

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

ANDREI VERLINDO DRUM

ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL DE PEÇAS ERODIDAS COM
FERRAMENTA RETANGULAR E LAVAGEM UNILATERAL

CAXIAS DO SUL

2020

ANDREI VERLINDO DRUM

**ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL DE PEÇAS ERODIDAS COM
FERRAMENTA RETANGULAR E LAVAGEM UNILATERAL**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

CAXIAS DO SUL

2020

ANDREI VERLINDO DRUM

**ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL DE PEÇAS ERODIDAS COM
FERRAMENTA RETANGULAR E LAVAGEM UNILATERAL**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Processos de Fabricação.

Aprovado em 14/12/2020

Banca Examinadora

Prof. Me. Celso Ferrarini

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Leandro Corso

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

A eletroerosão é um processo de usinagem não convencional, muito utilizado em peças de dureza elevada e permite a usinagem de geometrias complexas. O desbaste de material é obtido através de descargas elétricas. A otimização de seus parâmetros e técnicas são importantes para se obter uma qualidade maior na superfície de peças. Neste trabalho foi investigado a influência no sentido do fluido dielétrico durante o processo EDM. O eletrodo utilizado é de cobre eletrolítico e o material submetido a usinagem foi o aço P20. Foram avaliados os resultados de textura, rugosidades e integridade das cavidades retangulares com o fluxo de lavagem no sentido ortogonal e longitudinal. Notou-se que o sentido do fluxo de lavagem não influenciou de forma a se destacar durante o processo, pois teve resultados similares nas duas condições. A diferença nas dimensões da geometria não foi suficiente para se encontrar resultados de relevância, porém constatações importantes nas camadas foram obtidas, e conclusões a respeito de parâmetros não-elétricos ficaram nítidas nesse estudo.

Palavras-chave: usinagem por eletroerosão, fluido dielétrico, lavagem, textura, rugosidade, integridade.

ABSTRACT

Electroerosion is an unconventional machining process, widely used in high hardness parts and allows the machining of complex geometries. The material thinning is distributed through electrical discharges. The optimization of its parameters and techniques are important to obtain a higher quality on the surface of parts. In this work, the influence in the sense of dielectric fluid during the EDM process was investigated. The electrode used is electrolytic copper and the material submitted to machining was P20 steel. The results of texture, roughness and integrity of rectangular cavities were evaluated with the washing flow in the orthogonal and longitudinal direction. It was noted that the direction of the washing flow did not influence to stand out during the process, as it had similar results in both conditions. The difference in geometry dimensions was not sufficient to find relevant results, but important findings in the layers were obtained, and conclusions regarding non-electrical parameters were clear in this study.

Keywords: machining by electroerosion, dielectric fluid, washing, texture, roughness, integrity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de moldes fabricados pelo processo EDM.....	14
Figura 2 - Diagrama do Processo EDM.....	15
Figura 3 - Ciclos da Descarga Elétrica	16
Figura 4 - GAP	17
Figura 5 – Exemplo de limpeza.....	22
Figura 6 - Imagem com representação de uma superfície usinada por EDM demonstrando os principais aspectos e seus fatores de influência.....	23
Figura 7 – Superfície obtida por eletroerosão	24
Figura 8 – Tipos de crateras do processo EDM	24
Figura 9 - Camadas características geradas na peça pela eletroerosão.....	25
Figura 10- Fluxo do dielétrico na cavidade erodida.....	26
Figura 11 – Fluxograma de atividades	27
Figura 12 – Os eletrodos e o corpo de prova.....	27
Figura 13 - Engemaq de modelo EDM 440 NC	28
Figura 14 – Processo EDM com fluxo no sentido longitudinal	28
Figura 15 - Sentidos da lavagem	29
Figura 16 - Regiões a serem analisadas.....	30
Figura 17 - Textura das cavidades com fluxo de lavagem no sentido ortogonal	31
Figura 18 - Textura das cavidades com fluxo de lavagem no sentido longitudinal	32
Figura 19 - Perfil de Rugosidade.....	33
Figura 20 - Média de Rugosidades	33
Figura 21 - Rugosidades	34
Figura 22 – Rugosidades obtidas no trabalho base.....	35
Figura 23 - Análise da superfície usinada utilizando fluxo no sentido ortogonal	36
Figura 24 - Análise da superfície usinada utilizando fluxo no sentido longitudinal	37
Figura 25 – Poro existente abaixo a camada branca.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições de operação	29
Tabela 2 - Parâmetros utilizados	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>	Usinagem por Descarga Elétrica
ET	<i>Electrolytic Tough</i>	Eletrolítico Resistente
GAP	Fenda de trabalho	
Ra	Rugosidade média	
Rz(med)	Altura média do pico ao vale	
Rz	Altura máxima do perfil	
TRM	Taxa de Remoção de Material	
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas	
ZTA	Zona Térmica Afetada	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	JUSTIFICATIVA.....	11
1.2	OBJETIVOS.....	11
1.2.1	Objetivo geral	12
1.2.2	Objetivos específicos.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	HISTÓRICO.....	13
2.2	O PROCESSO.....	14
2.2.1	Características do EDM.....	14
2.2.2	Mecanismo de remoção do material	16
2.2.3	Importância dos parâmetros	18
2.2.4	Fatores influentes e a qualidade no acabamento superficial.....	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1	MATERIAIS	27
3.2	PARÂMETROS E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	28
4	RESULTADOS.....	31
4.1	QUALIDADE SUPERFICIAL	31
4.1.1	Texturas.....	31
4.1.2	Rugosidade da peça.....	32
4.1.3	Integridade (sub-superfície)	35
5	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A usinagem por eletroerosão vem ganhando cada vez mais espaço na indústria, muito devido a sua capacidade de produzir componentes complexos, pois a crescente demanda por materiais com características especiais em aplicações avançadas, como instrumentos aeroespaciais e cirúrgicos, levou ao desenvolvimento de novas alternativas. Considerando este e também o fato desses materiais apresentarem grande resistência ao corte usando processos de fabricação mais convencionais, os fabricantes procuram explorar novos processos de usinagem que mantenham ou até melhoram a precisão, mas a um custo razoável.

Uma opção de usinagem bem estabelecida no polo industrial, a usinagem por eletroerosão, também chamada de usinagem por descargas elétricas, ou ainda EDM (Electrical Discharge Machining) realiza tarefas específicas que não se consegue realizar através de processos convencionais, pois permite o processamento de qualquer tipo de material que seja condutor elétrico.

A usinagem por eletroerosão é um processo de usinagem não convencional que remove o material através de descargas elétricas, bastante conhecido por poder derreter qualquer material condutor de eletricidade (ALI; BANU,2016). O que torna o EDM diferente dos processos convencionais de usinagem, é a remoção de material, que não ocorre por cisalhamento ou deformação, sendo assim, a dureza, resistência e tenacidade não possuem a mesma influência na remoção de material, como ocorre nos processos convencionais por geometria definida.

Uma das características surpreendentes do processo de EDM é a velocidade e precisão que pode ser mantida. Uma das maiores dificuldades no comércio de usinagem é determinar precisões em algumas partes requeridas. Alguns trabalhos requerem tolerâncias extremamente estreitas, que muitas vezes desnecessárias, adicionam custos substanciais para o processo. Sendo assim, compreender tolerâncias é um trunfo importante na redução de custos de usinagem (GUITRAU, 1997).

Enquanto nos processos convencionais, a fabricação de materiais com geometria complexa pode se tornar muito cara ou até mesmo impossível de se produzir, o EDM, tem se tornado um excelente método para aumentar a produtividade, e atender essas dificuldades. Com avanços tecnológicos, tanto nas máquinas, acessórios e sistemas de controle, está sendo muito utilizado, visando qualidade e redução de custos.

Com essa evolução na fabricação, a otimização desse processo com diversos materiais ganha força, em busca de maior resistência, menor rugosidade, melhor qualidade superficial, entre outros. Ao encontro disso, é de grande relevância o estudo dos parâmetros, dos fluídos e

materiais durante o processo erosivo, avaliando seu acabamento superficial. Portanto, a variação dos fatores citados é de suma importância para este trabalho, onde o comportamento da superfície e seu acabamento serão abordados, visto que pesquisas baseadas neste quesito são realizadas para a melhoria e a inovação desta tecnologia, tentando encontrar um melhor desempenho.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o crescimento da utilização do processo EDM no mercado, principalmente para produção de moldes e matrizes, o aumento da demanda é diretamente proporcional. Dessa forma, buscar meios de trazer melhores resultados ao processo, é extremamente viável e necessário. No cenário de fabricação atual, o produto industrial não só requer a alta precisão e qualidade, mas deve ser produzido no mínimo de tempo a fim de sustentar sua posição na concorrência no mercado global. Assim, se faz necessária uma aplicação correta do processo, conhecendo os parâmetros dominantes e o resultado do trabalho.

Outra característica importante, que justifica o estudo é que os processos tradicionais de usinagem geram calor e tensões na superfície usinada, produzindo enormes cavacos e também afetam as características estruturais e superficiais da peça, não conseguindo produzir superfícies de alta qualidade, sem distorções (SCHMIDT; SABO, 2008).

Este trabalho justifica-se, também, por ter como objetivo, a análise da qualidade superficial das peças usinadas por descarga elétrica, com variações no posicionamento do fluxo de lavagem. Através de estudos e ensaios com um eletrodo retangular, analisar o efeito da variação das dimensões de cavidades e de suas camadas é de suma importância, visto que ainda há muita dificuldade em encontrar materiais de estudo sobre esse assunto, que mesmo com avanços tecnológicos, ainda precisa ser compreendido.

1.2 OBJETIVOS

Esta seção apresenta os objetivos gerais e específicos que auxiliarão o desenvolvimento deste trabalho. Através da compreensão do processo, analisar a qualidade superficial e as variações estruturais nas camadas do material, onde serão feitas as cavidades usinadas por descargas elétricas, com eletrodo ferramenta de seção retangular, e compreender o efeito do fluxo de lavagem a partir do seu posicionamento.

1.2.1 Objetivo geral

Através da compreensão do processo, analisar a qualidade superficial e as variações estruturais nas camadas do material, onde serão feitas as cavidades usinadas por descargas elétricas, com eletrodo ferramenta de seção retangular, e compreender o efeito do fluxo de lavagem a partir do seu posicionamento.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atender o objetivo geral, serão estipulados alguns objetivos específicos os quais serão tratados com maior detalhe neste trabalho, sendo eles:

- a) entender através da bibliografia disponível, o processo de usinagem por descargas elétricas;
- b) conhecer os parâmetros, os fatores e condições influentes no processo;
- c) a partir de um domínio inicial, desenvolver uma metodologia para a realização de ensaios;
- d) realizar os ensaios desenvolvidos, utilizando o eletrodo ferramenta com seção retangular e lavagem unilateral;
- e) analisar os resultados obtidos, e avaliar o efeito da seção do eletrodo sobre o fluxo de lavagem e sobre a qualidade superficial nos dois sentidos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, encontra-se a revisão bibliográfica necessária para embasar o conhecimento a respeito do processo EDM e o desenvolvimento de ensaios, com diferentes dimensões no eletrodo ferramenta e lavagem unilateral, buscando a analisar o comportamento do seu acabamento superficial. O desenvolvimento utiliza como base conceitos do processo, fundamentos de parâmetros e desempenhos obtidos para modelos teóricos.

2.1 HISTÓRICO

O EDM surgiu da necessidade de realizar operações de usinagem em metais difíceis de usinar. Na década de 1770, o cientista inglês Priestley descobriu o efeito erosivo das descargas elétricas. Mais de cem anos se passariam antes que algum uso prático fosse feito pela descoberta. Os russos geralmente recebem o crédito pela descoberta do EDM, pelo fato de que em 1941, na URSS, os professores Dr. Boris Lazarenko e Natalya Lazarenko da Universidade de Moscou, investigaram e realizaram o primeiro trabalho, associando o nome de Lazarenko aos primeiros processos chamados erosão por faísca, mais recentemente referida como usinagem por descarga elétrica. O sistema Lazarenko serviu de modelo para as máquinas produzidas na Europa e no Japão (BEN,2005).

