

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

FELIPE CARNEIRO BORTOLOTTO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE
ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO SOBRE O TEMPO DE PROCESSO E
QUALIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA**

CAXIAS DO SUL

2019

FELIPE CARNEIRO BORTOLOTTO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE
ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO SOBRE O TEMPO DE PROCESSO E
QUALIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica apresentado à Universidade de Caxias do Sul como pré-requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: máquinas de usinagem e conformação e matrizes e ferramentas.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

CAXIAS DO SUL

2019

FELIPE CARNEIRO BORTOLOTTO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE
ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO SOBRE O TEMPO DE PROCESSO E
QUALIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica apresentado à Universidade de Caxias do Sul como pré-requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: máquinas de usinagem e conformação e matrizes e ferramentas.

Aprovado(a) em: 10/07/2019

Banca Examinadora

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

Prof. Me. Eng. Sandro Tomaz Martins
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Eng. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul - UCS

RESUMO

A eletroerosão é um processo de usinagem não convencional, onde o desbaste de material é obtido através de descargas elétricas. Essas descargas são geradas pela máquina e passam de um eletrodo (ferramenta) para a peça, ocasionando assim o desbaste da peça. A otimização de parâmetros na usinagem por EDM é de suma importância para obter uma maior qualidade na superfície das peças com um menor intervalo de tempo de processo. O estudo dos parâmetros do processo torna-se importante para se obter essa otimização. Neste trabalho foi investigado a qualidade superficial em relação ao tempo com alteração dos parâmetros de corrente e tempo de descarga do processo. Foi usinado o aço AISI H13, material comumente utilizado em matrizes para injeção, como peça e um eletrodo de Cobre (99,98%), como ferramenta de remoção. Foi avaliado o tempo de processo, rugosidade, textura, espessura de camada branca e desgaste do eletrodo. Pode-se observar que o parâmetro de tempo de descarga tem grande influência no tempo de processo, na textura, na espessura de camada branca e no desgaste do eletrodo, enquanto o parâmetro de intensidade de corrente tem grande influência no tempo de processo, na rugosidade e no desgaste do eletrodo.

Palavras-chave: EDM, Qualidade Superficial, Tempo de Processo, Parâmetros.

ABSTRACT

Electrical Discharge Machining is an unconventional machining process, where the thinning of material is obtained through electric discharges. These discharges are generated by the machine and pass from an electrode (tool) to the part, thus causing the workpiece to thin. The optimization of parameters in the application by EDM is important to obtain a higher quality in the surface of the parts with smaller process time interval. The study of the process parameters becomes important to obtain this optimization. In this work, the surface quality was investigated in relation to the process time with alteration of the current parameters and process discharge time. AISI H13 steel was machined as part and a Copper electrode (99.98%), as a removal tool. It was evaluated the process time, roughness, texture, white layer thickness and electrode wear, It could be observed that the discharge time parameter has a great influence on the process time, texture, white layer thickness and electrode wear, while the current intensity parameter has a great influence on the process time, the roughness and the wear of the electrode.

