represente melhor o perfil como um todo no percurso de medição (MESQUITA, 1992 e TABENKIN, 1999).

2.3.4 Camadas e sub-superfícies

À pouco mais de quarenta anos obteve-se os primeiros estudos sobre o comportamento da superfície após um componente ser usinado pelo processo de eletroerosão.

As superfícies obtidas por eletroerosão possuem três camadas: A camada refundida, chamada camada branca (*white layer*) (EKMEKCI, 2007), a mesma também é conhecida como camada escura (*Black layer*) (MARAFONA, 2007) mais externa; a camada termicamente afetada e o material não afetado. (HO e NEWMAN, 2003). A figura 5 mostra as três camadas existentes em uma superfície usinada por eletroerosão

Figura 5: Camadas existentes na superfície gerada pela eletroerosão



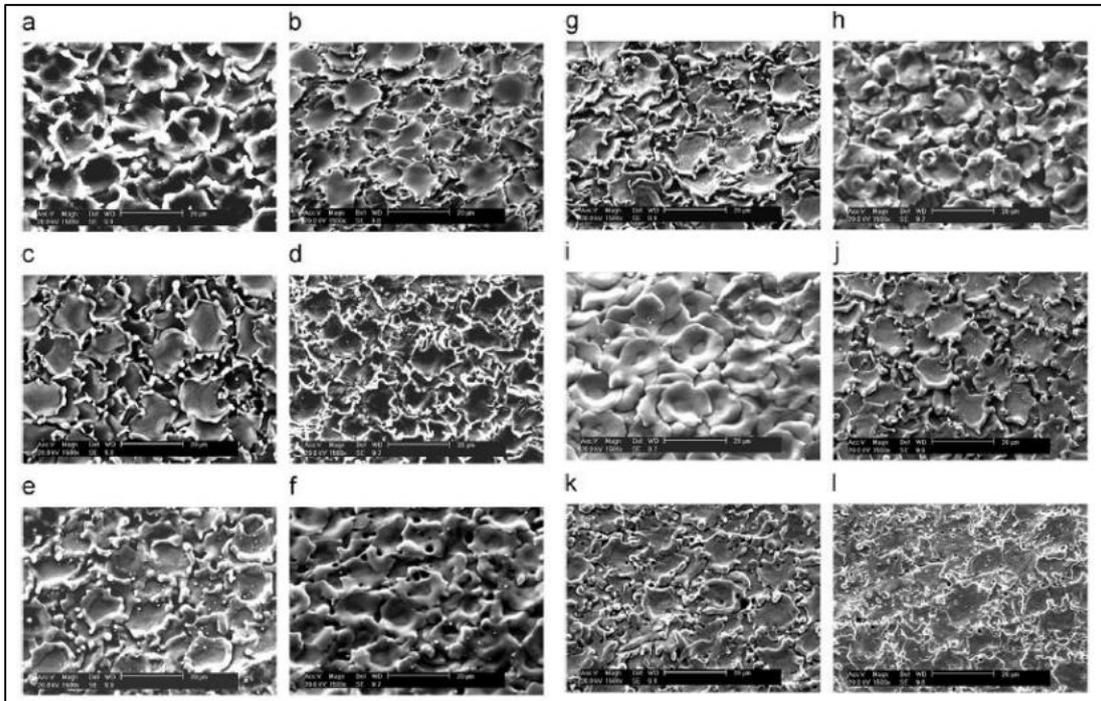
Fonte: MARAFONA, (2007).

Observa-se na imagem, alterações micro estruturais na peça usinada, devido à instabilidade térmica.

A qualidade da superfície obtida, é constantemente influenciada pela quantidade de fissuras que se propagam na camada branca, devido à energia das descargas elétricas (HO e NEWMAN, 2003). A formação de carbonetos nos materiais metálicos na camada branca, causa um aumento na dureza na superfície por reações a altas temperaturas com o carbono presente no dielétrico (HO e NEWMAN, 2003).

A figura 6 apresenta exemplos de superfícies obtidas em microscópio eletrônico de varredura para vários materiais de peça em eletroerosão.

Figura 6: Superfícies erodidas: a) alumínio; b) prata; c) latão; d) cobre; e) níquel; f) aço; g) platina h) titânio; i) aço inoxidável; j) tântalo; k) molibdênio; l) tungstênio



Fonte: MAHARDIKA, (2008).

Na figura 6 observa-se efeitos de crateras em nas superfícies obtidas por eletroerosão, que são típicas do processo térmico, com possibilidades de microfissuras na superfície, às altas temperaturas e altas taxas de aquecimento e resfriamento possibilitam grande variação estrutural.

3 MATERIAS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados as etapas e os respectivos métodos, para atingir os objetivos propostos neste trabalho.

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para realizar as análises descritas neste trabalho foi usinada uma cavidade com cada condição de trabalho. Foi alterada a corrente (i) da máquina, sendo utilizada uma corrente alta para a realização de desbaste e outra baixa para a realização do acabamento, foram comparadas três regiões de cada cavidade erodida. Também foi checada a diferença entre acabamento e desbaste.

A proposta apresentada, baseia-se em testes anteriores realizados e publicados dos artigos “*Surface integrity of electrodischarge machined cavities for different depths and radii*” (ZEILMANN, BORDIN E VACCARO, 2014), no qual são comparados os raios dos eletrodos sendo um com 3 mm e outro com 9 mm e “*Surface integrity after different machining process*” (ZEILMANN, BORDIN, VACCARO, ZANOTTO E SOARES, 2010), neste artigo um dos parâmetros à ser avaliado foi corrente (i) da máquina, sendo elas de 1,5 A, 6 A e 18 A. No presente trabalho os valores escolhidos de corrente foram de 1,5 A para acabamento e 18 A para desbaste.

A tabela 1 mostra as condições nos quais os testes foram realizados, com base nos artigos citados anteriormente, definiu-se a corrente que foi utilizada e o raio dos eletrodos.

Tabela 1: Condições experimentais

TESTES EXPERIMENTAIS - DUAS CAVIDADES EM CADA CONDIÇÃO		
CONDIÇÕES	RAIO (mm)	CORRENTE(A)
C1	1,5	18 – Desbaste
C2	0,5	18 – Desbaste
C3	0,5	1,5 – Acabamento
C4	1,5	1,5 - Acabamento

Fonte: o autor (2020)

3.2 MATERIAL DO ELETRODO

Além dos parâmetros de controle, os materiais empregados na fabricação dos eletrodos exercem grande influência sobre o comportamento da eletroerosão. A erosão de um material é independente de suas propriedades mecânicas, as propriedades físicas, têm influência sobre o processo.

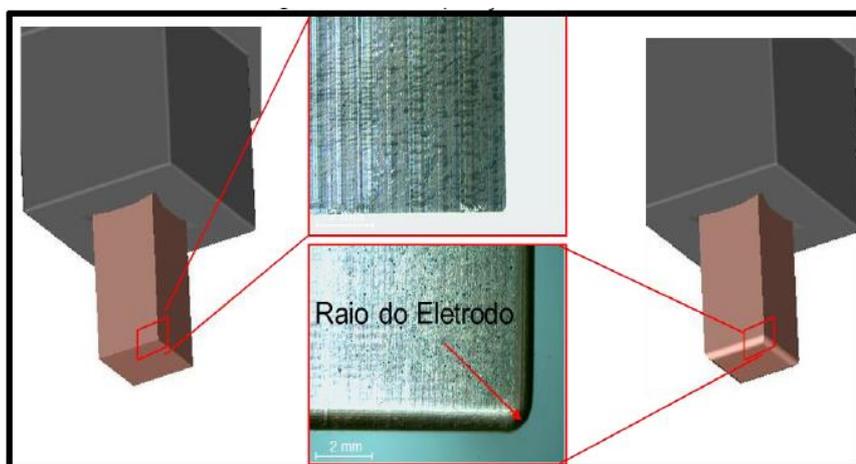
É possível utilizar como eletrodo de eletroerosão todos os materiais condutores de corrente elétrica. Para obter uma melhora no processo é desejável obter duas características principais: alta condutividade elétrica e alto ponto de fusão. Dois materiais se destacam por atenderem essas características: o cobre eletrolítico e o grafite (GUITRAU, 1997).

Podem ser usados como eletrodos de eletroerosão todos os materiais condutores de corrente elétrica. Duas características em conjunto são desejáveis aos materiais de eletrodo: alta condutividade elétrica e alto ponto de fusão. Segundo Amorim (2002), no Brasil e na Europa os eletrodos de cobre eletrolítico são mais utilizados, devido ao seu menor custo, já nos Estados Unidos o grafite possui maior aplicação. O tipo de material utilizado tem influência especialmente sobre a taxa de remoção de material e sobre o desgaste do próprio eletrodo (CHE HARON et al., 2008).

Os eletrodos utilizados são de cobre eletrolítico com raio de 0,5 mm e 1,5 mm, suas dimensões ficaram com 10 mm x 10 mm x 25 mm.

A Figura 7 indica a onde serão aplicados os raios na ferramenta.

Figura 7: Raio dos eletrodos



Fonte: Adaptado de ZEILMANN, BORDIN e VACCARO, 2014

3.3 MATERIAL DO CORPO DE PROVA

Para a realização deste trabalho foi utilizado um bloco de aço para matrizes AISI P20, no qual foi medida sua dureza e especificado suas dimensões, esse material possui baixa liga, com boa usinabilidade, apropriado para a fabricação de moldes de injeção de plásticos, suas propriedades estão mostradas na tabela 2. Quando se desejar maior resistência ao desgaste, pode-se submetê-lo à tratamentos termoquímicos tipo cementação ou nitretação.

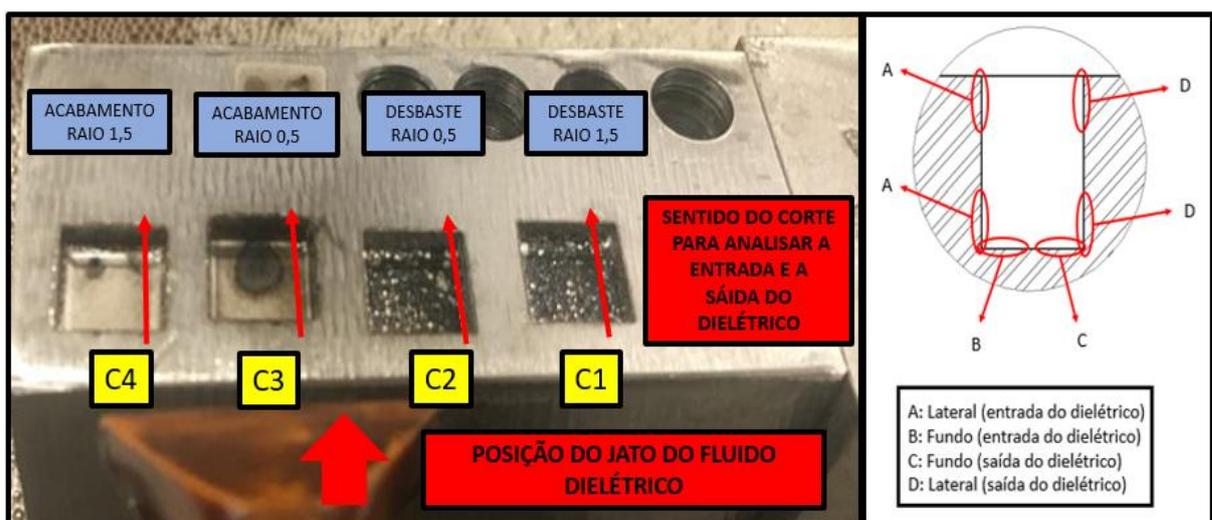
Tabela 2: Quantidade de elementos de liga no aço P20 (%)

Carbono	Silício	Manganês	Cromo	Molibdênio	Níquel
0,35 – 0,45	0,20 – 0,40	1,30 – 1,60	1,80 – 2,10	0,15 – 0,25	0,90 – 1,20

Fonte: Adaptado de ZEILMANN, BORDIN e VACCARO, 2014

Foram analisadas diferentes regiões das cavidades erodidas, visando identificar variações na qualidade da superfície durante o processo, a fim de determinar a influência dos parâmetros alterados e a geometria do eletrodo quando em relação a dureza e rugosidade. A Figura 8 apresenta os pontos analisados nas amostras.