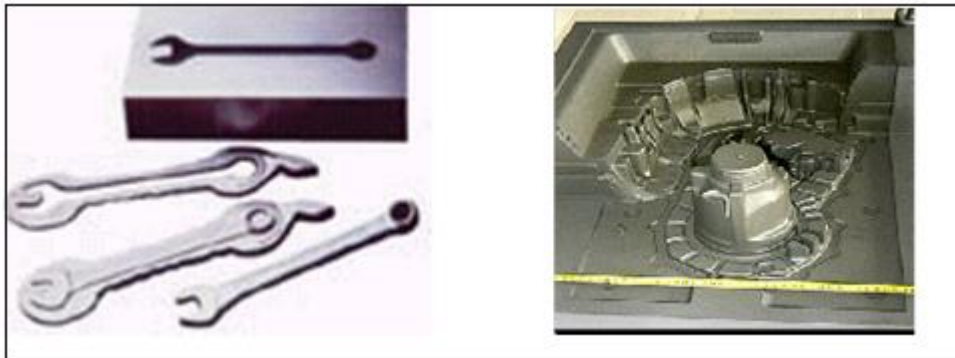
Com o tempo surgiu o EDM cortado a fio, que teve o desenvolvimento do processo ocorrendo durante um período de aproximadamente 10 anos, que foi do início dos anos 60 ao início dos anos 70. O primeiro grande evento na evolução do EDM foi o comando numérico, fazendo com que o posicionamento preciso do eixo fosse alcançado. No início dos anos 70, houve a transformação do EDM de corte a fio em um sistema de usinagem prático pois o controle numérico foi substituído pelo controle numérico por computador. Aprimorado e simplificado, o EDM cortado a fio provocou quase uma aceitação universal (JAMESON,2001).

Desde então, a tecnologia EDM se desenvolveu rapidamente e tornou-se indispensável em aplicações como fabricação de moldes, matrizes, prototipagem, etc. Nos últimos anos, muitos estudos e desenvolvimentos, têm sido feitos no campo da EDM, e ainda assim existem lacunas na investigação. A cada dia surgem novas ideias e projetos de otimização, mostrando a crescente utilização do processo em todo o mundo e nas mais variadas áreas.

2.2 PROCESSO

A eletroerosão é um processo de usinagem especial, onde o desbaste de material não é obtido pelo contato mecânico entre uma ferramenta de corte e a peça de trabalho, mas pela ação de descargas elétricas. É apresentada como um dos processos mais utilizados na fabricação de moldes para fundição e injeção, como nos mostra a Figura 1, por ser capaz de gerar formas complexas tridimensionais somente pela energia térmica gerada pela fagulha na cavidade do material condutor, independentemente de sua dureza. Por ser frequentemente usada em peças difíceis de usinar por outros métodos, e obter uma boa precisão dimensional, tem sido objeto de muitos estudos (AMORIM; WEINGAERTNER, 2002).

Figura 1 – Exemplo de moldes fabricados pelo processo EDM



Fonte: Intech EDM (1996)

2.2.1 Características do EDM

A eletroerosão consiste no arranque de partículas metálicas por meio de descargas elétricas. É indicado na usinagem de formas complexas em materiais condutores elétricos, difíceis de serem usinados por processos tradicionais de usinagem. Se destaca por usinar qualquer material que seja condutor, sejam eles rígidos, frágeis independente de suas respectivas durezas (ARANTES et al., 2016).

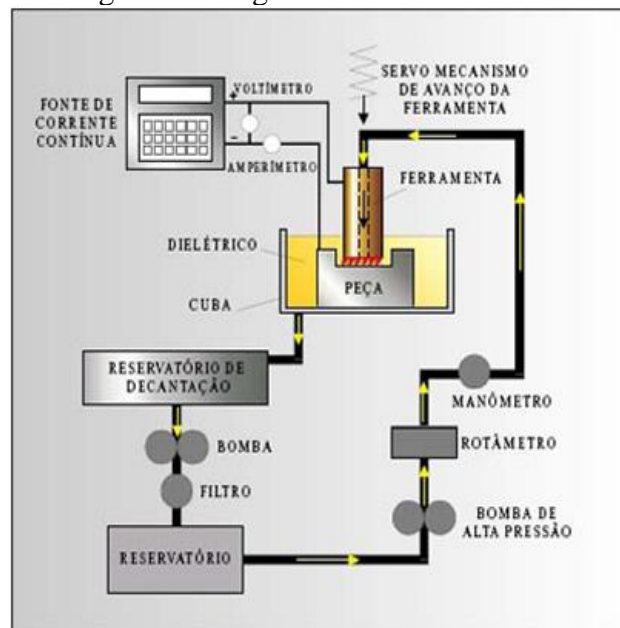
O EDM, é um processo termoelétrico de usinagem não convencional, em que ocorrem descargas elétricas entre dois eletrodos imersos em um fluido dielétrico, promovendo aquecimento, vaporização e remoção de material. No EDM, não há forças físicas de corte entre a ferramenta a ser utilizada, que é o eletrodo, e a peça de trabalho, visto que, não existe um contato direto, evitando tensões mecânicas e vibrações durante a usinagem conforme relatado por Kunieda et al. (2005). Por esse motivo, o EDM é amplamente aplicado para usinar formas muito complexas com alta precisão em materiais duros.

Tem como as principais vantagens da sua utilização, as suas taxas de remoção de material menores do que os outros processos de usinagem convencionais e o bom acabamento de superfície.

Na usinagem por eletroerosão, a peça permanece submersa em um líquido (querosene, água deionizada, ou qualquer outro fluido adequado) e, portanto, há rápida dissipação do calor gerado no processo. A descarga elétrica acontece entre um anodo e um catodo, e é produzida por corrente contínua de pulsação controlada. A ferramenta a ser utilizada nesse processo é o eletrodo que, geralmente, fica conectado ao polo positivo, ou seja, o anodo. A peça a ser usinada, por sua vez, costuma ser conectada ao polo negativo, sendo esse portanto, o catodo. Porém, esta condição pode ser invertida dependendo do material a ser usinado.

Outra vantagem a se destacar neste processo, é a automatização das máquinas, que permite a obtenção de estreitos limites de tolerância. É possível um controle rigoroso da ação da ferramenta sobre a peça usinada, devido a um servomecanismo que reage rapidamente às pequenas variações de intensidade de corrente. Na figura 2, pode se ver o esboço de uma máquina que usina por EDM, e as partes que fazem a base do seu funcionamento.

Figura 2 - Diagrama do Processo EDM



Fonte: Arantes et. al (2003)

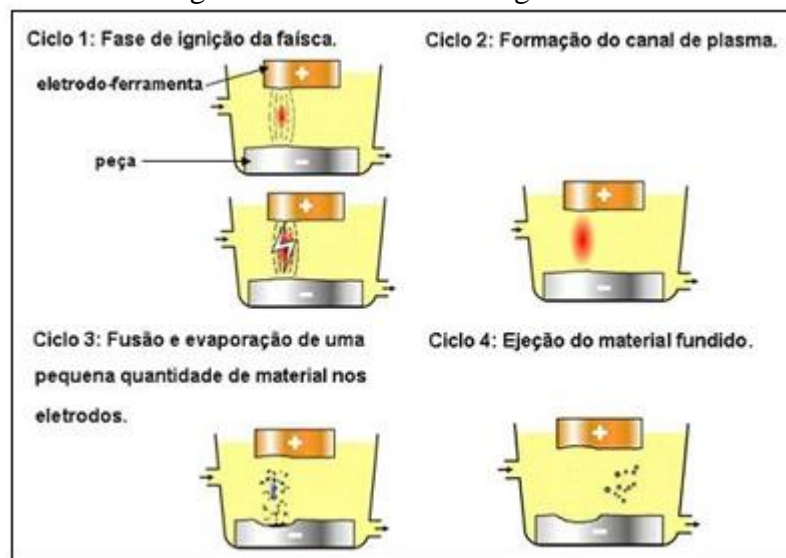
Dentre os elementos da máquina tem-se como principais elementos, uma fonte de corrente contínua, que gera e controla os pulsos, o servo mecanismo de avanço da ferramenta, que controla a velocidade e a precisão dos movimentos feitos por ela. Fora isso, tem a cuba, reservatório onde fica o fluido e ocorre a usinagem por eletroerosão, e os demais componentes responsáveis pelo reabastecimento do fluido para continuidade e conformidade do processo.

2.2.2 Mecanismo de remoção do material

De acordo com Kumar et.al (2009), o EDM utiliza energia elétrica para gerar a faísca elétrica. A remoção do material da peça de trabalho é feita através da energia térmica gerada pela faísca.

O arranque de cavaco se dá pelas descargas elétricas de alta frequência que provocam fusão e vaporização de materiais eletricamente condutores (EUBANK,1993). Portanto, é capaz de produzir furos, ranhuras e outras formas complexas que, pelos processos convencionais, seriam impossíveis de serem realizados. A teoria termoelétrica apresenta as melhores evidências explicativas do fenômeno de remoção de material por EDM, na qual cita que o ciclo de uma descarga elétrica entre dois eletrodos submersos num meio líquido de trabalho ocorre em quatro ciclos conforme pode se ver na Figura 3.

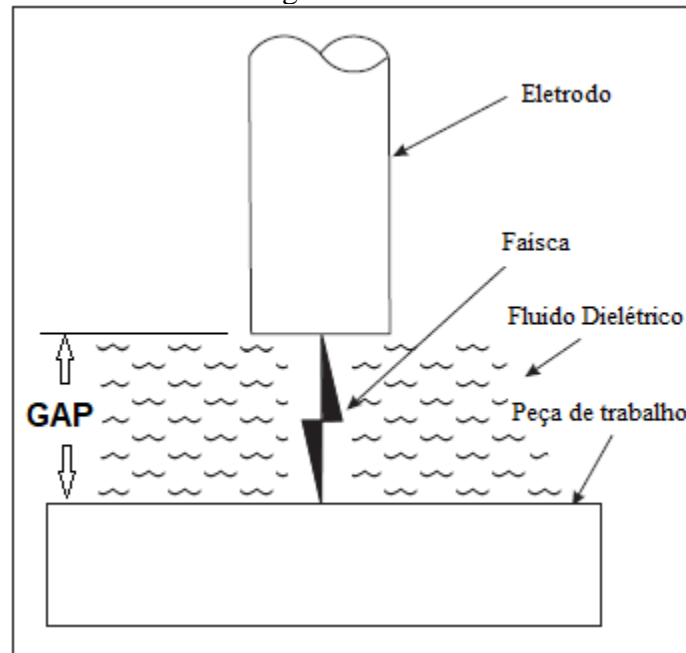
Figura 3 - Ciclos da Descarga Elétrica



Fonte: Cruz (1989), adaptado pelo autor

No primeiro ciclo, fase de ignição da faísca, o eletrodo se aproxima da peça, ambos energizados, fazendo com que ocorra a concentração do campo elétrico na fenda de trabalho, conhecida como GAP. Durante segundo ciclo, ocorre a formação do canal de plasma, ou seja, um canal ionizado entre o eletrodo e a peça. Já no terceiro ciclo, se inicia a fusão e evaporação de uma quantidade de material em ambos. Com a interrupção da centelha, o material da peça se funde localmente e se desintegra. Por ser um material mais duro, o eletrodo se desgasta de forma bem menor que a peça. Por fim, no último ciclo ocorre a ejeção do material fundido, através da retirada das partículas metálicas pelo fluxo do dielétrico.

Figura 4 - GAP



Fonte: Jameson (2001), adaptado pelo autor

O GAP, que também é chamado de lacuna de descarga, mostrado na Figura 4 e citado no primeiro ciclo é uma lacuna adequada para gerar as faíscas entre o eletrodo ferramenta e o eletrodo peça. No EDM, a tensão fornecida é de aproximadamente 50 a 300 volts, porque uma tensão mais alta não é adequada para usinagem de alta precisão. De acordo com Wong (2003), o GAP de descarga do EDM é de cerca de 0,005 - 1,0 mm. Se a ferramenta e a peça se tocarem, ou seja, $GAP = 0$, a usinagem não acontece.

O tamanho do GAP pode determinar a rugosidade da superfície da peça. Com um GAP alto, o tempo de usinagem é menor, mas a rugosidade é maior. Já um GAP mais baixo implica maior tempo de usinagem e menor rugosidade de superfície. As partículas fundidas, desintegradas na forma de minúsculas esferas, são removidas da região por um sistema de limpeza e no seu lugar, fica uma pequena cratera.