Key words: EDM, Surface Quality, Process Time, Parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema da usinagem de eletroerosão por penetração	15
Figura 2 – Exemplo de peça usinada pelo processo de Eletroerosão por Penetração	16
Figura 3 – Representação esquemática das descargas elétricas do processo EDM.....	20
Figura 4 – Modificações da peça usinada por eletroerosão.....	26
Figura 5 – Corpo de Prova após Ensaios.....	28
Figura 6 – Formato do Eletrodo	29
Figura 7 – Máquina de Eletroerosão por Penetração AgieCharmilles FORM 30	30
Figura 8 – Sistema de Medição de Rugosidade.....	30
Figura 9 – Microscópio Estereoscópio Trinocular	31
Figura 10 – Microscópio Ótico Epiphot 200	31
Figura 11 – Scanner 3D.....	32
Figura 12 – Disposição de cada Cavidade.....	34
Figura 13 – Local onde foram realizadas as Medições	35
Figura 14 – Eletrodos após a utilização do spray revelador	35
Figura 15 – Tela Software Colin3D	36
Figura 16 – Perfil de Rugosidade	38
Figura 17 – Gráfico da Rugosidade Ra	40
Figura 18 – Gráfico da Rugosidade Rz	40
Figura 19 – Gráfico da Rugosidade R _{máx}	41
Figura 20 – Texturas Bidimensionais para diferentes Parâmetros de Acabamento	42
Figura 21 – Fotografia da Subsuperfície das Amostras.....	43
Figura 22 – Fotografia da Presença de Poros e Microfissuras	44
Figura 23 – Desgaste do Eletrodo (Cavidade 1).....	45
Figura 24 – Desgaste do Eletrodo (Cavidade 2).....	45
Figura 25 – Desgaste do Eletrodo (Cavidade 3).....	46
Figura 26 – Desgaste do Eletrodo (Cavidade 4).....	46
Figura 27 – Desgaste do Eletrodo (Cavidade 5).....	46
Figura 28 – Tabela Testes Cobre/Aço Cav. 1 e 2.....	54
Figura 29 – Tabela Testes Cobre/Aço Cav. 3 e 4.....	55
Figura 30 – Tabela Testes Cobre/Aço Cav. 5.....	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Desvio de forma das superfícies técnicas	24
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Química do Aço AISI H13	28
Tabela 2 – Parâmetros da Usinagem por EDM	33
Tabela 3 – Previsão do Processo	33
Tabela 4 – Tempo e Taxa de Remoção decorrentes do Processo.....	37
Tabela 5 – Médias das Rugosidades.....	39
Tabela 6 – Espessura Média de Camada Branca.....	44
Tabela 7 – Desgaste Médio para cada Cavidade	47

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>EDM</i>	Electrical Discharge Machining;
<i>CNC</i>	Comando numérico computadorizado;
<i>GAP</i>	Fenda de trabalho;
<i>T_{off}</i>	Tempo do processo em que a corrente elétrica está desligada;
<i>T_{on}</i>	Tempo do processo em que a corrente elétrica está ligada;
<i>V_w</i>	Taxa de remoção do material;
<i>V_e</i>	Taxa de desgaste do eletrodo;
<i>J</i>	Desgaste Relativo;
<i>SL</i>	Sobre corte lateral;
<i>DT</i>	Duty time;
<i>ZTA</i>	Zona termicamente afetada;
<i>t_{tp}</i>	Tempo total de processo;
<i>Vol</i>	Volume;
<i>R_a</i>	Rugosidade média aritmética;
<i>R_z</i>	Média das rugosidades máximas;
<i>R_{máx}</i>	Rugosidade máxima;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	12
1.2	OBJETIVO GERAL	13
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O PROCESSO DE ELETROEROSÃO	14
2.1	PROCESSO DE ELETROEROSÃO	14
2.1.1	Modelos de operações para o Processo de Eletroerosão	15
2.1.2	Descrição do Processo de Eletroerosão por Penetração	16
2.1.3	Eletrodos do Processo de Eletroerosão por Penetração	18
2.1.4	Fatores que Influenciam no desgaste do eletrodo	19
2.1.5	Fundamentos e Princípios Físicos do Processo	19
2.2	PARÂMETROS DA ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO.....	21
2.2.1	Parâmetros Fixos.....	21
2.2.2	Parâmetros Variáveis.....	22
2.2.3	Parâmetros de Desempenho	23
2.3	QUALIDADE SUPERFICIAL.....	23
2.4	RUGOSIDADE.....	25
2.5	CONSEQUÊNCIAS SUPERFICIAIS E SUBSUPERFICIAIS DO PROCESSO DE ELETROEROSÃO.....	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1	MATERIAIS	28
3.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	29
3.3	ESTRATÉGIA	32
3.3.1	Estratégia da Usinagem do Processo de Eletroerosão	32
3.3.2	Estratégia da Análise da Qualidade Superficial.....	34
3.3.3	Estratégia de Análise do Desgaste do Eletrodo	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	TEMPO DE PROCESSO.....	37