Figura 8: Pontos de análise no corpo de prova



Fonte: o autor (2020)

3.4 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

A máquina de eletroerosão onde foram realizados os testes é uma Engemaq, modelo 440 NC, representada na figura 9, que está localizada no laboratório de usinagem, bloco D, sala 114, da Universidade de Caxias do Sul (UCS), sua programação é realizada através de um microprocessador, controlada por um teclado com teclas individuais, os parâmetros de controle são mostrados através de um display de cristal líquido.

Figura 9: Engemaq 440 NC.



Fonte: o autor (2020)

Para medir a dureza, foi utilizado um durômetro Vickers microindenter Shimadzu Mitutoyo figura 10.

Figura 10: Durômetro Vickers microindenter Shimadzu Mitutoyo



Fonte: o autor (2020)

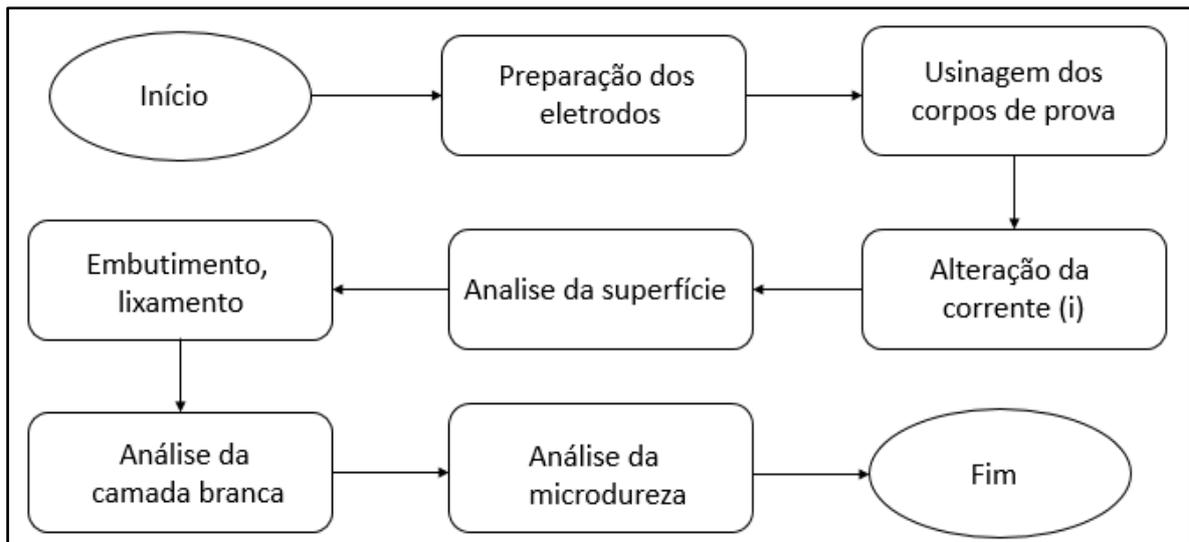
3.5 VARIÁVEIS À SEREM MEDIDAS

Foram utilizados dois eletrodos com raios de 0,5 mm e 1,5 mm, sendo erodidas duas cavidades com cada eletrodo, uma delas foi aplicado a condição de desbaste, com corrente (i) da máquina de 18A e outra cavidade foi aplicado a condição de acabamento, com uma corrente (i) de 1,5A, conforme mostrado na figura 8. Após a usinagem ser concluída foram realizadas as comparações das possíveis mudanças nas camadas erodidas, parâmetros de rugosidade R_a , R_y e R_z . Além da rugosidade, foi analisada a textura, camada branca e micro-dureza.

3.6 FLUXOGRAMA

Para visualizar cada etapa das atividades desenvolvidas, um fluxograma foi desenvolvido para melhor interpretar a sequência de atividades realizadas conforme mostra a Figura 11.

Figura 11: Fluxograma.



Fonte: o autor (2020)

3.7 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS

a) Preparação dos eletrodos: inicialmente foram preparados dois eletrodos de cobre, com diferentes raios, sendo eles de 0,5 mm e 1,5 mm.

b) Usinagem dos corpos de prova: foi utilizado um bloco de aço AISI P20 para usinagem dos corpos de prova.

c) Alteração da corrente: foram utilizadas duas correntes (i), sendo elas de 1,5 A e 18 A.

d) Análise dos resultados: após a usinagem com os parâmetros e ferramentas definidos, começaram as coletas de dados, medições de qualidade e integridade superficial nas regiões erodidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem a finalidade de demonstrar os efeitos gerados no aço P20 e no eletrodo de Cobre eletrolítico, observando e analisando a integridade superficial, quando submetidos ao processo de eletroerosão em regime de desbaste e acabamento.

Os resultados apresentados foram coletados e compilados para a criação dos gráficos e as imagens para representação de sua integridade. A tabela 3 mostra os parâmetros que foram utilizados para a realização dos testes descritos neste trabalho.

Tabela 3: Parâmetros utilizados para eletroerosão

CONDIÇÃO	TS	T_{ON} [μ s]	DT [%]	GAP
Acabamento	0,5	20	35	6
Desbaste	6	300	75	4

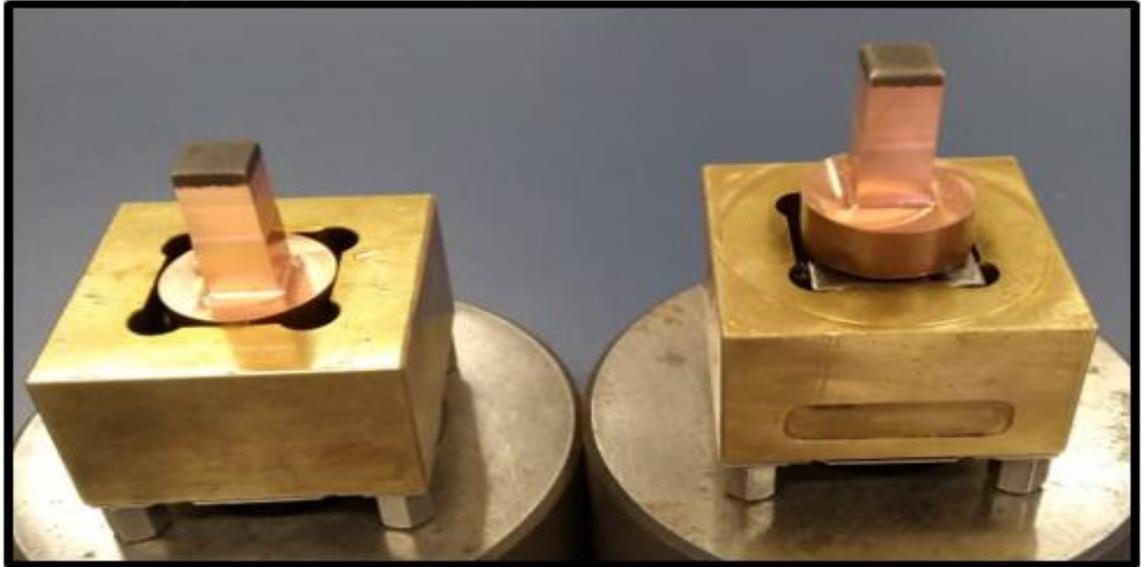
Fonte: Adaptado ZEILMANN , BORDIN e CACCARO, 2014

4.1 ELETRODO

Foram utilizados eletrodos de cobre eletrolítico, com medidas de 10x10x25 mm. Após o processo de eletroerosão foram feitas imagens. Notou-se um pequeno desgaste nos raios medidos devido ao trabalho à altas temperaturas, isso acaba inviabilizando muitas vezes o processo de eletroerosão. Para diminuir o desgaste deve ser analisado os parâmetros que influenciam diretamente no processo de eletroerosão, tais como aplicação do fluido dielétrico, corrente (A) e a geometria do eletrodo. As figuras 12 à 16 mostram a integridade do eletrodo antes e após a eletroerosão, bem como o desgaste dos raios medidos.

É comum verificar o desgaste do eletrodo e a taxa de remoção de material em função das variáveis de entrada em processos de eletroerosão (HO E NEWMAN, 2003). Segundo Che-Haron e Jawaid, (2005), a elevada taxa de desgaste do eletrodo é um dos problemas principais em eletroerosão.

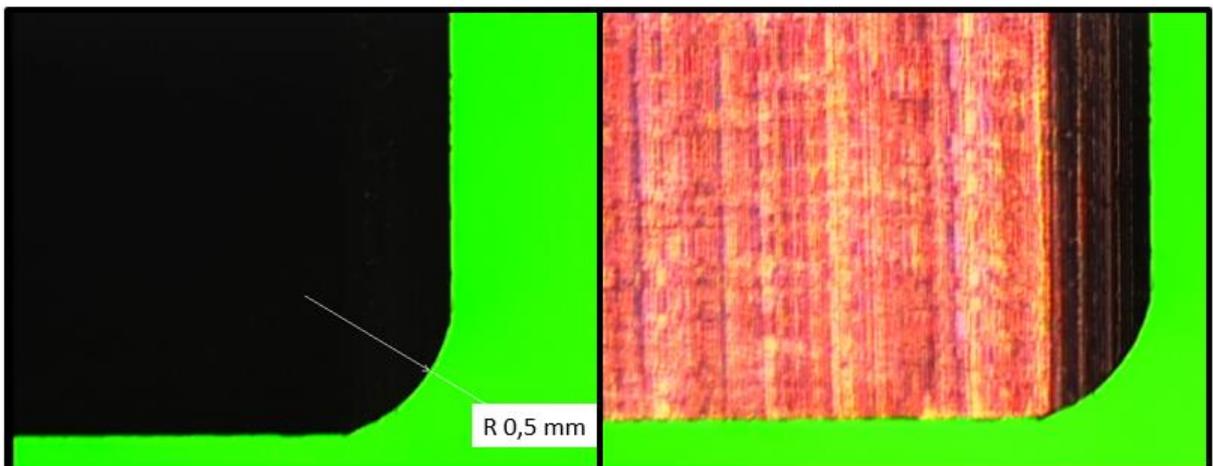
Figura 12: Eletrodos após processo de eletroerosão



Fonte: o autor (2020)

Na figura 13 está sendo mostrado a condição inicial do eletrodo com raio de 0,5 mm, para chegar na medida exata o eletrodo passa por processo de usinagem de grande complexidade.

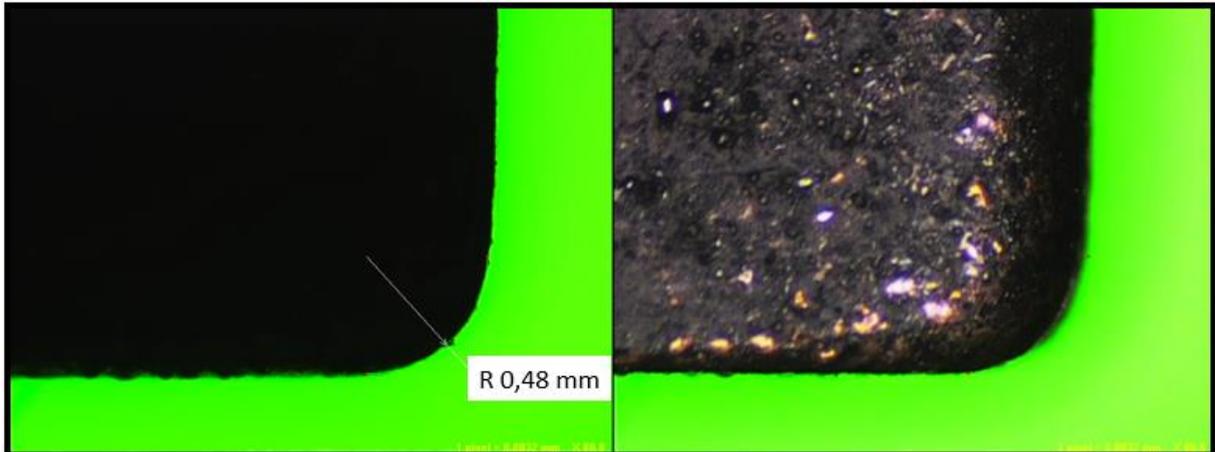
Figura 13: Eletrodo com raio de 0,5 mm antes da eletroerosão



Fonte: o autor (2020)

Na figura 14 mostra o eletrodo após a erosão de uma cavidade com 3 mm de profundidade, o mesmo apresentou um desgaste por recuo de 0,02 mm, a superfície do eletrodo apresenta pontos de material que não foi arrastado pelo dielétrico, esse material acaba se resolidificando e prejudicando a integridade do eletrodo.