As descargas elétricas ocorrem quando o GAP atinge uma distância suficiente para romper as propriedades resistivas do fluido, e permitir que as faíscas elétricas deixem o eletrodo carregado (ânodo) e atinjam a peça (cátodo). Neste ponto, o fluido dielétrico não é mais um isolador elétrico, mas um condutor elétrico. Ao aumentar a intensidade da corrente, os elétrons passam pela coluna de plasma e formam a faísca elétrica. À medida que a faísca ocorre, a pequena porção da peça de trabalho é aquecida acima da sua temperatura de fusão. Depois de cada ignição, o dielétrico precisa de um tempo para descarregar e estar pronto para a próxima faísca (JAMESON, 2001).

Estima-se que a temperatura da centelha gerada pela EDM é de cerca de 6000 graus centígrados. Quando ocorrem faíscas entre o eletrodo e a peça, o ponto de faísca é dissolvido a

quente. A duração da centelha é ajustada entre 1 / 1.000.000 de segundo e 1 / 1.000 de segundo, e a duração mais longa torna a dissolução maior.

O raio da centelha é geralmente muito pequeno (100–200 μm), no entanto, a densidade da energia da centelha é muito alta; portanto, o material do eletrodo derrete e vaporiza na área localizada. As crateras formadas desta maneira se espalham por toda a superfície da peça de trabalho sob a ferramenta. A cavidade produzida na peça de trabalho é praticamente a réplica da ferramenta.

O EDM move os eletrodos de forma minuciosa, dependendo do progresso da usinagem, e ajusta a posição do eletrodo para tornar o espaço de descarga adequado para faíscas. A gama de faíscas geradas em cada frequência situa-se entre 2,000 e 500000 faíscas (JAMESON, 2001). Esse controle que mantém a folga de descarga adequada é feito pelo servo mecanismo mostrado acima na Figura 1.

Quando se trata de EDM, a precisão dimensional é fundamental, visto que a maioria dos trabalhos são componentes de tolerância estreitas utilizados para confecção de produtos como ferramentas, matrizes e moldes para serviços de prensagem, moldagem de plástico e de fundição.

2.2.3 Importância dos parâmetros

A eficiência de um processo é analisada a partir do resultado da taxa de remoção de material, do desgaste que o eletrodo sofre durante o processo e da qualidade superficial obtida (MARAFONA, 2011). Abaixo são apresentados alguns parâmetros do EDM, influentes no desempenho e no resultado do processo.

Segundo Drodza (1998), o eletrodo ferramenta é o parâmetro pelo qual a energia elétrica é transportada para o eletrodo-peça e que o material empregado na sua construção influencia diretamente no resultado do transporte da energia. A forma do eletrodo-ferramenta estabelece um modelo no eletrodo-peça através das faíscas elétricas que ocorrem durante o processo.

A seleção do material é muito importante não só do ponto de vista tecnológico, mas também econômico. Os materiais utilizados para a produção de eletrodos precisam de propriedades que ajudem a ocorrer a descarga, resistindo ao mesmo tempo à erosão que o processo origina no material a ser usinado (MARAFONA,2011).

As propriedades mais analisadas para saber se o material está apto a ser utilizado como eletrodo são a condutividade elétrica, a sua resistência a erosão, o seu ponto de fusão e sua integridade estrutural (AMORIN; WEINGAERTNER, 2002).

A condutividade térmica do eletrodo peça tem grande influência, uma vez que um material com maior condutividade térmica tem a capacidade de conduzir rapidamente o calor, afastando o aquecimento da região e reduzindo assim a tendência para a formação de trincas. A eletroerosão de cerâmicas tem sido muito utilizada pela sua condutividade e está sendo bastante aceita nas indústrias devido aos custos e suas características competitivas. Outra opção bastante aceita é os compósitos modernos desenvolvidos de diferentes materiais. Junto ao calor específico, dão alta capacidade de refrigeração preservando a integridade da estrutura metalúrgica do material da peça durante a operação.

Quanto maior o calor específico, mais energia térmica pode acumular sem grande aumento na temperatura, o que aumenta o rendimento do processo e aumenta a vida do fluido dielétrico. O elevado crescimento da temperatura aumenta a difusão de átomos da peça para o fluido e vice-versa, o que pode causar alterações significativas na estrutura do material usinado, além do aparecimento de uma maior quantidade de micro trincas causadas pelo calor excessivo.

Durante o processo EDM a tensão é influenciada principalmente pelos materiais do eletrodo e a peça, onde é responsável pela ionização do fluido, no qual se forma o GAP. Uma tensão alta faz com que a energia fornecida por descarga seja maior, e aumente também a taxa de material. Entretanto, uma tensão elevada, resulta numa superfície com crateras de grandes dimensões e irregulares, perdendo na qualidade superficial.

A Taxa de Remoção de Material (TRM) tem sido uma das principais preocupações do processo. O TRM é expresso como o peso do material removido da peça de trabalho ao longo de um período de tempo de usinagem. Muitos pesquisadores têm tentado desenvolver modelos empíricos para estima-lo. O TRM depende da quantidade de corrente pulsada em cada descarga, a frequência da descarga, de material da ferramenta, material de peça, polaridade, e estado de inundação dielétrico. (DAVE; DESAI; RAVAL,2012).

A remoção de material ocorre tanto material da ferramenta e peça de trabalho. De acordo com Jabbaripour et al. (2012), os materiais com baixo ponto de fusão possuem uma elevada taxa de remoção de material e, conseqüentemente, o acabamento da superfície inferior. Para Gostimirovic, et. al. (2012), na prática, a corrente de descarga e a duração de pulso são os principais fatores de influência na quantidade de material removido, assim a maior parte da energia de descarga do processo é utilizada refundindo partículas que não foram expulsas da cavidade erodida, o que afeta diretamente a produtividade da eletroerosão. A duração do tempo

que a corrente é deixada fluir por ciclo é definida por impulsos de tempo. A remoção de material é proporcional à quantidade de energia aplicada durante este tempo.

Corrente de descarga é a corrente permitida por ciclo e é diretamente proporcional à taxa de remoção de material. De acordo com Khan (2008), maiores correntes removerão maiores quantidades de material da peça porém a quantidade de material removido do eletrodo também será maior. A corrente de descarga consumida é de extrema importância na qualidade e no rendimento da operação e é selecionada dependendo da rugosidade esperada, do desgaste máximo do eletrodo permitido, da velocidade e das condições do GAP e a da área de contato entre o eletrodo e a peça.

Valores elevados de intensidade de corrente e longos períodos no qual ocorre a descarga produzem superfícies com um elevado grau de rugosidade. A partir disto, os melhores acabamentos superficiais são obtidos através da escolha de valores de intensidade de corrente mais baixos e durações mais curtas no período de descarga (LEE; LI,2001).

O período de pausa é definido pela duração do tempo entre a ocorrência de faíscas. É necessário para que ocorra a correta desionização do canal de descarga. Este tempo permite que o material fundido a solidifique e seja levado para fora da fenda de arco. Este parâmetro influencia na velocidade e a estabilidade do corte e conseqüentemente na degradação do desempenho EDM. Quando é muito curto, causa instabilidade nas faíscas. Valores mais elevados de impulsos fora de tempo tendem a melhorar a rugosidade da superfície.

Outro item a destacar é a polaridade. Conforme relatado por Guitrau (1997), a polaridade pode afetar a velocidade, desgaste, acabamento e estabilidade do processo. A polaridade positiva, que é quando o eletrodo ferramenta está no polo positivo e a peça no polo negativo, usina de forma mais lenta que a polaridade negativa e tem a superfície originada, constituída por uma camada de crateras de estrutura irregular, porém protege mais o eletrodo em relação ao desgaste. A polaridade negativa é usada para remoção de material em alta velocidade.

A frequência de descargas elétricas ou a energia por descarga controlam a velocidade de remoção de material. A velocidade de remoção e a rugosidade da superfície aumentam com o aumento da densidade de corrente e diminuição da frequência. O aumento da densidade de corrente implica, porém, num maior desgaste do eletrodo, comprometendo a tolerância dimensional da peça produzida. (ABBAS; SOLOMON; BAHARI, 2007).

O fluido tem como principal propósito, fornecer o meio dielétrico e a lavagem para fora dos detritos de usinagem da mesa de trabalho (MASUZAWA, 1983). O fluido dielétrico é o parâmetro relacionado a controlar a potência de abertura da descarga, promove a limpeza da

interface ferramenta-peça e auxilia no arrefecimento do sistema, nas vizinhanças das descargas (FULLER,1996). Também influencia no controle e na origem de fenômenos no processo e no produto, dentre eles a reação química superficial, a densidade de energia, a tensão residual e alteração das propriedades mecânicas superficiais.

Os diversos fluidos dielétricos utilizados possibilitam diferentes condições de usinagem e muito pouco se sabe sobre qual o fluido mais indicado para operações de acabamento ou desbaste. O fluido pode ser hidrocarboneto aditivado derivado do petróleo, água deionizada, e até mesmo certas soluções aquosas. Segundo estudo feito por Arantes(2003), o querosene, apesar de ser até três vezes mais barato que os demais fluidos, apresenta piores acabamentos superficiais com grande formação de bolhas durante o processo, pois sua menor densidade confere também excessiva evaporação durante a usinagem, o que acaba por conferir uma superfície muito irregular e com muita porosidade e presença de micro trincas, além de maiores riscos ao operador.

Os fluidos dielétricos especificamente desenvolvidos para o processo EDM são óleos hidrocarbonetos altamente refinados ou sintéticos. Dentre as propriedades dos fluidos, destacam-se o tempo de desionização, a viscosidade, o ponto de ebulição e a resistividade elétrica.

Quanto menor o tempo de desionização, que é o tempo para os íons e elétrons se recombinarem depois de uma descarga, menor é o tempo necessário entre pulsos subsequentes que evitam as condições de arco (ARANTES, 2001).

A viscosidade está vinculada a resistência ao escoamento do fluido. Quanto menor for a viscosidade melhores serão as características de escoamento. Porém, a alta viscosidade pode proporcionar bom desempenho em alguns tipos de operações de desbaste.

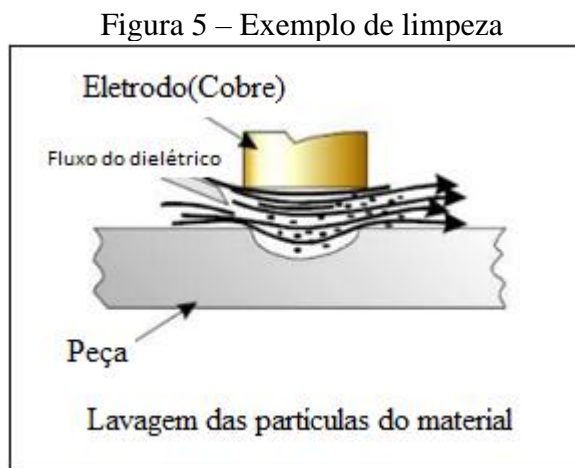
Já o ponto de ebulição, quanto maior for, mais estável se mantém o fluido em temperaturas elevadas sem perder suas propriedades originais, perdendo frações menores de componentes pela evaporação seletiva das frações mais voláteis.

A resistividade dielétrica é uma medida da capacidade de isolamento de um fluido. Uma maior rigidez dielétrica requer menor distância entre a ferramenta e a peça, com o consequente aumento da precisão na usinagem.

Outro fator que tem uma importância relevante na escolha, é o quanto o fluido é nocivo à saúde do operador. Com leis cada vez mais rigorosas na legislação trabalhista e ambiental, este quesito tem sido muito considerado.

Como citado acima, uma das funções do fluido dielétrico é a lavagem para fora, dos detritos de usinagem da mesa de trabalho, e essa limpeza acontece sob pressão ou com sucção.

Essa limpeza tem uma influência considerável nos valores de desgaste e das taxas de remoção. A vazão e a pressão que entram no processo devem ser adequadas conforme o trabalho executado (KLOCKE; KÖNIG, 2007). Uma lavagem inadequada permite que as partículas de metais e os resíduos de carbono, resultantes do fracionamento do fluido dielétrico, se acumulem na interface ferramenta peça, influenciando no acabamento superficial. Quando não há um orifício no eletrodo ou na peça, recomenda-se a utilização de bicos de injeção, que garantam a limpeza de toda a superfície de trabalho. Este tipo de limpeza é denominado de limpeza por jato lateral.