4.2	RUGOSIDADE DA PEÇA.....	38
4.3	TEXTURA DA PEÇA	41
4.4	ESPESSURA DE CAMADA AFETADA	43
4.5	DESGASTE DO ELETRODO.....	44
5	CONCLUSÃO	48
6	TRABALHOS FUTUROS.....	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
	ANEXO A – TABELA COBRE/AÇO ENGEMAQ.....	54

1 INTRODUÇÃO

A eletroerosão é um processo moderno de usinagem que se baseia na remoção de partículas metálicas por meio de descargas elétricas. Esta tecnologia foi descoberta em meados do século XVIII na descrição de um processo para obtenção de pó metálico mediante descargas elétricas. Porém este processo só passou a ser utilizado industrialmente no século XX, para a recuperação de peças com ferramentas quebradas em seu interior (machos, brocas, alargadores). Durante a Segunda Guerra Mundial, a necessidade de acelerar a produção industrial e a escassez de mão-de-obra impulsionaram a pesquisa de novas tecnologias, visando tornar possível o aumento da produção, com um mínimo de desperdício.

“A usinagem por eletroerosão é um processo de conformação em que o eletrodo ferramenta produz sua imagem no eletrodo peça” (KONIG, KLOCKE, 1997). Na eletroerosão por penetração, a remoção do material ocorre devido a uma série de descargas elétricas controladas, criadas no espaço entre o eletrodo e a peça. Esse espaço é conhecido como “GAP”. Por não haver contato entre a ferramenta e a peça, não existe força de corte, assim, não formando as tensões comuns dos processos convencionais de usinagem. A ferramenta que produz a erosão, conhecido como eletrodo, é normalmente feito de cobre, grafite, latão ou outras ligas metálicas de boa condução elétrica.

A limpeza da área onde ocorreu as descargas elétricas é feito por um fluido dielétrico. Esse fluido deve ter alta rigidez e rápida recuperação após a descarga, resfriamento rápido efetivo e habilidade de lavagem. É importante que o líquido possua rigidez dielétrica suficientemente alta para permanecer eletricamente não condutor até que a tensão de ruptura seja alcançada e ser capaz de se deionizar rapidamente após a descarga.

Apesar de ser um processo conhecido na indústria metal-mecânica, o estudo e compreensão dos parâmetros operacionais e dos mecanismos que promovem à remoção do material são de suma importância. Neste trabalho serão feitos estudos sobre os parâmetros de processo e suas respectivas consequências para a obtenção da peça, focando principalmente no aço AISI H13, normalmente, muito utilizado na fabricação de moldes e matrizes para injeção de polímeros.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em um mundo cada vez mais competitivo, surge a necessidade de se ter processos para o desenvolvimento de um novo produto cada vez mais rápidos. Dentro disso no processo do

desenvolvimento de um novo molde de injeção plástica cria-se a necessidade de se ter processos rápidos que consigam obter um acabamento necessário para o desenvolvimento daquele novo produto. O processo de eletroerosão é um dos últimos processos utilizados no desenvolvimento de uma nova matriz de injeção plástica, sendo assim, deve se ter um bom acabamento final no molde.

No processo de eletroerosão, erodir com baixa corrente causa um baixo rendimento de remoção. Conforme aumenta a capacidade de remoção eleva-se também o desgaste do eletrodo. Por isso é de alta relevância os estudos dos parâmetros a serem utilizados no processo, tais como o tempo de descarga elétrica, variações de corrente e tensão, alinhados com a qualidade superficial do material erodido e a influência subsuperficial sobre a vida da cavidade.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral é analisar os efeitos da variação dos parâmetros da eletroerosão por penetração em relação ao tempo do processo e a qualidade superficial da peça.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- a) estudar as influências da variação dos seguintes parâmetros de eletroerosão por penetração: tempo de descarga elétrica e a intensidade de corrente;
- b) verificar as diferentes variações na qualidade superficial da peça devido a aplicação de diferentes parâmetros de eletroerosão;
- c) analisar os fatores que influenciam no tempo de processo, buscando uma redução no tempo, alinhado com a qualidade superficial da peça;
- d) analisar alterações subsuperficiais envolvidas no aço após o processo de eletroerosão;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O PROCESSO DE ELETROEROSÃO