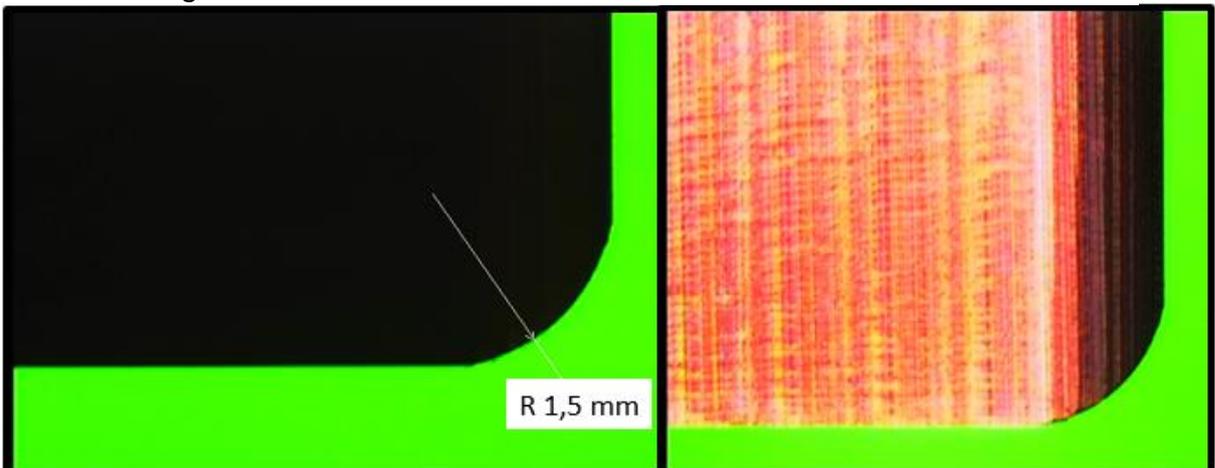
Figura 14: Eletrodo com raio de 0,5 mm depois da eletroerosão



Fonte: o autor (2020)

A figura 15 mostra o eletrodo com raio de 1,5 mm após sua preparação pelo processo de usinagem.

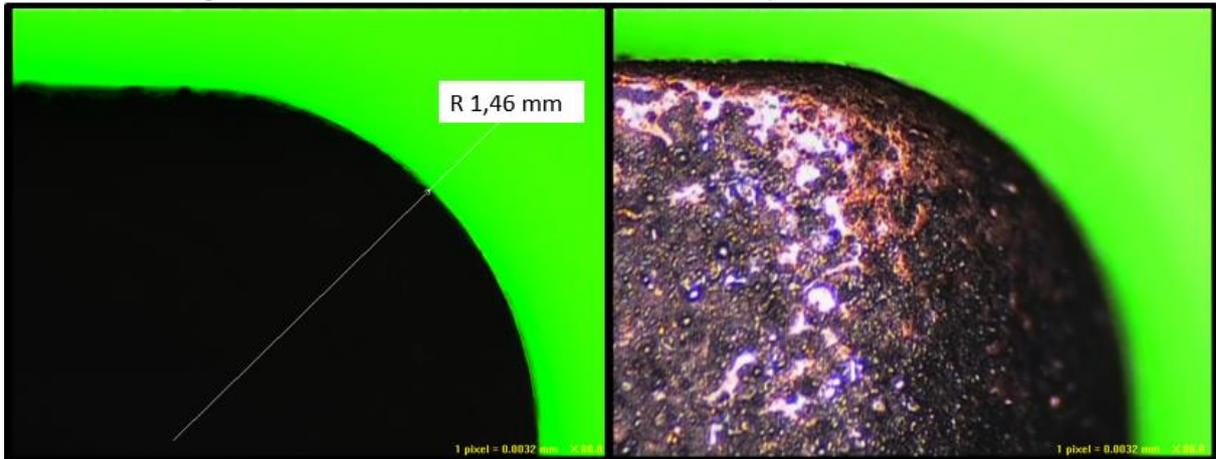
Figura 15: Eletrodo com raio de 1,5 mm antes da eletroerosão



Fonte: o autor (2020)

Na figura 16 está mostrando o eletrodo após a eletroerosão de uma cavidade, apresentando um desgaste de 0,04 mm, pode-se visualizar a presença de material resolidificado na superfície do eletrodo, prejudicando a qualidade da superfície erodida.

Figura 16: Eletrodo com raio de 1,5 mm após eletroerosão



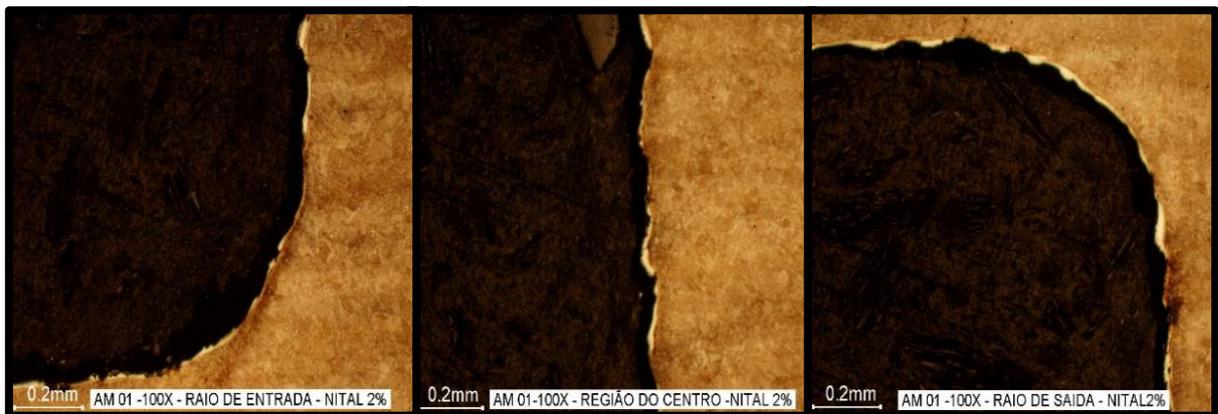
Fonte: o autor (2020)

4.2 CAMADA AFETADA

As altas temperaturas envolvidas no processo de eletroerosão durante a remoção de material faz com que o material resolidifique e esfrie rapidamente, gerando fadiga. Através de imagens metalográficas, pode-se comprovar que a camada branca possui um comportamento irregular causado pelo processo

Na figura 17 e 18 pode-se identificar a presença da camada branca em maior quantidade na região do raio de saída do eletrodo, causada pela alta taxa de remoção de material e pela dificuldade de remoção do material erodido.

Figura 17: Camada afetada condição 1 (raio de 1,5 mm; desbaste)



Fonte: o autor (2020)

A análise da camada afetada é de grande importância, pois permite entender o processo de remoção, buscando melhorias no processo.

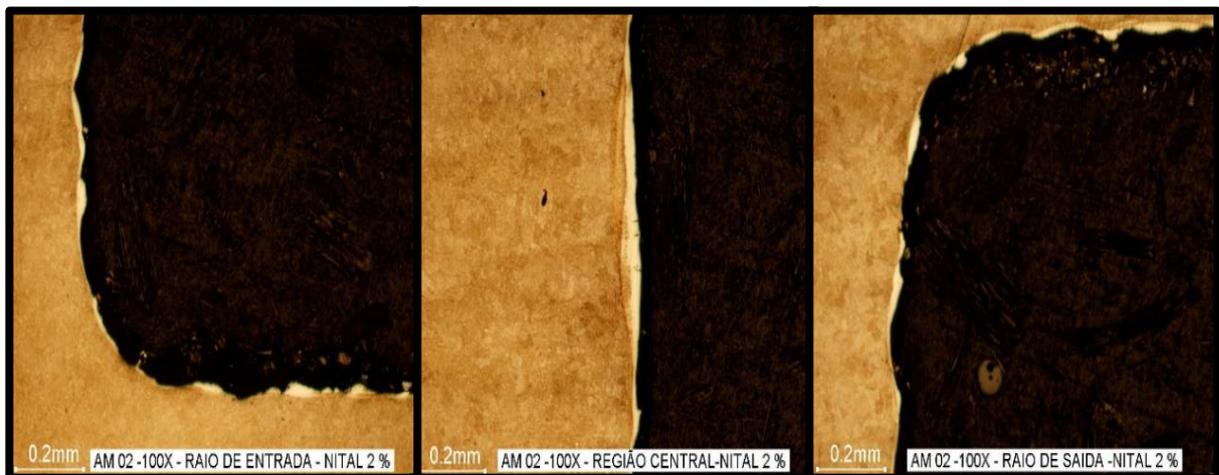
Figura 18: Área selecionada para medida camada branca condição 1



Fonte: o autor (2020)

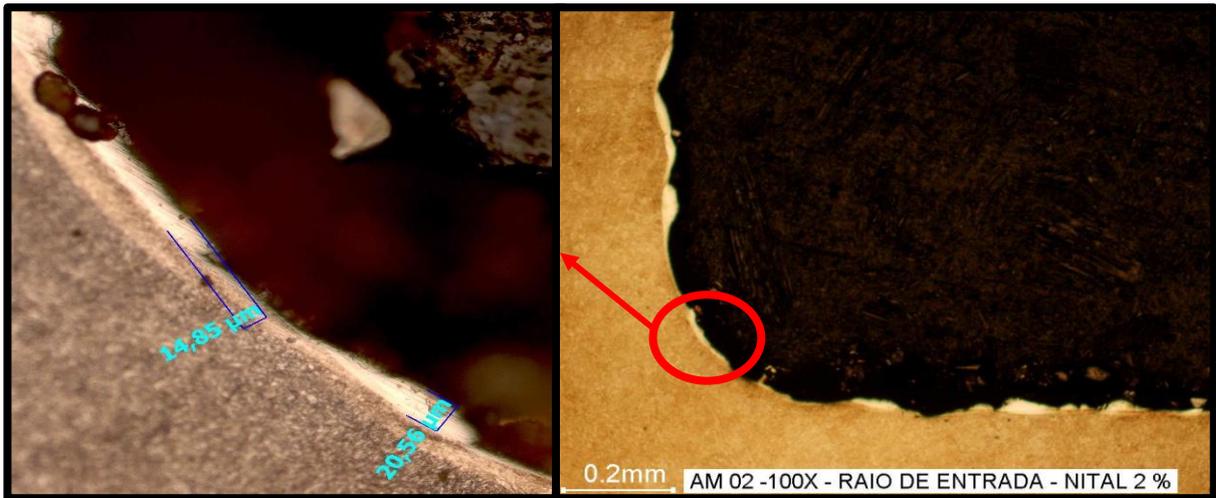
Nas figuras 19 e 20, foi realizada somente a condição de desbaste e com raio de 0,5 mm, nota-se a presença da camada branca em maior quantidade na região do raio de saída do eletrodo. Pode-se observar que na condição anterior, figuras 17 e 18, onde o raio é de 1,5 mm, a camada branca aparente é ainda maior.