2.2.4 Fatores influentes e a qualidade no acabamento superficial

Esse processo garante a produção de superfícies de alta qualidade, praticamente sem distorções e sem alterações microestruturais, já os processos tradicionais de usinagem geram calor e tensões na superfície usinada, produzem enormes cavacos e afetam as características estruturais da peça.

Atualmente, o EDM é um dos processos de usinagem mais popular, e tem uma ampla gama de aplicações em indústrias de automóvel, aeroespacial, de defesa e de engenharia de precisão. Portanto o entendimento do processo e o controle de seus parâmetros é de fundamental importância para a obtenção da geometria, acabamento e propriedades do produto final. Um estudo feito por Jamwal et. al (2018) concluiu que os desenvolvimentos e as técnicas de otimização utilizados no EDM visam sempre minimizar a taxa de desgaste da ferramenta, maximizar a taxa de remoção de material e melhorar a qualidade da superfície.

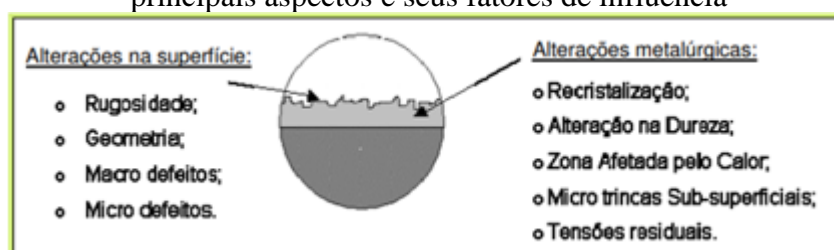
Nos últimos anos, muitos estudos têm sido feitos para melhorar o processo de EDM. A utilização de novos materiais para a produção de ferramentas de moldagem por injeção, como ligas de alumínio de alta resistência e ligas à base de cobre, representa fontes potenciais de

redução de custos do processo. Embora, no caso das ligas de cobre, seu preço de compra seja bem elevado ao dos aços tradicionais, a relação custo-benefício geral do processo é aumentada, porque o número de disparos possíveis é triplicado. Com essas novas aplicações, muitas lacunas ainda não foram explicadas. É realmente um campo muito vasto e é composto por várias áreas de pesquisa. No artigo publicado por Daniel e Calvo (2019) sobre os parâmetros de usinagem de EDM em relação a rugosidade, dois materiais distintos, um de fácil e outro de difícil usinabilidade, mostraram comportamento diferentes na sua superfície. O alumínio teve uma melhor rugosidade com valores elevados de corrente. No caso do aço, teve melhor controle sobre a rugosidade com valores elevados na tensão.

O entendimento do GAP, por exemplo, mesmo no estado estacionário, continua a ser um problema difícil. Também são assuntos de investigação os materiais, as variações do EDM, a automação do processo e a fabricação dos eletrodos. Nas últimas décadas um material muito bem aceito no processo é a cerâmica. Os materiais cerâmicos tem uma ótima resistência, porém é um material difícil de alcançar um bom acabamento superficial. Nos últimos anos, o desenvolvimento de cerâmicas condutoras teve muita atenção prestada pelas investigações recentes para alcançar os bons índices de acabamento superficial. As principais buscas por novos eletrodos para melhorar o desempenho de EDM tem sido com materiais para ferramentas diferentes, como o cobre, o carboneto de tungstênio, tungstênio de cobre, alumínio e também à base de compósitos. Devido a melhores propriedades como dureza, resistência à tração e resistência ao desgaste, é difícil de usar estes materiais com os processos de usinagem convencional e com o EDM se consegue também um bom acabamento superficial. Os compósitos são amplamente utilizados em ferramentas de corte atualmente. Esse desenvolvimento recente nos materiais para ferramentas e seleção das condições de usinagem otimizada levou a taxas muito baixas de desgaste da ferramenta. Densidade e ponto de fusão do material da ferramenta devem ser altos a fim de evitar o desgaste e a imprecisão de ferramenta.

Ao usar do processo de EDM deve-se observar dois aspectos importantes. As irregularidades geométricas da superfície e as alterações metalúrgicas da superfície e da camada sub superficial. A figura demonstra estes dois principais aspectos e seus fatores de influência.

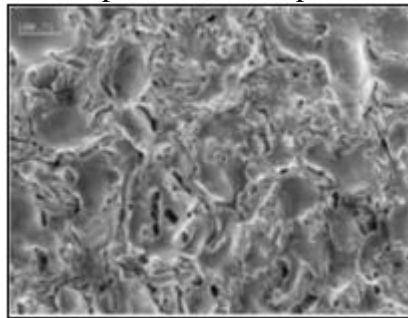
Figura 6 - Imagem com representação de uma superfície usinada por EDM demonstrando os principais aspectos e seus fatores de influência



Fonte: Lima e Corrêa (2006)

Sobre as alterações na superfície, destaca-se a rugosidade, que são irregularidades inerentes apresentadas na superfície após a realização de uma usinagem. A rugosidade é um parâmetro com grande influência na funcionalidade e comportamento dos componentes em diversas aplicações, sendo por isso uma das variáveis para se ter controle da qualidade superficial. Segundo Santos (2010), a rugosidade pode ser definida como conjunto de desvios micro geométricos, caracterizado pelas pequenas saliências presentes em uma superfície. A Figura 7 mostra um exemplo de superfície obtida no processo EDM.

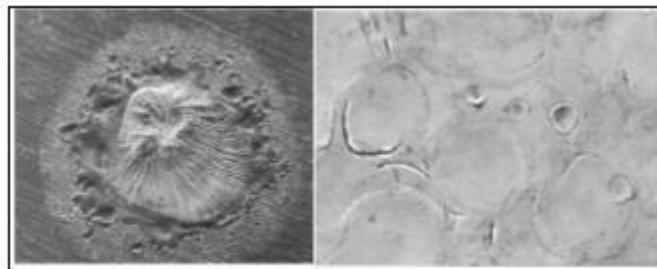
Figura 7 – Superfície obtida por eletroerosão



Fonte: Kern (2009)

O grau da rugosidade depende do tamanho das crateras, dependendo o tamanho destas da energia utilizada durante a descarga. A energia fornecida ao sistema é dependente dos parâmetros utilizados, sendo por isso a sua escolha estabelecida em função da qualidade superficial pretendida (MARAFONA,2011). A Figura 8 mostra alguns tipos de crateras resultantes do processo EDM.

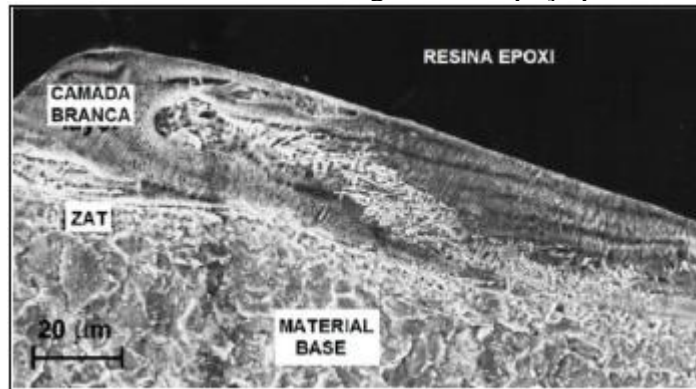
Figura 8 – Tipos de crateras do processo EDM



Fonte: Sánchez et al. (2006)

A característica de elevado aquecimento localizado no EDM, seguido de resfriamento rápido pelo fluido dielétrico é responsável por modificações metalúrgicas importantes na superfície do ferramental, independentemente do tipo de aço-ferramenta em uso.

Figura 9 - Camadas características geradas na peça pela eletroerosão



Fonte: Zeilmann et. al (2011)

Segundo Zeilmann, et. al. (2011), essas alterações comprometem a integridade superficial do material, diminuindo a vida útil da peça. Devido ao EDM, as superfícies apresentam regiões características, das quais pode-se destacar a camada fundida e solidificada novamente, ou camada branca, a zona afetada termicamente e o material de base não afetado termicamente como mostra a Figura 9.

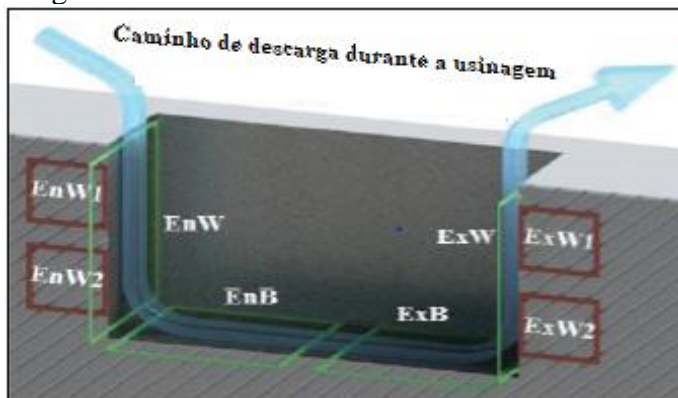
A camada branca é a região mais superficial, característica do material que foi fundido durante o processo, não foi expelido pelo fluxo do dielétrico, e se depositou na cavidade, se solidificando novamente. A liberação de carbono pelo eletrodo de grafite ou fluido dielétrico pode resultar em um aumento de teor de carbono nessa área, dando origem a novas mudanças na dureza, além daquelas sofridas pelas transformações de fase devido ao resfriamento rápido. Como a camada branca é a mais exposta ao meio ambiente, ela influencia grandemente as propriedades da superfície da peça. Diversos autores observaram a presença de microfissuras e altas tensões residuais geradas pelo alto gradiente térmico na superfície usinada por eletroerosão. É influenciada principalmente pelo tempo de duração do pulso, que quanto maior sua duração, resulta em camadas brancas mais espessas. No caso dos aços, a camada branca é composta essencialmente por estruturas dendríticas de cementite (BLEYS et al.,2006).

A zona afetada termicamente é caracterizada pela presença de martensita grosseira. Consiste no material que não fundiu, porém aqueceu e resfriou rapidamente ao longo do processo. Fica localizada abaixo da camada branca. Essa camada possui características distintas do material base e também da camada branca (CUSANELLI,2003). Essas variações microestruturais na superfície, provocadas pela EDM, podem ser as causadoras de trincas. No caso dos aços é possível identificar, na ZTA, uma região temperada e revenida.

Em um estudo feito por Ivanisk et. al. (2015), no qual foi avaliada a integridade do material após usinar cavidades quadradas com parâmetros diferentes, algumas investigações foram feitas através de análises de micro dureza, textura, rugosidade e camada afetada. O trabalho consistia na descarga lateral unilateral, utilizando um eletrodo quadrado de cobre

C11000 *Electrolytic Tough* (ET) com dimensões de 14mm. Nos resultados obtidos, foram mostradas variações na espessura da camada afetada em diferentes posições e alterações na usinagem ao longo da lavagem. Também se notou uma dureza maior na parte mais profunda da cavidade.

Figura 10- Fluxo do dielétrico na cavidade erodida



Fonte: Ivaniski et. al (2015)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada na elaboração da proposta de análise da qualidade superficial de peças erodidas com ferramenta retangular e lavagem unilateral, no sentido transversal e no sentido ortogonal à face de trabalho do eletrodo, a fim de obter resultados que trouxessem contribuições e conclusões ao estudo de EDM. Esse estudo deu continuidade ao trabalho de pesquisa relatado no artigo de Ivanisk et. al. (2015), também citado no capítulo anterior, porém, agora com a variação no formato do eletrodo, que é retangular, e com variação no sentido do fluxo de lavagem unilateral. O processo de desenvolvimento foi de acordo com a Figura 11, que apresenta o fluxograma de atividades.

Figura 11 – Fluxograma de atividades

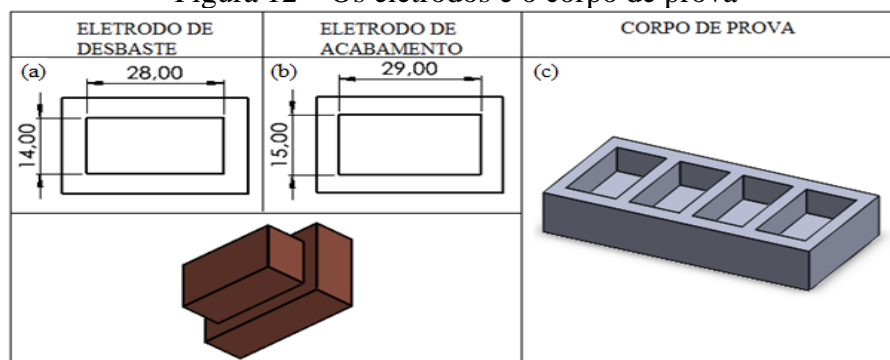


Fonte: o autor (2020).