A proposta deste projeto é avaliar o processo de usinagem por eletroerosão – EDM (Electrical Discharge Machining). Existem vários fatores que estão relacionados a usinagem por eletroerosão e que podem ser cruciais para uma aplicação eficiente desta tecnologia. Tendo em vista este fato, será abordado nesse capítulo generalidades sobre o processo, assim como, uma descrição da máquina EDM por penetração, seus fenômenos físicos, parâmetros de controle, juntamente a uma descrição de qualidade superficial e consequências na superfície da peça usinada pelo processo de eletroerosão.

2.1 PROCESSO DE ELETROEROSÃO

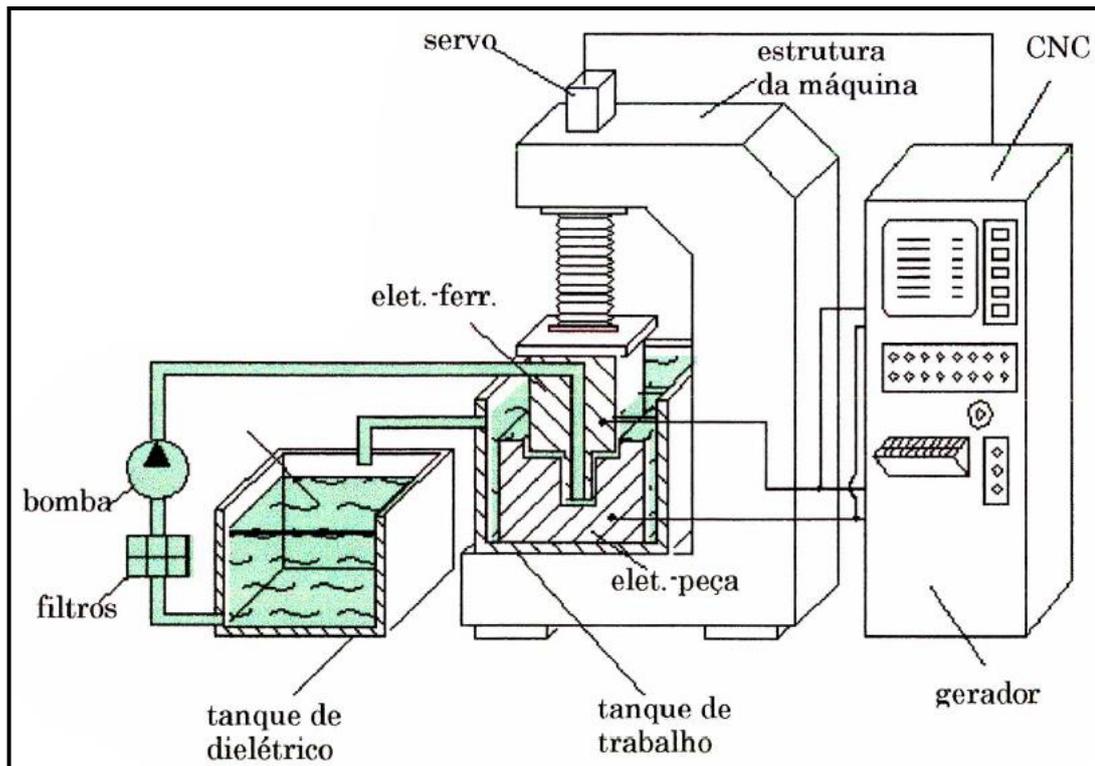
O processo de eletroerosão acontece por uma série de descargas elétricas que quando em contato com um material condutor, erode a peça usinada, onde a ferramenta é considerada o cátodo e o material usinado anodo, cujas descargas passam em uma taxa superior a 20 mil vezes por segundo (BRALLA, 2006).