Figura 19: Camada afetada condição 2 (raio de 0,5 mm; desbaste)



Fonte: o autor (2020)

Figura 20: Área selecionada para medida camada branca condição 2

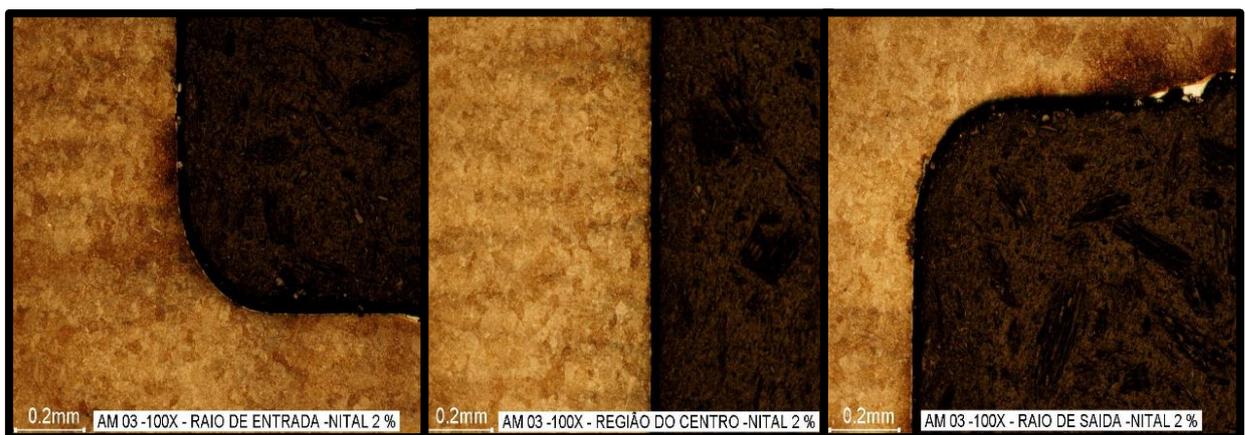


Fonte: o autor (2020)

Nas cavidades onde foram realizados os acabamentos, no qual a corrente é menor, diminuindo a taxa de remoção de material, observa-se poucos pontos com camada branca comparado com a condição de desbaste.

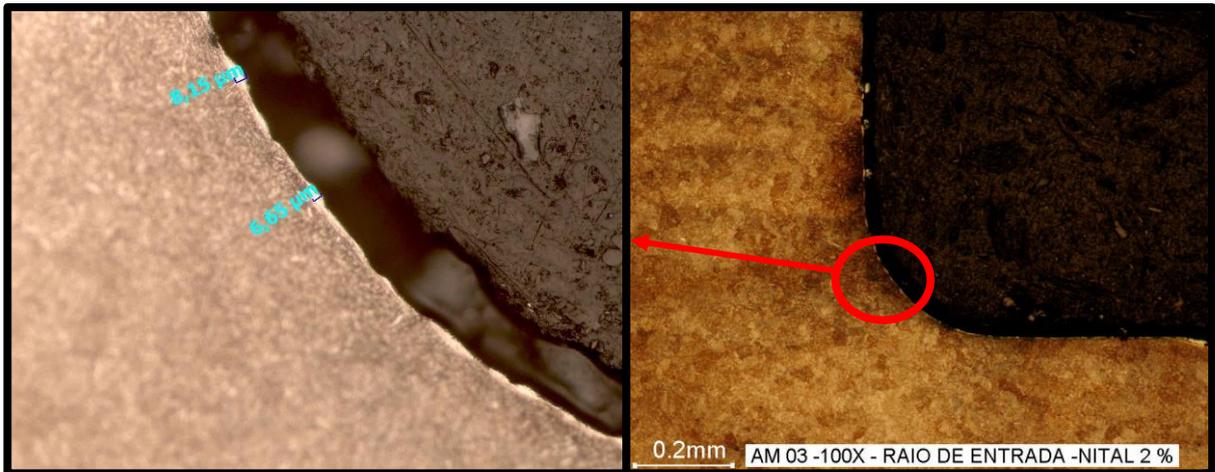
As figuras 21 e 22 nos mostram a presença da camada branca em maior quantidade nas extremidades dos raios de entrada e de saída, causados pela dificuldade de remoção do material erodido, o centro da cavidade apresenta um melhor acabamento.

Figura 21: Camada afetada condição 3 (raio de 0,5 mm; acabamento)



Fonte: o autor (2020)

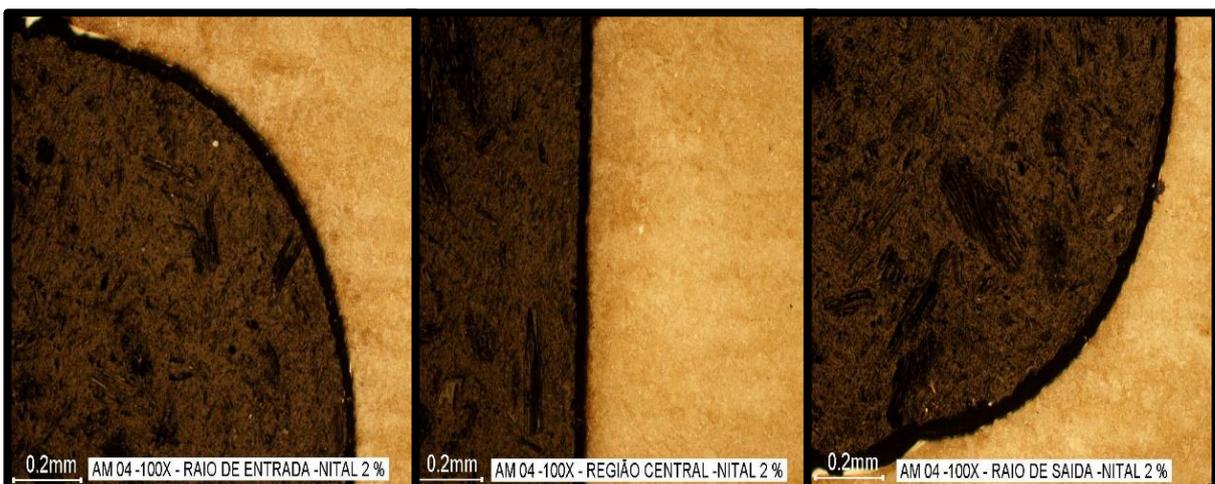
Figura 22: Área selecionada para medida camada branca condição 3



Fonte: o autor (2020)

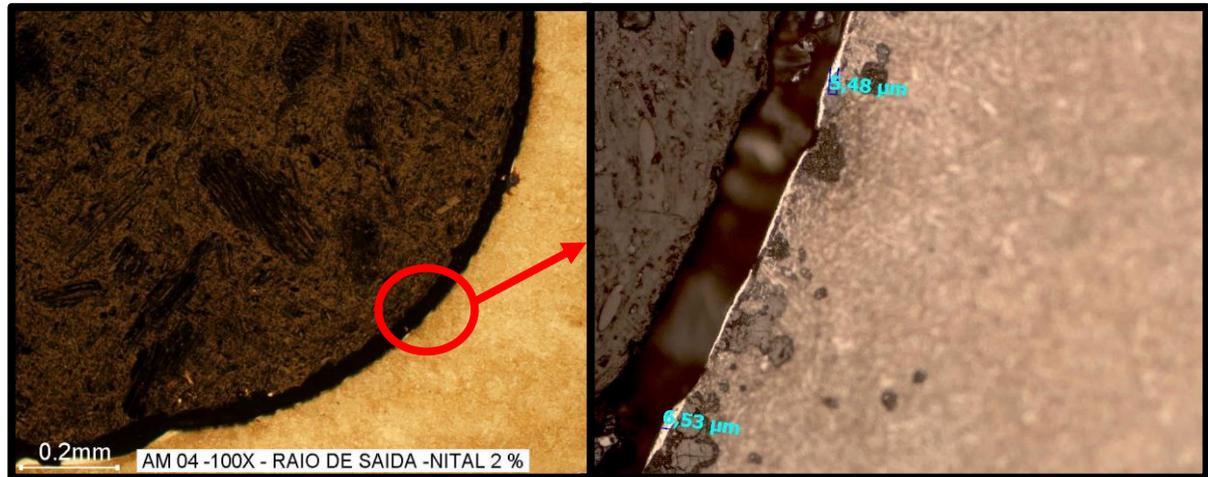
Nas figuras 23 e 24, nota-se pontos de camada branca apenas no início da formação dos raios de entrada e de saída, a parte central apresenta uma melhor qualidade superficial, como nos casos anteriores, a região dos raios é onde se formam as maiores quantidades de pontos de camada branca causados pelo material solidificado que não foi removido pelo dielétrico, a região medida está sendo mostrada na figura 24.

Figura 23: Camada afetada condição 4 (raio de 1,5 mm; acabamento)



Fonte: o autor (2020)

Figura 24: Área selecionada para medida camada branca condição 4



Fonte: o autor (2020)

Em testes anteriores realizados por Zeilmann, Bordin e Vacaro (2015), as análises da camada afetada resultaram em espessuras desiguais da camada subsuperficial na usinagem por eletroerosão

Nas amostras onde foram realizadas as condições de desbaste em que a corrente era maior, aumentando consideravelmente a taxa de remoção de material, nota-se grande presença da camada branca ao longo de todas as regiões.

Os carbonetos formados na camada branca dos materiais metálicos, podem causar aumento na dureza da superfície por reações a altas temperaturas com o carbono presente no dielétrico (HO e NEWMAN, 2003; KRUTH et al., 1995).

Kumar et al (2009) e Lee (2003) relatam que conforme o aumento o regime de trabalho como pulso de descarga T_{ON} e a variação da profundidade erodida, ocorre o aumento dessas espessuras. Afirmam também que a possibilidade de gerar trincas formadas pela tensão interna aumenta conforme a variação desses parâmetros.

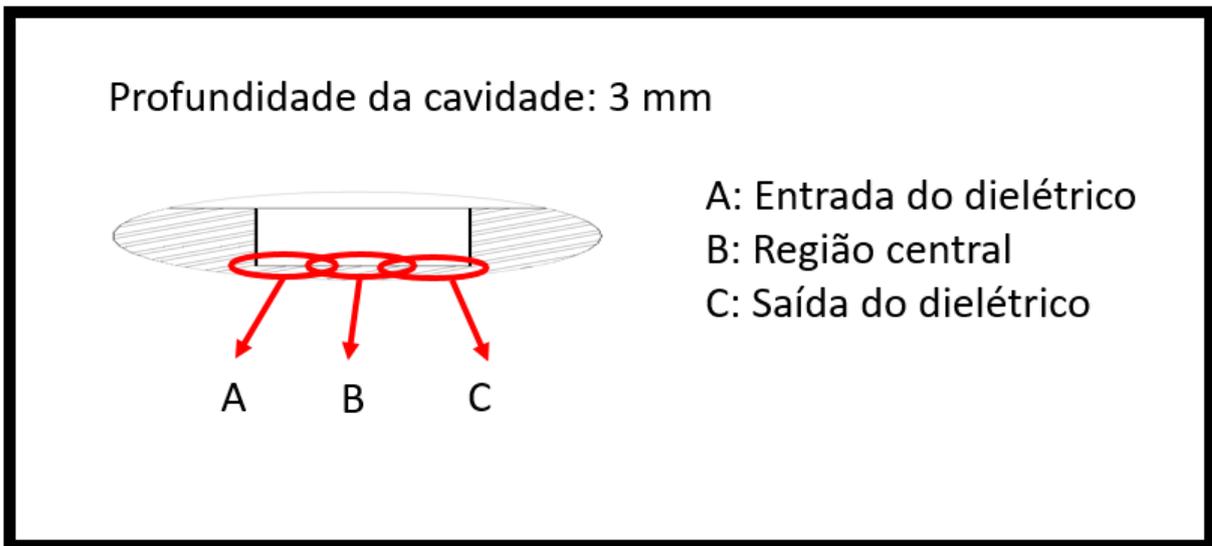
Esta situação nos deixa evidente o que é descrito na literatura, quando afirma que quanto maior a taxa de remoção de material, menor é a qualidade superficial.