3.1 MATERIAIS

A Figura 12 mostra os tipos de eletrodos e o corpo de prova que foram utilizados. Os eletrodos foram confeccionados em cobre C11000 Electrolytic Tough (ET), que é conhecido por sua alta condutividade elétrica e térmica, boa resistência à corrosão e soldabilidade. O eletrodo de desbaste (Figura 12.a) teve as dimensões de 14mm x 28 mm na face de trabalho. Já o eletrodo de acabamento (Figura 12.b) teve as dimensões de 15mm x 29mm na face. O corpo de prova (Figura.12.c), no qual foram feitas todas as cavidades, é do material AISI P20 com dimensão de 40 mm x 80mm, com dureza de 33HRc.

Figura 12 – Os eletrodos e o corpo de prova



Fonte: o autor (2020).

3.2 PARÂMETROS E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

A máquina utilizada para a usinagem foi a Engemaq de modelo EDM 440 NC, do laboratório da Universidade de Caxias do Sul.

Figura 13 - Engemaq de modelo EDM 440 NC



Fonte: o autor (2020).

O fluido dielétrico foi o óleo mineral Microcorte 102-A, no qual o corpo de prova foi submerso. A lavagem foi com um bico externo com dimensões de 25mm x 1mm com uma pressão de 0,5 Mpa.

Figura 14 – Processo EDM com fluxo no sentido longitudinal



Fonte: O autor (2020)

O ensaio ocorreu em duas condições, sendo feita duas cavidades para cada uma delas. Todas as cavidades tiveram duas etapas, que são o desbaste e acabamento como mostra a Tabela 1.

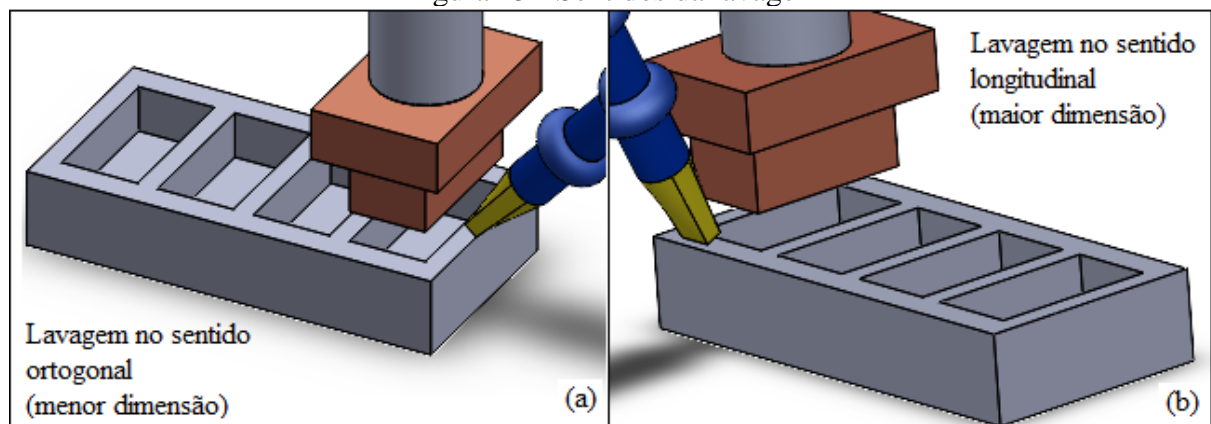
Tabela 1 – Condições de operação

Etapa	Operação	Dimensão Eletrodo	Profundidade	Polaridade	Recuo entre os ciclos
1°	Desbaste	14mm x 28mm	8mm	Positiva	2mm
2°	Acabamento	15mm x 29mm	9mm	Positiva	2mm

Fonte: o autor (2020).

Na Figura 15 é mostrado os dois sentidos de lavagem. Na primeira condição, o fluxo de lavagem é no sentido ortogonal da peça de trabalho e o fluido bombeado no sentido da menor dimensão do eletrodo (Figura 15.a). Já na segunda condição, o fluxo de lavagem é no sentido longitudinal da peça de trabalho e o fluido é bombeado no sentido da maior dimensão do eletrodo (Figura 15.b). Em ambos os sentidos, o bico de lavagem ficou posicionado 30° em relação a superfície usinada.

Figura 15 - Sentidos da lavagem



Fonte: o autor (2020)

Os parâmetros utilizados foram iguais aos do trabalho utilizado como base para o desenvolvimento da proposta e são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados

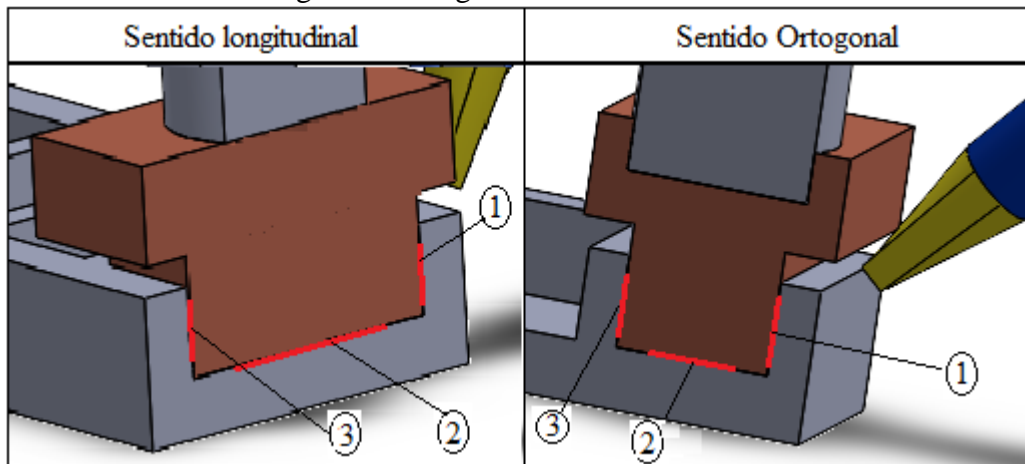
Operação	Densidade de Corrente TS (A)	Pulso de Descarga T _{ON} (μs)	Pausa Descarga DT (%)	Tempo de erosão (s)	Retorno Pós-ciclos
Desbaste	11	300	75	1	2
Acabamento	8	20	35	1	2

Fonte: O autor (2020)

Após a usinagem ser realizada, as cavidades foram cortadas nas condições dos sentidos citados acima, e embutidas. Posteriormente lixadas e por fim polidas em um pano especial. Depois disso, o corpo de prova foi utilizado como amostra para se analisar a imagem de textura,

utilizando o equipamento MIRA3 TESCAN FEG-SEM. Para visualização das amostras, foi feito ataque químico, usando Nital a 2%. Também foi feita a análise do acabamento, através da medição da superfície utilizando um testador de rugosidade da superfície Mitutoyo SJ-301. Foram três medições em cada região, analisando a rugosidade média (R_a), a altura média do pico ao vale ($R_z(\text{med})$) e a altura máxima do perfil (R_z). Os pontos analisados, foram escolhidos estrategicamente, visando obter a maior quantidade de dados possíveis, em regiões distintas. A Figura 16, que mostra cortes representativos nas duas condições de usinagem, especifica onde é realizada as inspeções. A região 1 é a região localizada do lado que está o jato de lavagem, e tende a ter menor temperatura. A região 2 é a do fundo da cavidade, que tende a ter maior dificuldade na remoção do material. E por fim, a região 3, é a que está do lado oposto ao jato e tende a ser a região de maior temperatura.

Figura 16 - Regiões a serem analisadas



Fonte: o autor (2020)

A partir dos resultados obtidos, verificou-se as condições de acabamento, com o objetivo de analisar a espessura e o comportamento do material refundido sobre a superfície na camada branca, na zona afetada termicamente e no material base como mostra a Figura 9, no capítulo anterior. Depois se observou, o possível aparecimento de micro trincas através das imagens de metalografia.

Todos os procedimentos foram realizados nos laboratórios de Ensaio de Materiais e de Usinagem da Universidade de Caxias do Sul.

4 RESULTADOS

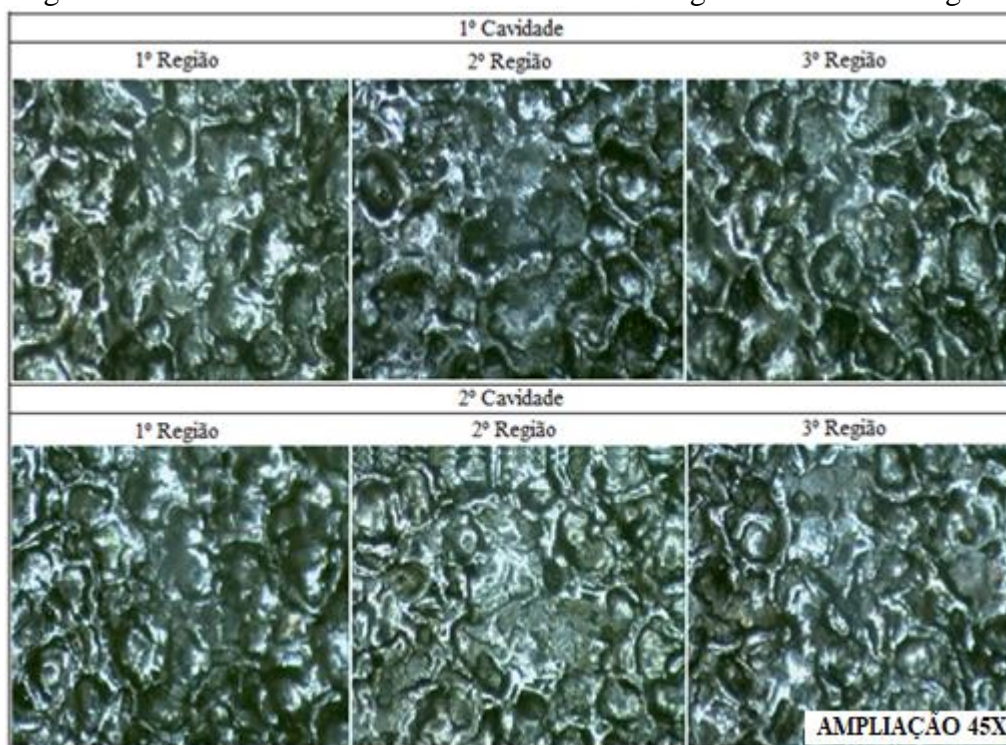
4.1 QUALIDADE SUPERFICIAL

4.1.1 Texturas

Durante o EDM, as sucessivas descargas geram o arranque do material fundido superaquecido, porém este não é removido na sua totalidade (MARAFONA,2011). De acordo com SABBO (2017), o material fundido que não é removido se deposita novamente sobre a superfície que está sendo usinada deixando uma forma característica típica de pequenas crateras que variam em função da energia fornecida ao sistema.

Na Figura 17, são apresentadas as imagens da textura das duas cavidades com as três regiões de análise, onde foi utilizado o fluxo de lavagem no sentido ortogonal da peça. As imagens foram feitas utilizando o microscópio estereoscópico com ampliação de 45 vezes.