Conforme Kobayashi (1995), o processo de usinagem por descargas elétricas, em inglês Electrical Discharge Machining-EDM ou simplesmente processo de eletroerosão, foi o primeiro processo não convencional de usinagem a se popularizar na indústria metal mecânica. A usinagem por eletroerosão tem sido aplicada em várias operações, em especial para a usinagem de materiais considerados de complexa usinabilidade, devido a altas durezas ou geometria, para os processos tradicionais como fresamento, torneamento, furação e retificação.

O processo possui grande aplicação em usinagem de peças com geometria complexa e alta dureza, tais como moldes e matrizes, setores automotivo, aeroespacial, médico, ótico, de joalheria, dental, de ferramentas, de prototipagem e de componentes cirúrgicos (SIMAO et al, 2003; HO e NEWMAN, 2003).

A figura 1 apresenta uma máquina de eletroerosão e seus principais componentes necessários para o processo de usinagem por EDM. O gerador de pulsos é responsável pelo controle de avanço do eixo (Z) do cabeçote e pela geração de tensão e corrente elétrica. O sistema mecânico possui a mesa de trabalho, responsável pela movimentação dos eixos X-Y é localizado também o servo motor onde é fixado o eletrodo (ferramenta) no cabeçote. Durante o funcionamento da máquina, o tanque é cheio ou banhado por um fluido dielétrico que possui um sistema de controle de vazão.

Figura 1 – Esquema da usinagem de eletroerosão por penetração



Fonte: KONIG; KLOCKE, 1997

O sistema dielétrico é composto pela cuba onde reserva o fluido dielétrico, possui um sistema de filtragem responsável pela qualidade do fluido e durabilidade. Um elemento comum para todas as máquinas de eletroerosão é a moto bomba para o dielétrico, ela possui a finalidade de promover o estreitamento do canal de descarga, aumenta a densidade de energia. Tem a capacidade de remover as partículas erodidas na fenda de trabalho além de refrigerar o local usinado (KONIG; KLOCKE, 1997). A lavagem com o fluido dielétrico é muito importante, considerado como um parâmetro não elétrico, possui uma grande influência na rugosidade superficial, junto à densidade de formação de micro trincas minimizando-as (HO; NEWMAN, 2003).

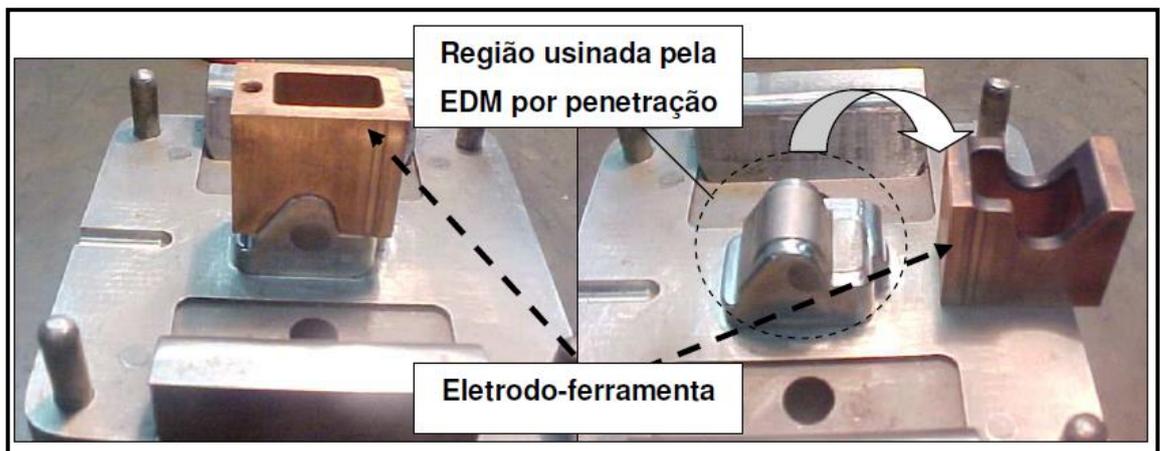
2.1.1 Modelos de operações para o Processo de Eletroerosão