Quando comparadas as regiões A, B e C, conforme indicada na figura 8, notamos um aumento da camada branca nas regiões C, isso ocorre pelo fato de que esta região é a saída do fluido dielétrico, dificultando a passagem do mesmo, podendo deixar acúmulo de material removido da cavidade erodida.

4.3 RUGOSIDADE

A rugosidade é um dos pontos mais importantes à serem avaliados no processo de eletroerosão, pois identifica desvios na geometria da superfície erodida. Foram coletados dados para serem comparados os parâmetros de rugosidade R_a , R_y e R_z nas regiões A, B e C conforme mostra a figura 25.

Figura 25: Regiões de análises

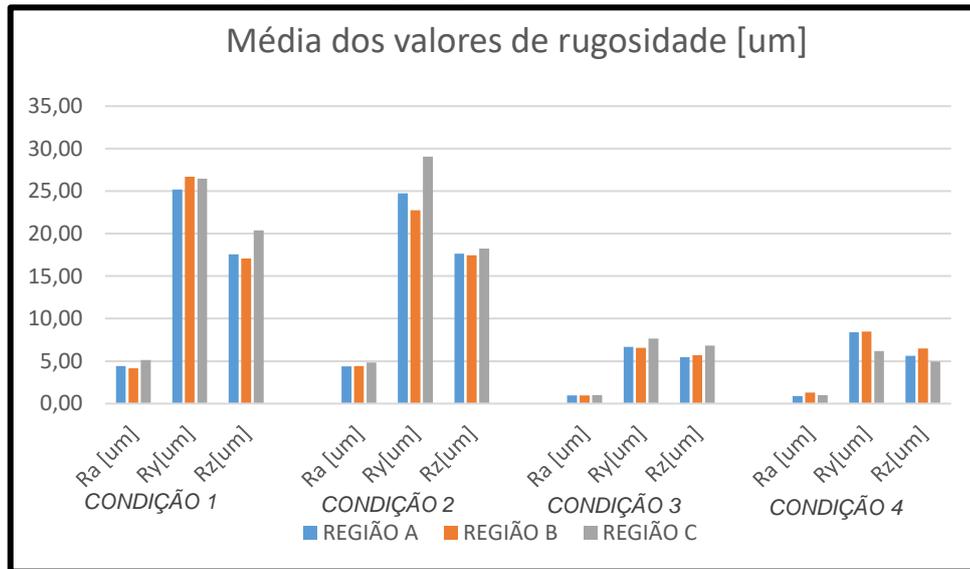


Fonte: o autor (2020)

Foram coletadas 3 medidas em cada região analisada e calculada as médias das mesmas para obter melhor eficiência na análise. Com as informações coletadas montou-se um gráfico para cada afim de facilitar as comparações das regiões analisadas.

Na figura 26 está sendo mostrado graficamente a média dos resultados obtidos pela medição da rugosidade, após finalizado a erosão das cavidades, as amostras foram cortadas para avaliação, sendo utilizado um rugosímetro da marca MITUTOYO SJ-310. As análises das amostras apresentam um aumento da rugosidade nas regiões "C" na maior parte dos casos, este fato pode ocorrer devido à dificuldade de remoção do material erodido nas regiões onde dificulta a passagem do fluido dielétrico, fazendo com que acúmulo de material prejudique na qualidade superficial da cavidade erodida.

Figura 26: Representação gráfica da média das rugosidades



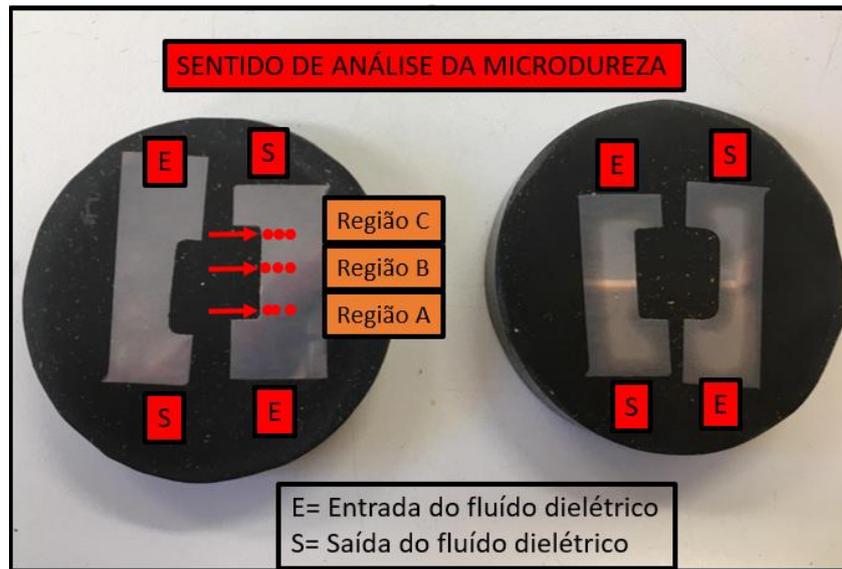
Fonte: o autor (2020)

Em virtude das altas temperaturas e dos bruscos ciclos de aquecimento e resfriamento, há uma grande possibilidade de surgimento de microfissuras e variação estrutural prejudicando a superfície erodida (SANTOS, 2010).

4.4 DUREZA POR MICRO-INDENTAÇÃO

Após realizada a eletroerosão, as amostras foram cortadas e embutidas para ser realizada as medições de dureza por micro-indentação. Para esse processo foi utilizado um durômetro Vickers microindenter Shimadzu Mitutoyo, figura 10, com uma carga de 0,025kg e uma distância de 20 μ m entre as indentações, a primeira medida foi realizada à 20 μ m da borda, conforme especificado na norma ASTM E384-11. Foram realizadas 3 medições para cada região de 20 μ m até 60 μ m, conforme mostra a figura 26.

Figura 27: Representação da análise realizada por micro - indentação

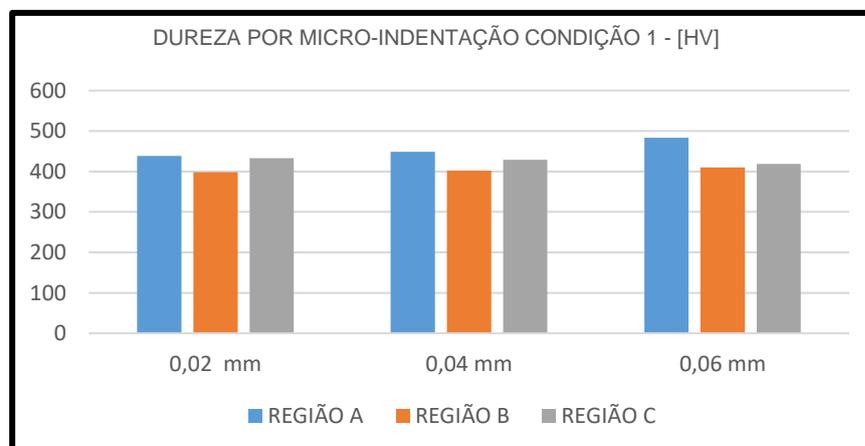


Fonte: o autor (2020)

Na condição 1, pode-se observar um aumento na dureza nas regiões A e C, onde encontram-se os raios de entrada e de saída, a dureza pode ter aumentado nesta região por haver material que não foi expelido e se solidificou.

Este fato condiz com a análise realizada por Munz, Risto e Haas (2013), onde os autores constataam que na saída do fluxo, devido a concentração de cavacos, há um menor resfriamento, pois, essa é uma região com maior dificuldade de lavagem, resultando em valores de dureza maiores.

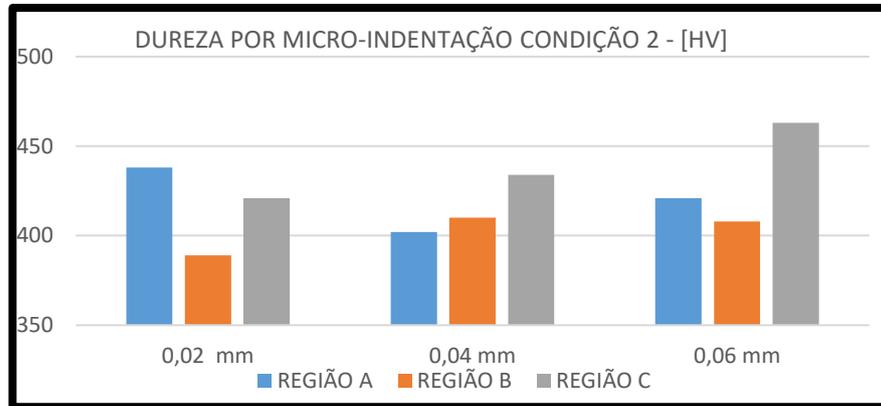
Figura 28: Representação gráfica dureza por micro-indentação condição 1



Fonte: o autor (2020)

Na condição 2, obteve-se maiores valores de dureza nas regiões dos raios de entrada e saída, situação semelhante à condição 1.

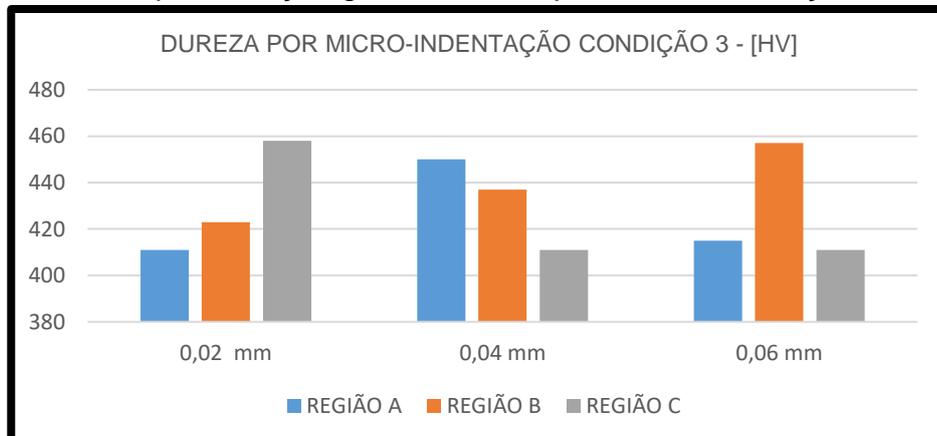
Figura 29: Representação gráfica dureza por micro-indentação condição 2



Fonte: o autor (2020)

Na condição 3, a dureza apresentou variações nas medidas coletadas, mais próximo à borda apresentou um valor maior na região de saída do fluido dielétrico, e quando medida à uma distância maior da borda apresentou um valor mais elevado no centro da cavidade.

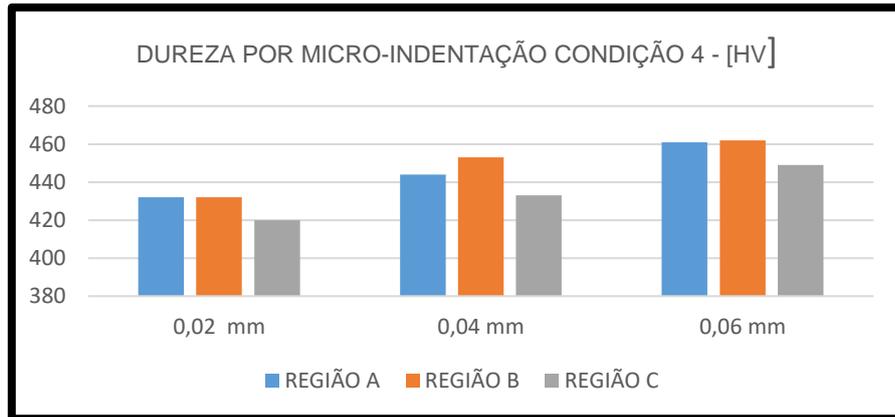
Figura 30: Representação gráfica dureza por micro-indentação condição 3



Fonte: o autor (2020)

Na condição 4 pode-se identificar um pequeno aumento da dureza quando medida à uma distância maior da borda.