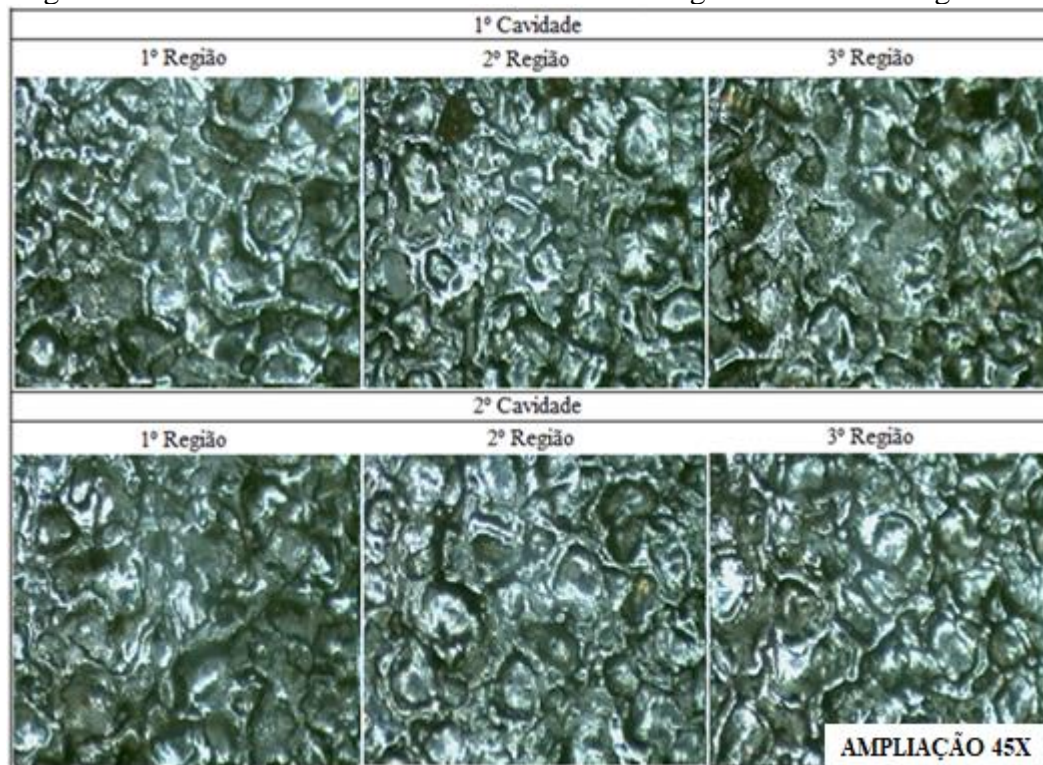
Figura 17 - Textura das cavidades com fluxo de lavagem no sentido ortogonal



Fonte: O autor (2020)

Na Figura 18, também são apresentadas as imagens da textura das duas cavidades com as três regiões de análise, porém estas com o fluxo de lavagem no sentido ortogonal da peça.

Figura 18 - Textura das cavidades com fluxo de lavagem no sentido longitudinal



Fonte: O autor (2020)

A superfície de uma peça fabricada através da eletroerosão apresenta pequenas crateras decorrentes da fusão que promove a remoção de material. Em decorrência das altas temperaturas e dos bruscos ciclos de aquecimento e resfriamento, há uma grande possibilidade de variação estrutural (SANTOS, 2010).

Analisando as texturas, não é notada uma diferença significativa no tamanho das crateras formadas tanto na condição em que o fluxo de lavagem é no sentido longitudinal, como no sentido ortogonal. Resultado este, que vai de encontro ao obtido nas medições de rugosidades, que também foram valores parecidos.

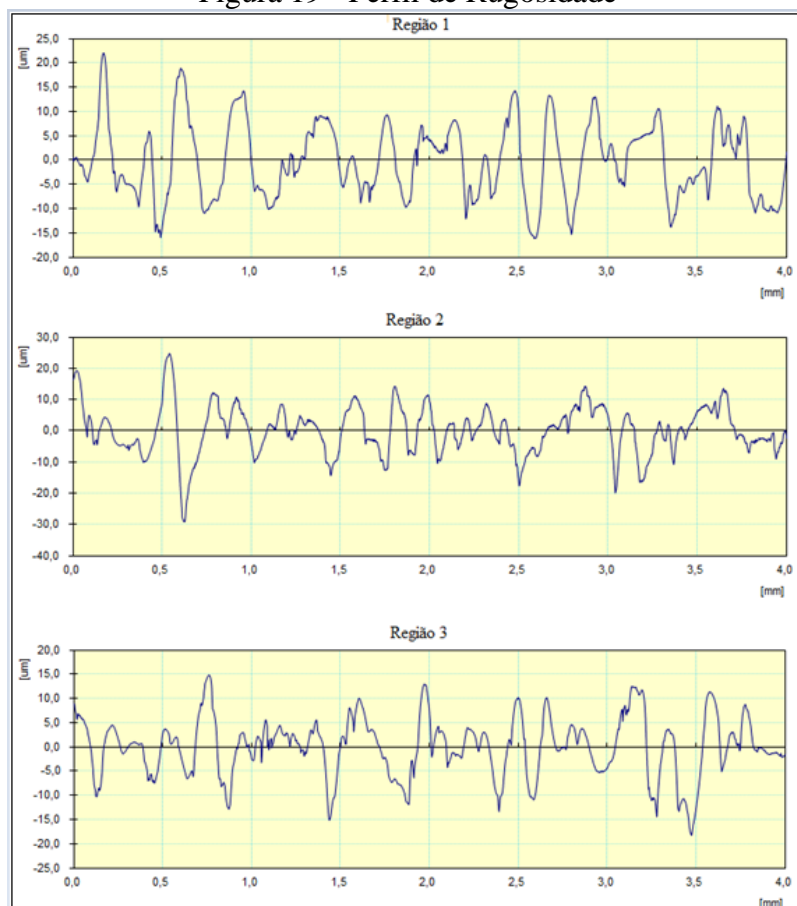
Segundo Field et al. (1989) as principais alterações na textura superficial, tais como marcas, poros e ondulações decorrem das altas temperaturas geradas durante o processo e de possíveis reações químicas na região usinada.

4.1.2 Rugosidade da peça

A rugosidade superficial da peça é o parâmetro de desempenho do processo que determina o acabamento final da peça, em função das variáveis de corte (CRUZ,1993). Como citado no capítulo anterior, foram avaliadas a rugosidade média (R_a), a altura média do pico ao

vale ($Rz(\text{med})$) e a altura máxima do perfil (Rz). A Figura 19 mostra um exemplo dos perfis de rugosidade obtidos.

Figura 19 - Perfil de Rugosidade



Fonte: LAMEC adaptado pelo autor (2020)

Na Figura 20 são apresentados os resultados das médias obtidas nas medições em cada cavidade usinada.

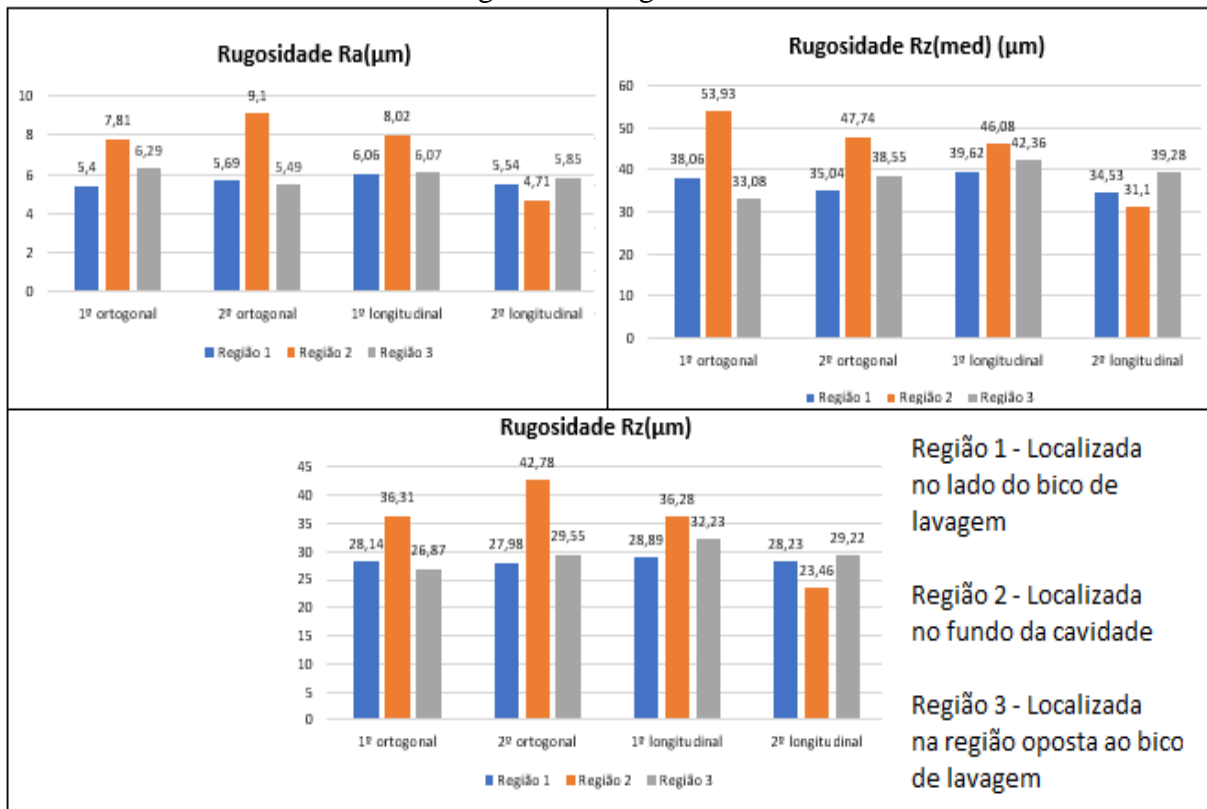
Figura 20 - Média de Rugosidades

Ra (μm)				
Cavidade	1º ortogonal	2º ortogonal	1º longitudinal	2º longitudinal
Região 1	5,4	5,69	6,06	5,54
Região 2	7,81	9,1	8,02	4,71
Região 3	6,29	5,49	6,07	5,85
Rz(med) (μm)				
Cavidade	1º ortogonal	2º ortogonal	1º longitudinal	2º longitudinal
Região 1	38,06	35,04	39,62	34,53
Região 2	53,93	47,74	46,08	31,1
Região 3	33,08	38,55	42,36	39,28
Rz (μm)				
Cavidade	1º ortogonal	2º ortogonal	1º longitudinal	2º longitudinal
Região 1	28,14	27,98	28,89	28,23
Região 2	36,31	42,78	36,28	23,46
Região 3	26,87	29,55	32,23	29,22

Fonte: O autor (2020)

Na Figura 21 pode se constatar, que os parâmetros tiveram o maior valor, na Região 2, localizada no fundo da cavidade em três casos, muito provavelmente, pela dificuldade de remover as impurezas e também pelo desgaste do eletrodo, visto que a profundidade e temperatura aumentavam. As temperaturas elevadas também propiciam a difusão do carbono na superfície da peça que é liberado pelo próprio dielétrico que por sua vez determina a extensão do canal de descarga e com isso a configuração da cratera (KLOCKE e KÖNIG, 2007).

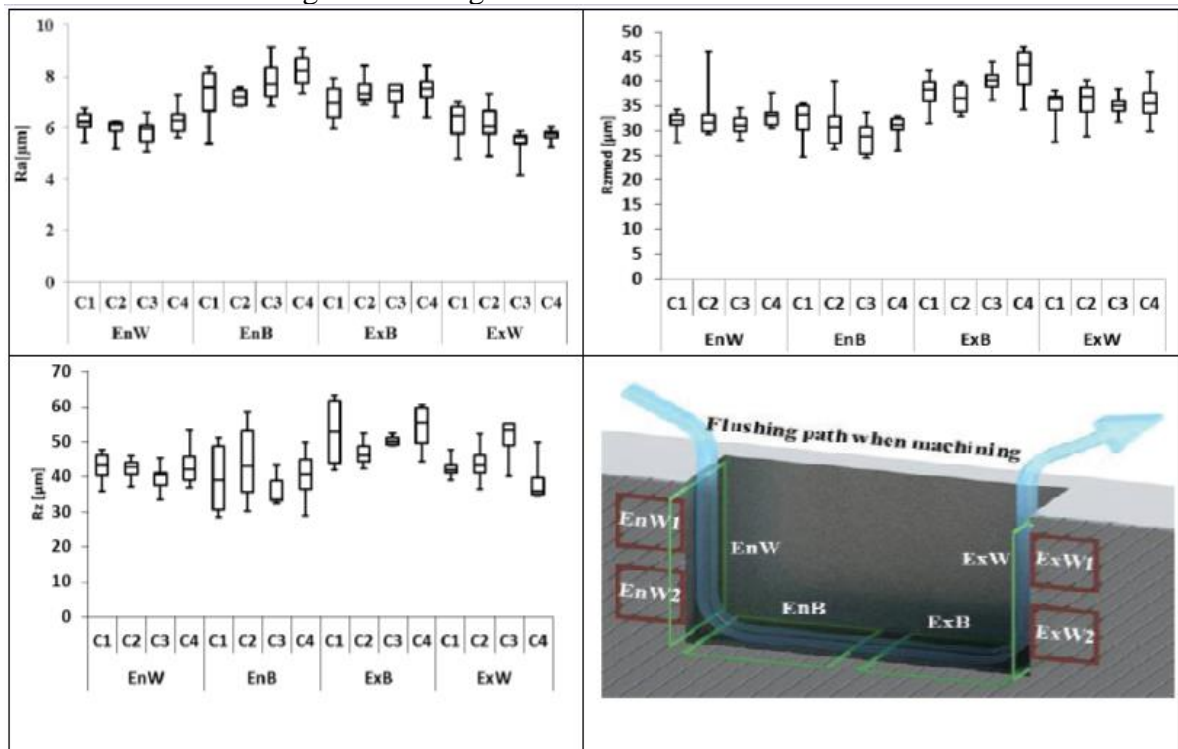
Figura 21 - Rugosidades



Fonte: o autor (2020).

Em ambas as condições, com a mudança no sentido de fluxo, não foi apresentada uma diferença significativa entre as cavidades em nenhuma das três rugosidades analisadas. Quando comparados aos resultados do trabalho utilizado como base para desenvolvimento, nota-se que a coincidência de que a região que teve os maiores valores de rugosidade foi a denominada Região 2, que fica no fundo da cavidade. A Figura 22, mostra as rugosidades encontradas no trabalho base, onde se pode analisar que os maiores valores estão nas regiões denominadas ali de EnB e ExB, localizadas no fundo da cavidade.

Figura 22 – Rugosidades obtidas no trabalho base

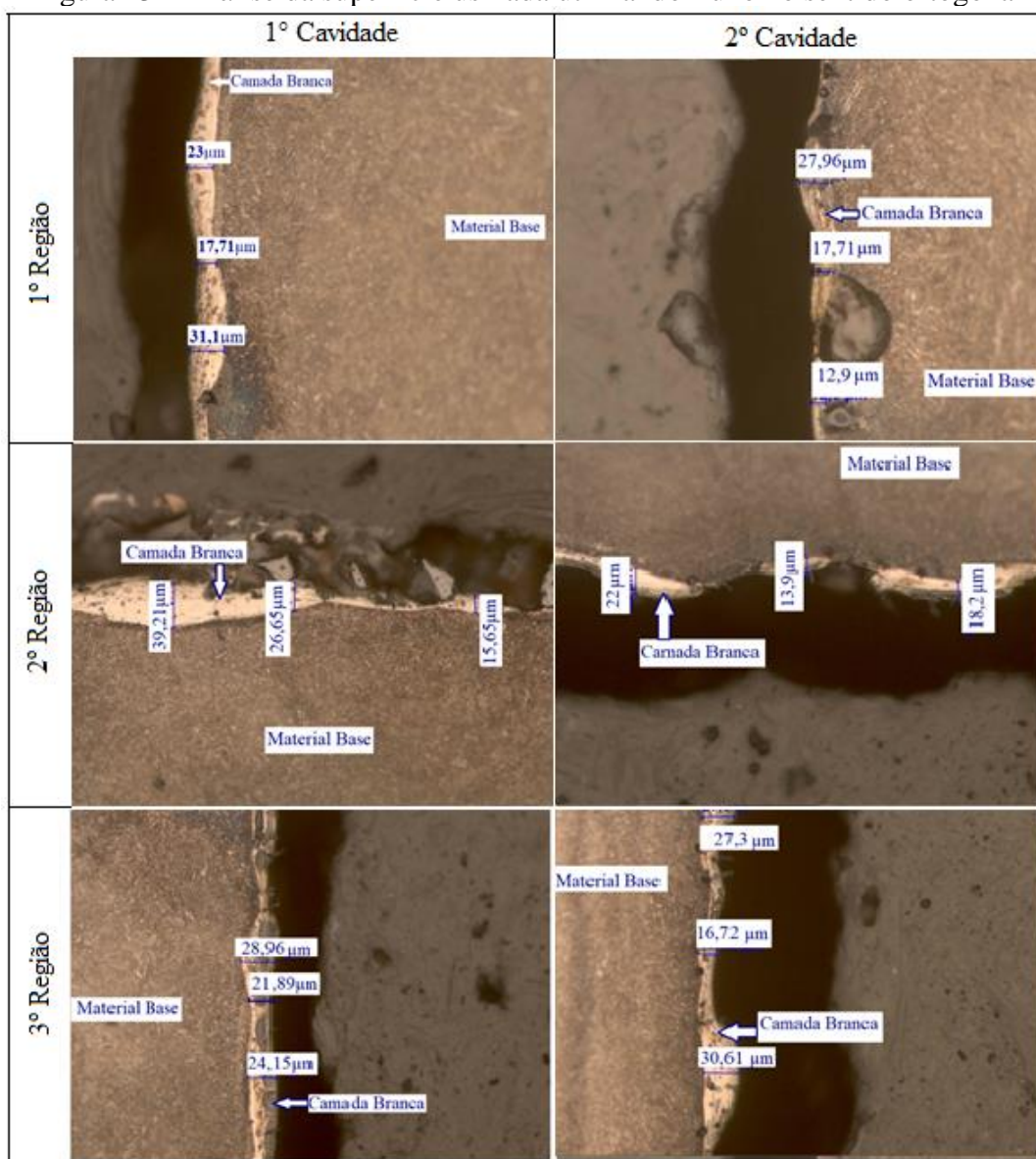


Fonte: Ivaniski et. al (2015)

4.1.3 Integridade (subsuperfície)

Realizando a análise das camadas subsuperficiais, nas três regiões das quatro cavidades, notou-se a formação da camada branca que é vista como alteração da superfície usinada, e que a sua composição química e propriedades físicas se diferenciam do material base. Segundo Lima et al. (2006), as descargas em altas temperaturas, formam uma espécie de multicamadas, caracterizada pela presença da camada branca e uma região afetada termicamente. Sabendo que a camada branca é formada por o material que sofre a fusão, e quando não evacuado, sofre o resfriamento se solidificando novamente na cavidade, não se nota uma diferença significativa em relação a mudança no sentido do fluxo. A Figura 23 mostra os valores das espessuras da camada branca de cada região nas duas cavidades em que o fluxo era no sentido ortogonal.

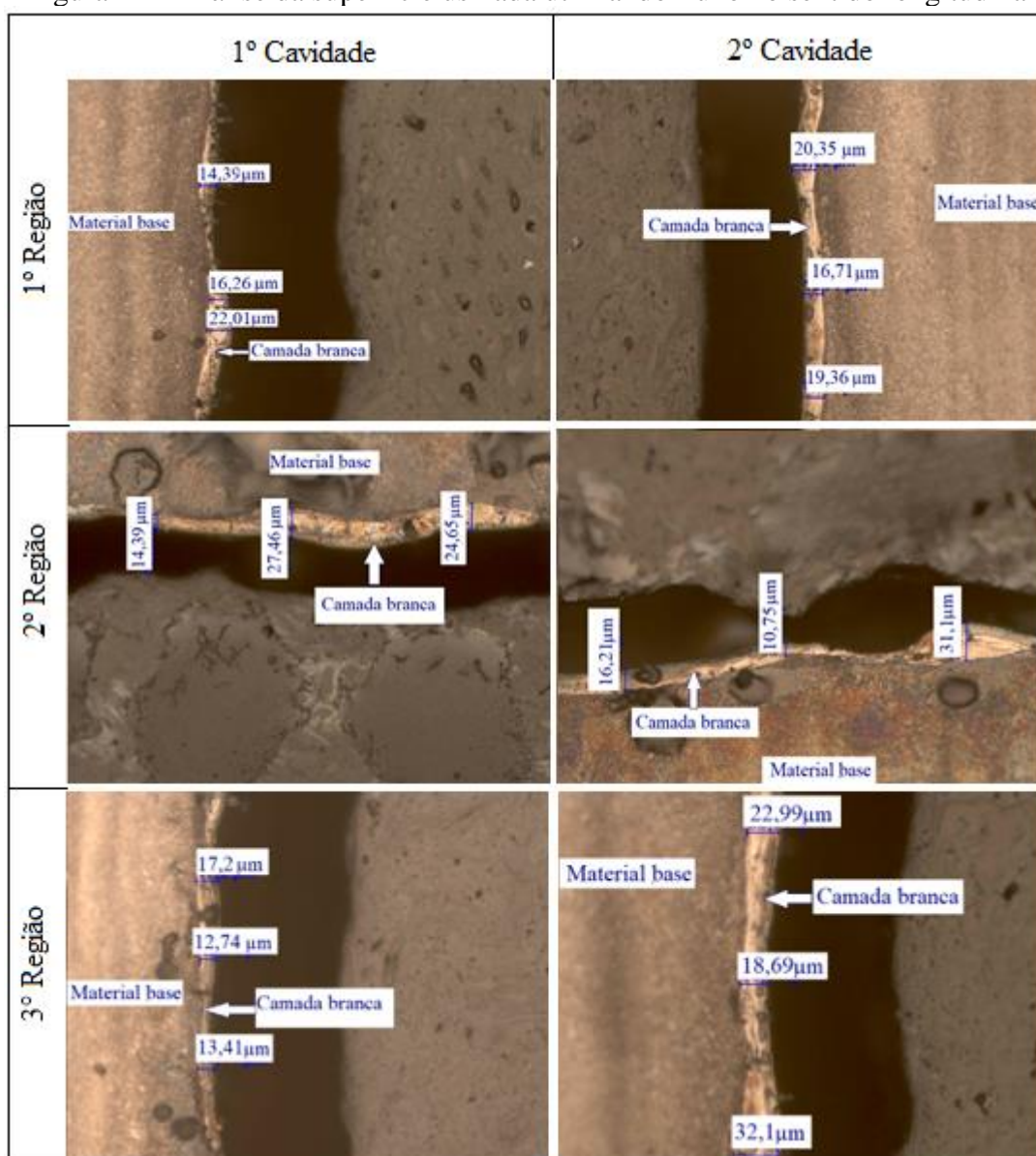
Figura 23 - Análise da superfície usinada utilizando fluxo no sentido ortogonal



Fonte: o autor (2020)

A Figura 24 mostra a camada branca de cada região nas duas cavidades em que o fluxo era no sentido longitudinal.

Figura 24 - Análise da superfície usinada utilizando fluxo no sentido longitudinal



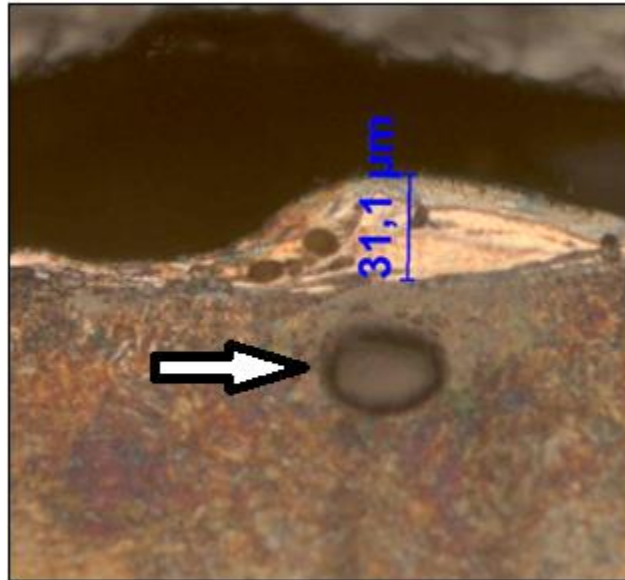
Fonte: O autor (2020)

Em ambos os sentidos, nota-se uma variação considerável ao longo da superfície, não havendo uma regularidade. No entanto, se levar em conta a média de espessura da camada encontrada nas regiões medidas em cada sentido de fluxo, nota-se que a variação é pequena entre os valores encontrados.

Em algumas regiões onde se notou a camada branca mais espessa, surgiram pequenos poros entre a zona térmica afetada e o material base, porém sem sinais de microfissuras ou de fragilização da região que pudesse ocasionar uma propagação de trincas. Conforme Lee et al. (2003), quanto mais severa a condição de usinagem, maior a probabilidade de surgir micro trincas, e a formação de trincas superficiais varia de acordo com o material utilizado e as

diferentes condutividades térmicas. Um exemplo é mostrado na Figura 25, que mostra um poro logo abaixo da camada branca.