Figura 31: representação gráfica dureza por micro-indentação condição 4



Fonte: o autor (2020)

Ao analisar os perfis de dureza nas regiões de análise indicadas, percebe-se que não existem mudanças significativas entre os perfis de dureza, em alguns casos observa-se que a dureza aumenta em direção a base do material, porém este efeito não se aplica para todas as regiões medidas.

A camada afetada pode ser facilmente mostrada a partir das análises de dureza. A zona de transformação de fase pode apresentar valores mais elevados de dureza, devido ao fato de sofrer efeitos semelhantes a tratamentos térmicos, alterando suas propriedades.

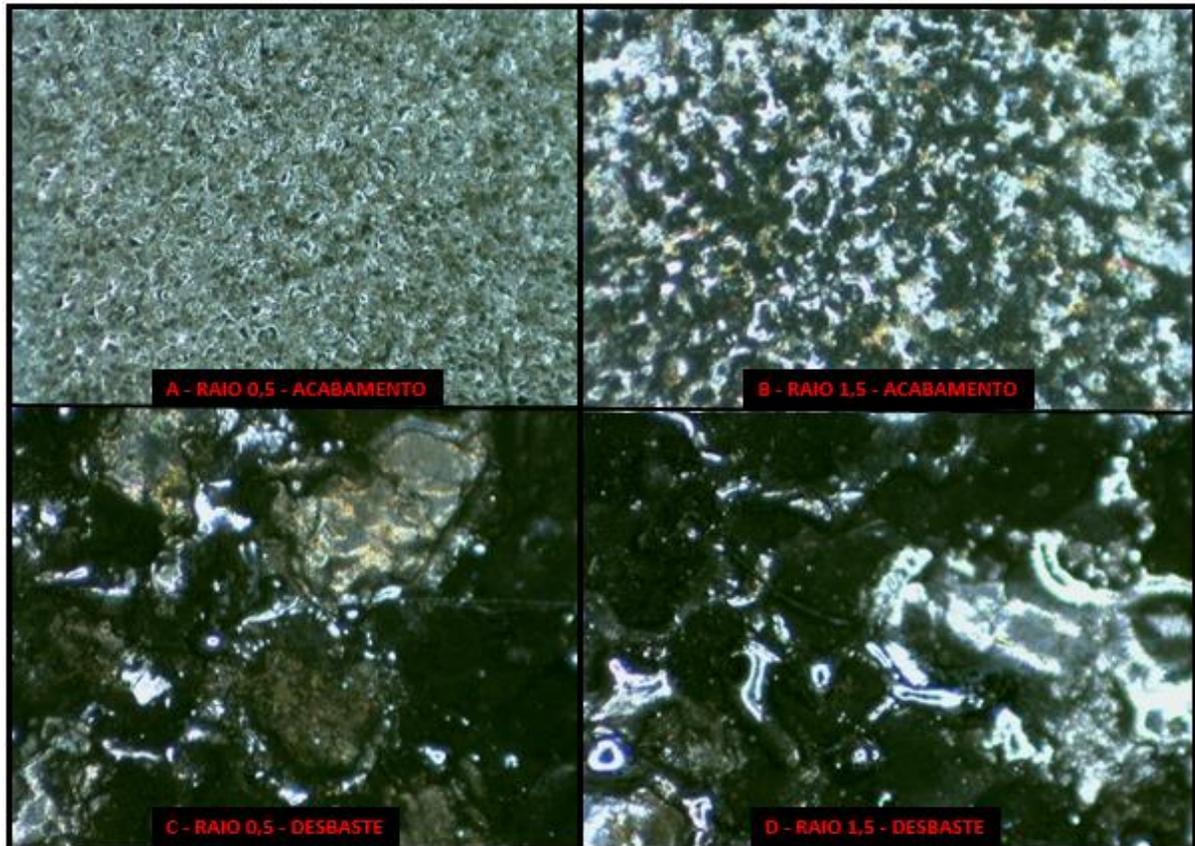
4.5 TEXTURA

As imagens abaixo apresentam a mesma ampliação de 45x, os pontos pretos representam as crateras, os pontos brancos representam os picos, região onde se encontra maior quantidade de material resolidificado, ocasionando enorme vazio entre essas regiões.

A figura 32 nos mostra com grande clareza a diferença da qualidade superficial das cavidades que não tiveram a condição de acabamento. Para a imagem (A) é possível observar um melhor acabamento, os picos e vales aparecem em

camadas pequenas, na imagem (B), onde o raio era maior, nota-se maiores camadas de picos e vales, causados pela solidificação de material não expelido pelo dielétrico.

Figura 32: textura do fundo das cavidades erodidas



Fonte: o autor (2020)

As imagens (C) e (D) mostram as cavidades que não receberam acabamento, e tiveram altas taxas de remoção de material devido ao trabalho em alta polaridade, apresentando uma grande quantidade de material solidificado, que formaram camadas solidificadas e crateras na superfície após a erosão.

Conforme Amorin (2002), na superfície do material, é possível que haja presença de material não expelido no final das descargas elétricas que se resolidificam, formando assim crateras circunvizinhas à mesma.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo avaliar a superfície de cavidades usinadas pelo processo de eletroerosão por penetração. Foi utilizado como amostra para teste um bloco de aço P20, tendo como variáveis de entrada os raios do eletrodo e a corrente da máquina, utilizando uma corrente baixa para acabamento e uma corrente alta para desbaste. Foram analisadas e comparadas as variações de rugosidade, a camada afetada e a dureza das amostras.

Para analisar a influência do raio quanto a rugosidade, foi realizado um corte em cada cavidade erodida e medido com a utilização de um rugosímetro, feito isso, pode-se observar um pequeno aumento da rugosidade nas regiões de saída do fluido dielétrico, esse aumento da rugosidade não é considerado um valor preocupante pois a diferença de valor encontrado para as regiões medidas é muito pequena, alguns autores afirmam que nesta região ocorre o acúmulo de material que não foi totalmente removido pelo fluido dielétrico, podendo afetar a superfície erodida, os raios de 0,5 e 1,5 mm não apresentaram grandes variações de rugosidade, quando usinados com os mesmos parâmetros. Outro fator importante a ser considerado é o aumento da rugosidade quando se trabalha em condição de desbaste, isso ocorre devido à alta taxa de remoção de material, quando maior é o valor da corrente maior é o T_{ON} , aumentando consideravelmente a taxa de material removido.

Quando analisadas a condições de desbaste e acabamento é possível observar uma grande diferença na qualidade da superfície, devido às altas taxas de remoção quando não aplicado acabamento, a superfície apresenta maiores deformações, com a análise da camada afetada, pode-se concluir que houve uma alteração significativa quando utilizado a condição de desbaste, aparecendo grandes regiões com camada branca, o que pode fragilizar o material causando crateras, micro trincas e poros. Quando comparados as regiões de cada cavidade entre si, nota-se a presença de camada branca em maior quantidade, mas regiões próximas aos raios, pois nestas regiões é onde ocorre o maior acúmulo de material não expelido, pelo fluido dielétrico.

A corrente é um dos parâmetros fundamentais para garantir uma melhor qualidade no processo de eletroerosão, quando utilizado uma corrente mais alta, aumenta-se o valor do T_{ON} , conseqüentemente aumenta a taxa de remoção, o

material removido muitas vezes não é totalmente expulso pelo fluido dielétrico, causando maiores deformações na superfície, a condição de acabamento pode ser aplicada após a condição de desbaste, assim é possível obter uma boa qualidade na superfície.

Através desta investigação pode-se concluir a importância que os parâmetros da máquina e a geometria do eletrodo exercem no processo de eletroerosão, devemos sempre analisar qual a aplicação e a necessidade do componente que será erodido para definirmos quais os melhores parâmetros para aquela aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM, F. L. **Tecnologia da eletroerosão por penetração da liga de alumínio AMP 8000 e da liga de cobre CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). UFSC. Florianópolis. 2002.
- AMORIM, Fred L.; WEINGAERTNER, Walter L. The behavior of graphite and copper electrodes on the finish die-sinking electrical discharge machining (EDM) of AISI P20 tool steel. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering*. Vol XXIX. No. 4 p 366-371. 2007.
- BENEDICT, Gary, F. *Nontraditional manufacturing processes*. Marcel Dekker. New York. 1987.
- CHE-HARON, C. H.; JAWAID, A. The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6%Al-4%V. *Journal of Materials Processing Technology* 166 p 188-192. 2005.
- CRUZ JUNIOR, Eli Jorge da. *A influência do tamanho de grão ferrítico da peça na integridade superficial de peças erodidas*. 2015.
- DIBITONTO, D.D.; EUBANK, P. T.; PATEL, M. R.; BARRUFET, M. A. **Theoretical models of the electrical discharge machining process I. A simple cathode erosion model**. *Journal of Applied Physics*. V.66, n.9. p. 4095-4103. 1989.
- ENGEMAC. **Manual de instalação, operação e manutenção: EDM 200 NC e EDM 440 NC**. Caxias do Sul. 2002
- EKMEKCI, B. **Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM)**. *Applied Surface Science* 253 p. 9234-9240. 2007.
- FENGOO, C.; DAYONG, Y. **The study of high efficiency and intelligent optimization system in EDM sinking process**. *Journal of Materials Processing Technology* 149 p. 83-87. 2004.
- FUKUZAWA, Y. et al. **Electrical discharge machining properties of noble crystals**. *Journal of Materials Processing Technology* 149 p. 393–397. 2004.
- GUITRAU, E. P. **The EDM Handbook**. 1. ed. USA. Hansen Gardner Publications. V.305. Cincinnati, OH. 1997. p.306.
- HIOKI, D.. **Influência dos parâmetros de corte HSM sobre o desempenho tribológico do aço AISI H13 endurecido**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006
- HO, K. H.; NEWMAN, S. T. **State of the art electrical discharge machining (EDM)**. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.43, n. 13, p.1287–1300, 2003. ISSN 0890-6955. Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695503001627> >. Acessado em 1 de maio de 2019.

IVANISKI, T.. **Avaliação da integridade do material AISI H13 e cobre eletrolítico usinado através do processo de eletroerosão EDM.** Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Materiais. UCS, Caxias do Sul. pág. 51. 2015.

KÖNIG W., KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997. 5. Edição revisada. Band 1. 471 p.

KRUTH JP, Stevens L, Froyen L, Lauwers B (1995) Study of the white layer of a surface machined by die-sinking electro-discharge machining. Ann CIRP 44:169–172

KUMAR, S. et al. **Surface Modification by Electrical Discharge Machining: A review.** Journal of Materials Processing Technology. 209: 3675-3687 p. 2009.

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

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

LONARDO PM, BRUZZONE AA (1999) Effect of flushing and electrode material on die sinking EDM. CIRP Ann Manuf Technol 48(1):123–126.

MAHARDIKA, Muslim; TSUJIMOTO, Takayuki; MITSUI, Kimiyuki. A new approach on the determination of ease of machining by EDM processes. International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 p. 746–760. 2008.

MARAFONA, J. Black layer characterisation and electrode wear ratio in electrical discharge machining (EDM). Journal of Materials Processing Technology 184 p. 27–31. 2007.

MESQUITA, N. G. M. **Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função**

Fabricação. Florianópolis. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. 1992.

MOHRI, N.; TAKEZAWA, H.; SAITO, N. **On-the-machine measurement in EDM process by a calibration system with polyhedra.** Ann CIRP, v.43, n.1, p.203–206, 1994.

MOHRI, N.; SUZUKI, M.; FURUYA, M.; SAITO, N. **Electrode wear process in electrical discharge machining.** Ann CIRP, v. 44, n.1, p.165–168, 1995.

MUNZ, M.; RISTO, M.; HAAS, R..**Specifics of Flushing in Electrical Discharge Drilling.** Procedia CIRP, Volume 6, 2013, p. 83-88

MUTHURAMALINGAM, T.; MOHAN, B. A Review on Influence of Electrical Process Parameters in EDM Process. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 15, n. 1, p.87-94, 2015. ISSN 1644-9665. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1644966514000466>>. Acessado em 5 de Abril de 2019.