Figura 25 – Poro existente abaixo a camada branca



Fonte: O autor (2020)

A espessura desta camada varia em função dos parâmetros utilizados e também em função do par de eletrodo e peça. A camada branca nem sempre é vista como uma camada a ser removida. Segundo Bleys (2006), a formação da camada controlada por parte do fluido dielétrico, pode melhorar o resultado da qualidade superficial. Ao fazer a análise qualitativa das cavidades, foi comprovado a existência da camada branca em todas as regiões, de forma não uniforme.

Os resultados encontrados nas texturas, nas rugosidades e na integridade das cavidades usinadas, foram similares aos obtidos no trabalho utilizado como base para dar continuidade a proposta. Nota-se que a diferença da geometria em relação aos eletrodos, pouco impactou em novas constatações. Nota-se, também, que a mudança de sentido no fluxo de lavagem tem uma influência bem menor do que parâmetros mais técnicos como, por exemplo, a corrente elétrica utilizada, enfim, fatores que se relacionam diretamente com a energia fornecida pelo sistema. Como já referido no capítulo 2, segundo Marafona (2011) a energia fornecida é dependente dos parâmetros utilizados.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, observou-se os efeitos após variação no sentido do fluxo de lavagem do fluido dielétrico durante o processo de usinagem de eletroerosão, onde o foco foi avaliar a relação entre o sentido do fluxo de lavagem e a qualidade superficial das cavidades.

Analisando as duas diferentes condições realizadas, pouca diferença no resultado foi notada.

As texturas encontradas nas superfícies em ambas as condições foram bem semelhantes, visto que os parâmetros eram os mesmos, e a geometria que era retangular, não teve uma variação dimensional suficiente, para surgir diferenças significativas.

Analisando a rugosidade do aço P20 onde foram usinadas as cavidades, através dos parâmetros Ra, Rz(med) e Rz, notou-se um resultado que foi de encontro ao observado nas texturas, pois se elas eram semelhantes, sendo assim, faz sentido que as medições encontradas sejam semelhantes também. Um aspecto que ficou bem destacado, é que a rugosidade teve os maiores valores na região do fundo da cavidade pelo aumento da profundidade e dificuldade de expelir as impurezas resultantes do processo. Este resultado coincide com o trabalho utilizado como base para dar andamento nessa proposta, onde, no entanto, a geometria era quadrada.

Sobre a integridade superficial, que também foi analisada neste trabalho, notou-se a formação da camada branca em todas as regiões analisadas, tanto nas laterais, quanto no fundo da cavidade. A espessura da camada branca foi analisada pelo microscópio ótico e medida com o auxílio de um software. Levando em conta a média encontrada em cada região para cada cavidade, não houve uma variação significativa na espessura da camada branca em relação a mudança no sentido do fluxo de lavagem.

Em ambas as análises, pode-se concluir que a mudança no sentido do fluido não traz alterações tão significantes, dando a entender que os parâmetros elétricos, como a corrente por exemplo, têm maior influência nos resultados. Seguindo esse raciocínio, estudos futuros, deviam ser embasados em assuntos como variação no material do eletrodo, variação nos parâmetros elétricos e uma maior variação na geometria dos eletrodos.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, N. M.; SOLOMON, D. G.; BAHARI, F. A review on current research trends in electrical discharge machining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Malásia, v. 47, p. 1214-1228, 2007.
- AMORIN, F. L.; WEINGAERTNER, W. L. Influence of duty factor on the die-sinking electrical discharge machining of high-strength aluminum alloy under rough machining. **Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences**. Rio de Janeiro, vol. 24, p. 194-199, 2002.
- ARANTES, Luciano J.; **Desenvolvimento e Avaliação do Processo Híbrido de Usinagem por Descargas Elétricas**, 2001. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.
- ARANTES, Luciano J.; SILVA, Márcio B.; SILVA, Evaldo M.; RASLAN, Alberto A. **Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão**. Rev. Esc. Minas, vol.56, nº2, Ouro Preto, abril/junho 2003. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672003000200005 . Acesso em: 10 abril 2020.
- BANU, A.; ALI, M. Y. Electrical Discharge Machining: A Review. **International Journal of Engineering Materials and Manufacture**, p.3-10.,2016.
- BLEYS, P.; KRUTH, J.P.; LAWERS, B.; SCHACHT, B.; BALASUBRAMANIAN, V.; FROVEN, L.; VAN HUMBEECK, J. **Surface and Sub-Surface Quality of Steel after EDM**. **Advanced Engineering Materials**. , 13 February 2006
- CALVO, R.; DANIEL, M.(2019) Wire electrical discharge machining (EDM) setup parameters influence in functional surface roughness, **Procedia Manufacturing**,41, 602-609 Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919311382>. Acesso em 17 de maio de 2020.
- CHEN, J. C.; COX, J. Taguchi-Based Optimization of Surface Roughness and Dimensional Accuracy in Wire EDM Process with S7 Heat Treated Steel. World Academy of Science, Engineering and Technology, **International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering**, v.11, p. 560-565.,2017.
- CRUZ, C. **Análise da usinagem do aço-villares: VC-131 para matrizes com diferentes térmicos no processo de usinagem por eletroerosão**. Rio de Janeiro. ABCM, p. 5 ,1989.
- CRUZ, C. **Há inúmeras maneiras não-tradicionais de usinar materiais: conheça algumas. Máquinas e Metais**, São Paulo, v. 27, p. 80-85, 1993.
- CUSANELLI, G. Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique. **Journal of Materials Processing Technology**, Edimburgo, v. 149, n. 1 - 3, p. 289-295, 2004.

DAVE, H. K.; DESAI, K. P.; RAVAL H. K. Modelling and analysis of material removal rate during electro discharge machining of Inconel 718 under orbital tool movement. **International Journal of Manufacturing Systems**, v.2, p. 12-20,2012.

DAVIM, J. Paulo. **Machining: Fundamentals and Recent Advances**. Springer, 2008.

DRODZA, T. J., "Tool and Manufacturing Engineers Handbook: Machining", USA: **Society of Mechanical Engineers**, v.5., 1998.

EUBANK, P. T. Theoretical models of the electrical discharge machining process III: the variable mass, cylindrical plasma mode. **Journal of Applied Physics**, USA, v. 73, p. 7900-7909, 1993.

FIELD, M., KAHLES, J. F., KOSTER, W. P., Surface Finish and Surface Integrity, **Metcut Research Associates Inc., Metals handbook – 9th Ed., Machining**, Vol. 16, pp. 19-36, 1989.

FULLER, John E., Electrical Discharge Machining. **ASM Machining Handbook**, vol.16, p. 557–564,1996.

GOSTIMIROVIC, M.; KOVAC, P.; SEKULIC, M.; SKORIC, B. Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM. **Journal of Mechanical Science and Technology**. Serbia, v. 26, p. 173-179, 2012.

GOPALAKANNAN, S.; SENTHILVELAN, T. Optimization of machining parameters for EDM operations based on central composite design and desirability approach. **Journal of Mechanical Science and Technology**. India, v. 28, p. 1045-1053,2013.

GUITRAU, E. P. **The EDM handbook**. Cincinnati: Hanser Gardner, 1997.

INTECH EDM, **A Guide to Understanding and Selecting EDM Dielectric Fluids**, Broadview, 1996

JABBARIPOUR, B.; SADEGHI, M. H.; FARIDVAND, S.; SHABGARD, M. R. Investigating the effects of EDM parameters on surface integrity, MRR and TWR in machining of Ti–6Al–4V. **Machining Science and Technology**, v.16, p.419-444, 2012.

JAMESON, ELMAN C. **Electrical Discharge Machining**. Society of Manufacturing Engineers, 2001.

JAMWAL, A.; AGGARWAL, A.; GAUTAM, N.; DEVARAPALLI, A. **Electro-Discharge Machining: Recent Developments and Trends**, 2018.

JOSHI, Ayanesh Y.; JOSHI, Anand Y. A systematic review on powder mixed electrical discharge machining, **Heliyon**, v. 5, 2019, ISSN 2405-8440. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019366228> >. Acesso em 10 de abril de 2020.

KERN, R., **Sinker Dielectric Fundamentals, in EDM**, 2009.

KH Ho, ST Newman, **Estado da arte usinagem de descarga eléctrica (EDM)**, *Int. J. Mach. Ferramenta Manuf.* 43, v. 13, p.1287-1300, 2003.

KHAN, A. A. Electrode wear and material removal rate during EDM of aluminum and mild steel using copper and brass electrodes. *International Journal of Advanced Manufacture Technology*. Londres, v.39, p. 482-487, 2008.

KLOCKE, F., 1998, "A sequência de processos em ferramentas e fabricação de moldes", **Anais do Simpósio Internacional de Eletromecânica**, 11-13 de maio, Alemanha, v. 1, p. 65-97.

KLOCKE, Fritz.; KÖNIG, Wilfried. *Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung*, Springer Verlag, v4. ,2007.

KUMAR, S.; SINGH, R.;SINGH, T. P., ; SETHI, B. L. Surface modification by electrical discharge machining: a review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p.3675-3687, 2009

KUNIEDA, M.; LAUWERS, B.; RAJURKAR; SCHUMACHER, B.M., "Avançando EDM através de uma visão fundamental do processo", **Annals of CIRP Manufacturing Technology**, v. 54, p. 599-622, 2005

LEE, S.; X. LI, Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide. **Journal of materials processing Technology**, v 115, p. 344-358, 2001

LEE, H.T. and Tai, T.Y., “**Relationship between EDM parameters and surface crack formation**”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol.142, pp. 676-683. 2003.

LIMA, F. e CORRÊA, M., 2006, “Efeitos da eletroerosão sobre a superfície de peças usinadas”, **Revista de Tecnologia de Fortaleza**, Vol. 27, pp. 26-33.

MARAFONA, J.D.R., **Processos de Eletroerosão por Penetração e Fio**. Unidade Curricular "Concepção de moldes e ferramentas". MIEM. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2011.

MASUZAWA, T.; TANAKA, K.; NAKAMURA, Y.; Kinoshita, N. (1983). Água à base de solução dieléctrico para EDM. **CIRP Annals-Manufacturing Tecnologia**, v.32, p.119-122, 1983.

SABBO, J. N. B. M., **ANÁLISE DO ESTADO SUPERFICIAL DE AÇOS NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO**. 74 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Metalúrgica). Universidade do Porto, Porto, 2017.

SÁNCHEZ G., LUIS N.; MENTXAKA, **Aritzol and Lamikiz, Electroerosión: proceso, máquinas y aplicaciones**, in Departamento de Ingeniería Mecánica ETSI-Bilbao, 2006.

SANTOS, I. **Análise dos parâmetros de entrada na eletroerosão de penetração da liga de titânio TI-6AL-4V**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2010.

SCHMIDT, Igor; SABO, Sarita C. **Usinagem por eletroerosão**. Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Pontifícia universidade Católica do Estado do Rio Grande do Sul, 21p. 2008.

TOSUN N; OZLER L. A study of tool life in hot machining using artificial neural networks and regression analysis method. **J Mater Process Technol**, v. 124 p.99–104, 2002

WONG, Y. S.; RAHMAN, M.; LIM, H. S.; HAN, H.; RAVI, N. Investigation of micro-EDM material removal characteristics using single RC-pulse discharges. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 303-307,2003.

ZEILMANN, Rodrigo, ZANOTTO, Mariana C.; SANGALLI, Robier V.; VACARO, Tiago; BORDIN, Fernando M. **Estudo da Qualidade Superficial de Cavidades Eletroerodidas em Aço**. 2011.

ZEILMANN, R.; BORDIN, F.; VACARO, Tiago. Surface integrity of electrodischarge machined cavities for different depths and radii. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. Rio de Janeiro, v.37, p. 93-104, 2014.

ZEILMANN, R.; BIASIN, R.; OST, C.; WEBBER, C.; IVANISKI, T. (2015). **The effect of unilateral side flushing on the integrity of the workpiece under different machining conditions**. Center of Exact Sciences and TechnologiesCaxias do Sul University. Volume 45, 2016, pages 343-346 Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711600411X>>. Acesso em 10 de maio de 2020.