RAMASAWMY, H.; BLUNT, L. **Effect of EDM process parameters on 3D surface topography**. Journal of Materials Processing Technology. n. 148, p. 155–164. 2004.

SCHIMITZ 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). Universidade Federal de Santa Catarina.

TARNG, Y. S.; MA, S.C.; CHUNG, L. K. **Determination of optimal cutting parameters in wire electrical discharge machining**. Int. J. mach. Tools Manufact, v. 35, n. 12, p. 1693-1701. 1995.

TABENKIN, A. **Surface Finish: a machinist's toll. A desing necessity**. Modern Shop. n. 3, 1999. Disponível em: <<http://www.mmsonline.com>> Acesso em 11 de abril de 2019.

WEINGAERTNER, Walter L. Tecnologia de fabricação volume 3. Material didático da disciplina EMC 6316. POSMEC. UFSC. Florianópolis. 199-?. 301p.

YOUSSEF, H. A.; EL-HOFY, H.. **Machining technology: machine tools and operations**. CRC Press. 633p. Flórida. 2008.

ZEILMANN, R.; BORDIN, F.; VACCARO, T.. **Surface integrity of electrodischarge machined cavities for different depths and radii**. The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.2014.

ANEXO A – PLANILHA DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE

RAIO 1,5 - ACABAMENTO

	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Ra [um]	1,01	1,02	0,87	1,03	0,98	0,92	0,81	1,17	1,03
Rz1max(Ry)[um]	7,79	5,76	6,48	6,43	6,7	6,57	6,05	7,79	9,08
Rz[um]	6,16	5,5	4,78	6,04	5,77	5,3	8,8	7,97	8,86

RAIO 1,5 - ACABAMENTO

	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Ra [um]	0,87	0,91	0,84	1,69	1,16	1,02	0,83	0,96	1,2
Rz1max(Ry)[um]	10,03	7,4	7,72	10,29	7,6	7,52	5,78	5,59	7,13
Rz[um]	6,75	5,54	4,59	7,83	6,18	5,46	4,61	4,91	5,28

RAIO 0,5 - DESBASTE

	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Ra [um]	3,85	5,87	3,42	3,69	5,41	4,13	6,28	3,12	5,12
Rz1max(Ry)[um]	25,01	26,57	22,64	15,9	29,67	22,68	33,55	24,46	29,14
Rz[um]	15,62	22	15,36	13,95	21,39	17,05	22,35	13,85	18,49

RAIO 1,5 - DESBASTE

	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Ra	5,5	3,44	4,27	5,38	3,05	4,02	3,96	4,99	6,44
Rz1max(Ry)	29,07	25,93	20,54	37,98	18,42	23,72	22,59	26,76	30,04
Rz	20,55	15,63	16,52	21,34	14,48	15,39	17,91	20,01	23,27

MÉDIA REGIÕES A, B, C - RAIOS 1,5 - DESBASTE			
CONDIÇÃO 1	A	B	C
Ra [um]	4,40	4,15	5,13
Ry[um]	25,18	26,71	26,46
Rz[um]	17,57	17,07	20,40

MÉDIA REGIÕES A, B, C - RAIOS 0,5 - DESBASTE			
CONDIÇÃO 2	A	B	C
Ra [um]	4,38	4,41	4,84
Ry[um]	24,74	22,75	29,05
Rz[um]	17,66	17,46	18,23

MÉDIA REGIÕES A, B, C - RAIOS 0,5 - ACABAMENTO			
CONDIÇÃO 3	A	B	C
Ra [um]	0,97	0,98	1,00
Ry[um]	6,68	6,57	7,64
Rz[um]	5,48	5,70	6,83

MÉDIA REGIÕES A, B, C - RAIOS 1,5 - ACABAMENTO			
CONDIÇÃO 4	A	B	C
Ra [um]	0,87	1,29	1,00
Ry[um]	8,38	8,47	8,55
Rz[um]	5,63	6,49	6,93

AXEXO B - PLANILHA DAS MEDIÇÕES DE DUREZA

DUREZA POR MICRO-INDENTAÇÃO CONDIÇÃO 1 - [HV]			
DISTÂNCIA	REGIÃO A	REGIÃO B	REGIÃO C
0,02 mm	438	398	433
0,04 mm	449	402	429
0,06 mm	483	410	419

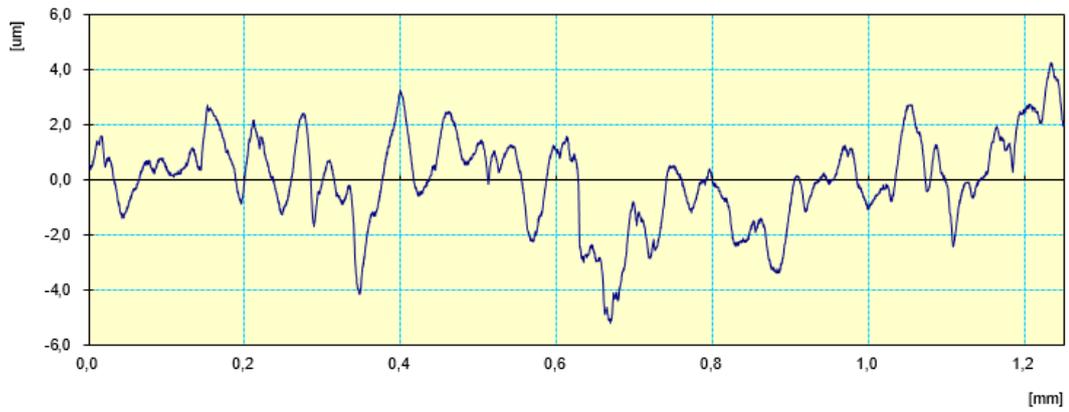
DUREZA POR MICRO-INDENTAÇÃO CONDIÇÃO 2 - [HV]			
DISTÂNCIA	REGIÃO A	REGIÃO B	REGIÃO C
0,02 mm	438	389	421
0,04 mm	402	410	434
0,06 mm	421	408	463

DUREZA POR MICRO-INDENTAÇÃO CONDIÇÃO 3 - [HV]			
DISTÂNCIA	REGIÃO A	REGIÃO B	REGIÃO C
0,02 mm	411	423	458
0,04 mm	450	437	411
0,06 mm	415	457	411

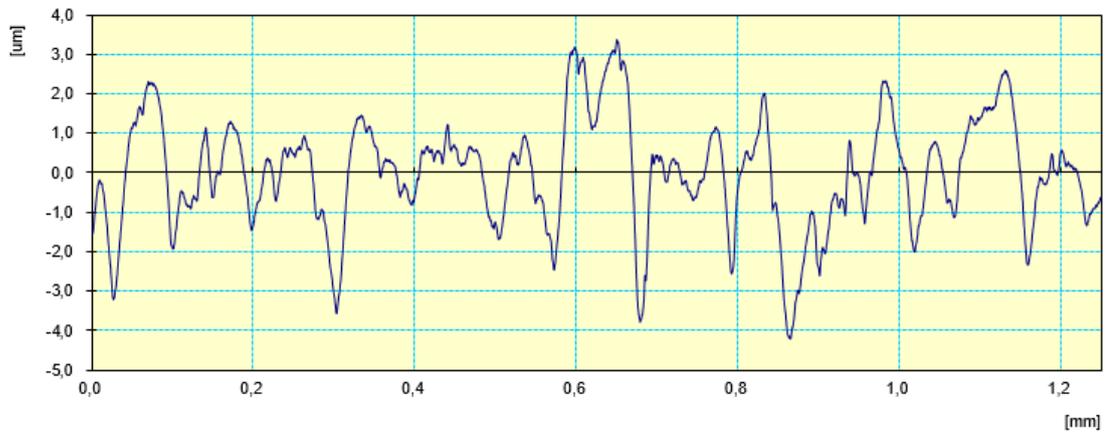
DUREZA POR MICRO-INDENTAÇÃO CONDIÇÃO 4 - [HV]			
DISTÂNCIA	REGIÃO A	REGIÃO B	REGIÃO C
0,02 mm	432	432	420
0,04 mm	444	453	433
0,06 mm	461	462	449

AXEXO C - UMA AMOSTRA DA MEDIÇÃO DE CADA REGIÃO NAS DIFERENTES CONDIÇÕES

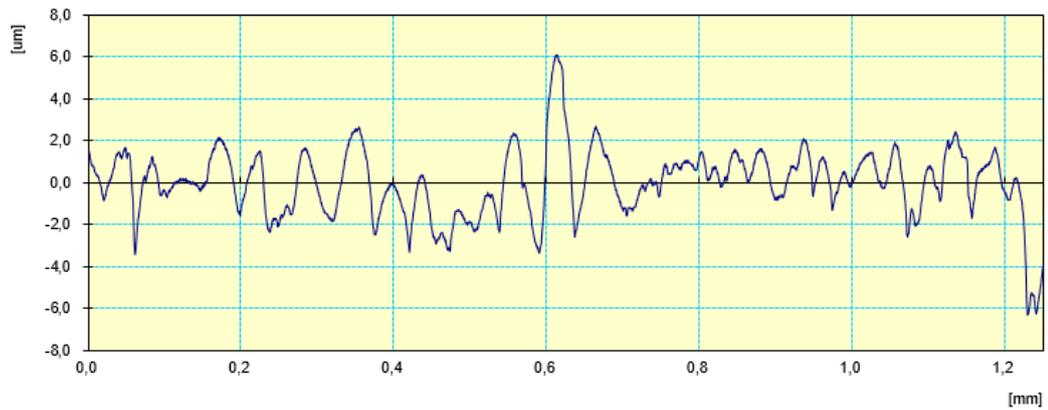
RAIO 0,5 ACABAMENTO - REGIÃO A



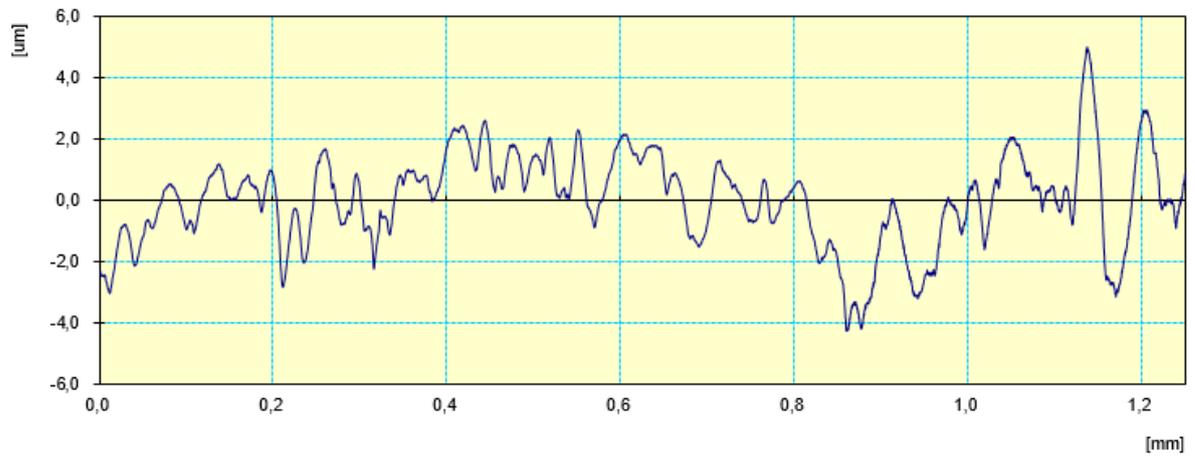
RAIO 0,5 ACABAMENTO - REGIÃO B



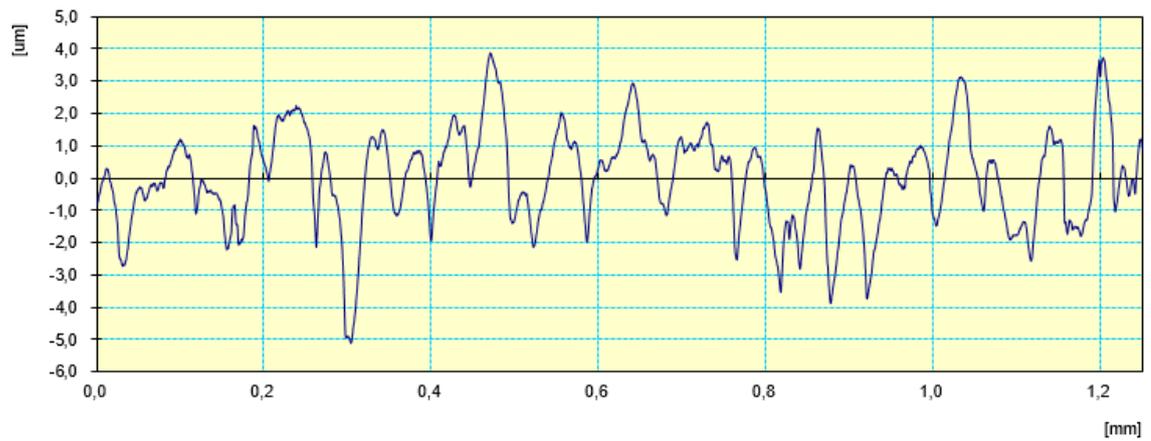
RAIO 0,5 ACABAMENTO - REGIÃO C



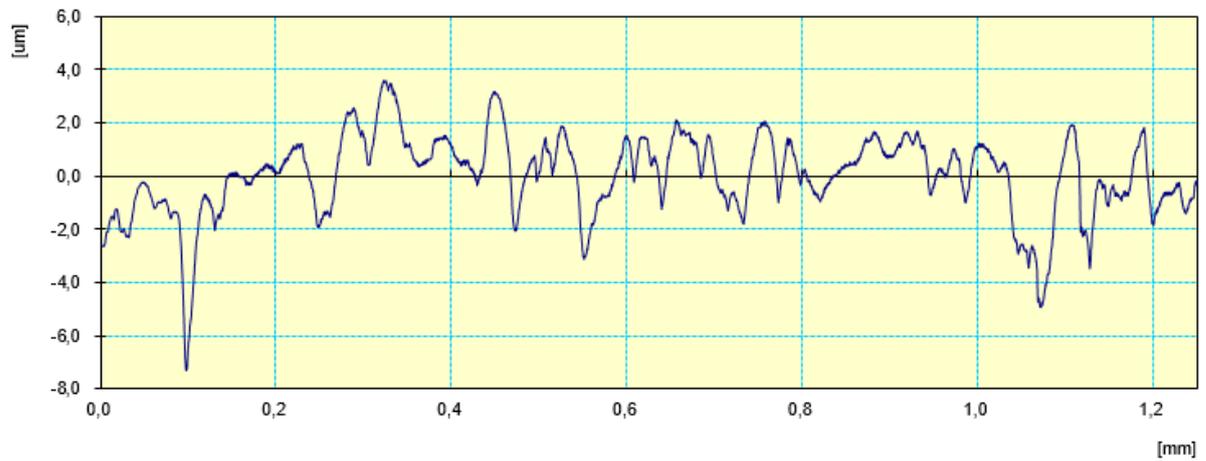
RAIO 1,5 ACABAMENTO - REGIÃO A



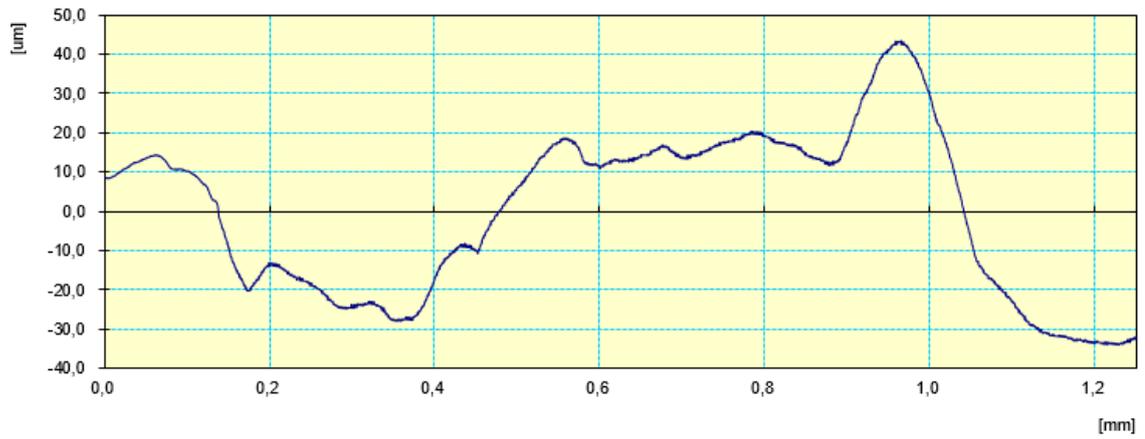
RAIO 1,5 ACABAMENTO - REGIÃO B



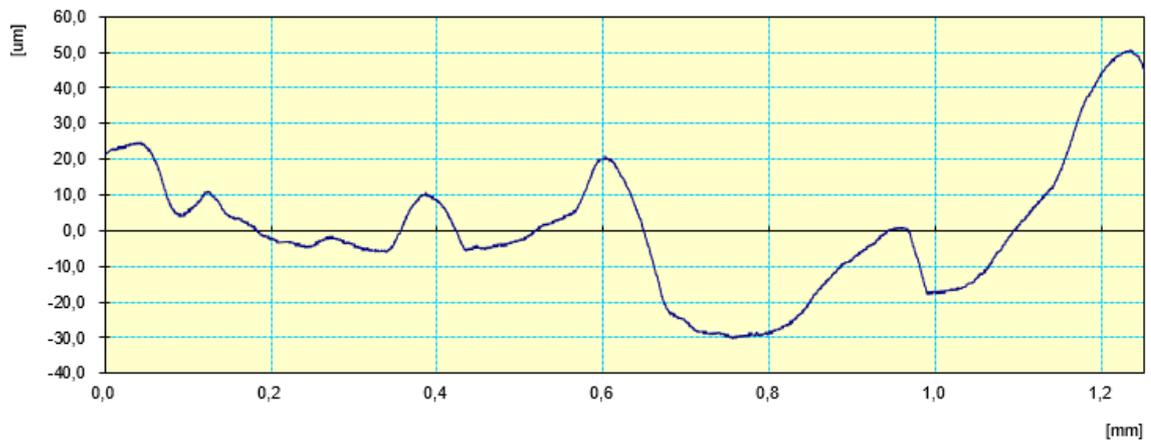
RAIO 1,5 ACABAMENTO - REGIÃO C



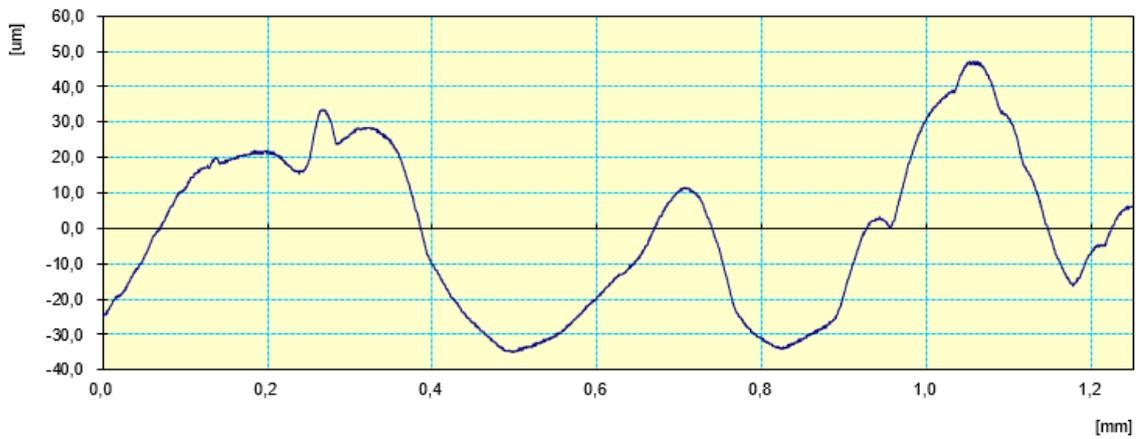
RAIO 0,5 DESBASTE – REGIÃO A



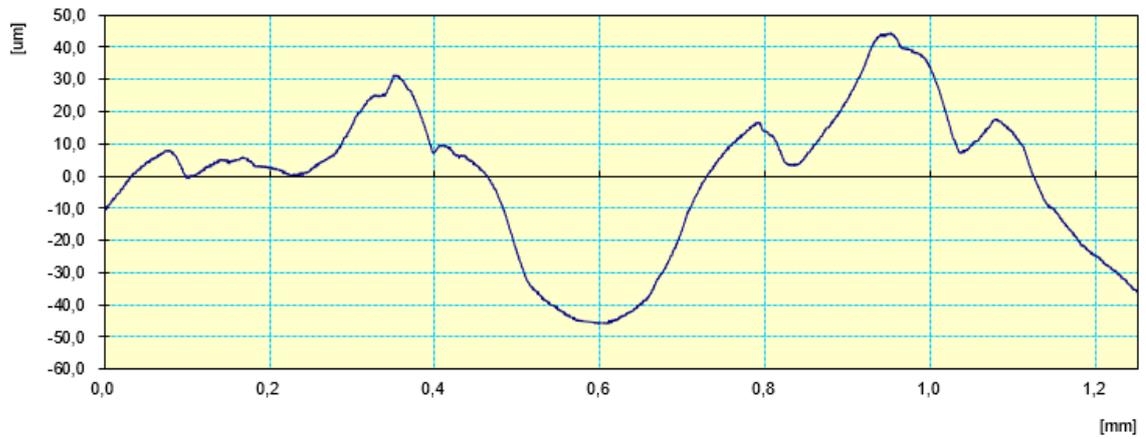
RAIO 0,5 DESBASTE – REGIÃO B



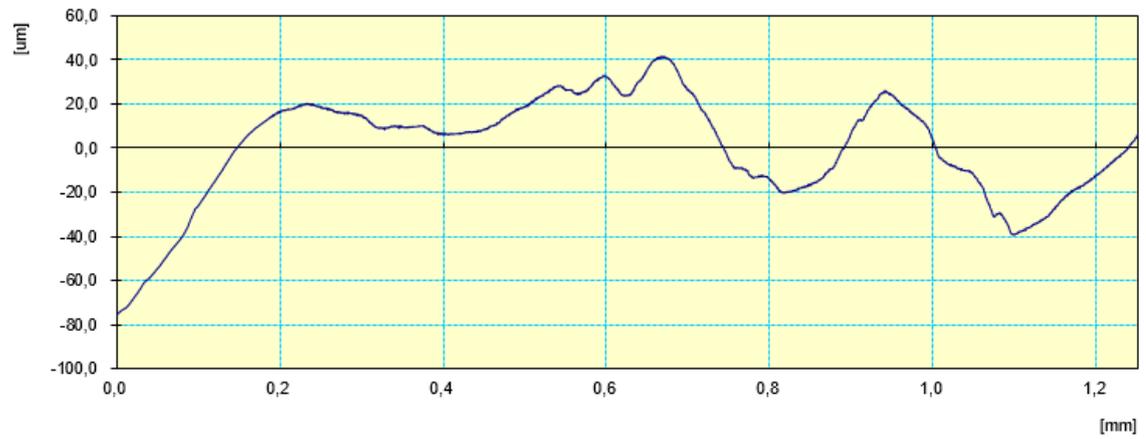
RAIO 0,5 DESBASTE – REGIÃO C



RAIO 1,5 DESBASTE – REGIÃO A



RAIO 1,5 DESBASTE – REGIÃO B



RAIO 1,5 DESBASTE – REGIÃO C