No processo de eletroerosão (EDM), existem dois tipos de operações básicas, sendo estas caracterizadas como usinagem por eletroerosão por penetração e a usinagem por eletroerosão à fio, que são descritas a seguir:

- a) Eletroerosão por penetração: é utilizado um eletrodo, o qual, transfere a sua imagem a peça à medida que avança na cavidade em que está sendo usinado. Este avanço se

dá, através de descargas elétricas que ocorrem entre a peça e o eletrodo, removendo o material. O avanço do eletrodo pode ser executado tanto na direção vertical (eixo Z), como no horizontal (eixos X e Y). A usinagem por eletroerosão por penetração é geralmente aplicada na confecção de moldes com cavidades ou de ferramentais com geometria complexa (Arantes e Silva, 2003);

Figura 2 – Exemplo de peça usinada pelo processo de Eletroerosão por Penetração



Fonte: Charmilles, 2018

- b) Eletroerosão a fio: parte dos mesmos princípios que a eletroerosão por penetração, porem nesse processo, um fio bobinado se desenrola constantemente durante o processo é utilizado como eletrodo-ferramenta, sendo a peça produzida pelo movimento relativo entre o fio e a peça. Esse fio é eletricamente carregado e atravessa a peça que está submersa em um fluido dielétrico, provocando descargas elétricas entre o fio e a peça, resultando no corte do material. O movimento é constante e é programado por comando numérico computadorizado (CNC), permitindo o corte de perfis complexos com exatidão. A eletroerosão a fio é bastante usada na indústria para confecção de placas de guia e porta punções.

2.1.2 Descrição do Processo de Eletroerosão por Penetração

O processo de eletroerosão por penetração consiste basicamente da aproximação de um eletrodo ferramenta (conhecido, normalmente, apenas como eletrodo) a um eletrodo peça (conhecido, normalmente, apenas como peça) e a utilização de descargas elétricas controladas, onde a retirada de material ocorre por descargas elétricas de alta frequência, que produzem calor a ponto de a temperatura no local da descarga variar de 10.000°C até 50.000°C, provocando,

assim, a fusão e a vaporização de uma parte micrométrica da peça que deve ser de um material eletricamente condutor (Van Dijck, 1974). O resultado deste fenômeno na superfície da peça é a formação de pequenas crateras. A peça usinada apresenta-se como uma “imagem negativa” da forma geométrica do eletrodo-ferramenta.

A utilização de um fluido dielétrico é de suma importância para isolar eletricamente a peça, devido a ionização na região da descarga, e limpar a peça removendo as partículas erodidas. Ambos eletrodos devem ser imersos ou banhados por um fluido dielétrico, podendo ele ser de água deionizada, um óleo ou querosene (SIMAO et al, 2003). Desta forma, este processo é capaz de produzir rebaixos, ranhuras, furos e outras geometrias complexas que, pelos processos convencionais, seriam difíceis ou impossíveis de serem produzidos.

A descarga elétrica acontece entre dois eletrodos e é produzida por corrente contínua de pulsação controlada. Um destes eletrodos é a ferramenta que geralmente fica conectado ao polo positivo (anodo). O outro eletrodo é a peça que será usinada, a qual costuma ser conectada ao polo negativo (catodo). Contudo, esta condição pode ser invertida dependendo do material a ser usinado (FULLER, 1989).

Durante o processo de usinagem por EDM, não ocorre contato direto entre o eletrodo-ferramenta e o eletrodo-peça, e, de acordo com McGeough (1988), a distância compreendida entre esses elementos pode ser de 0,005 até 2mm. Esta distância é conhecida como fenda de trabalho ou GAP em inglês. Segundo Ho e Newman (2003) e Tsai, Yan e Huang (2003), a ausência de contato entre peça e ferramenta evita o aparecimento de forças de usinagem na superfície e vibrações durante o processo, o que faz com que, devido à ausência de tensões mecânicas, a precisão dos componentes fabricados seja maior e os dispositivos de fixação sejam menos robustos, o que leva a redução de custo.

Fuller (1989) lista como principais vantagens da usinagem por descargas elétricas as seguintes:

- a) possibilidade de se usinar cavidades com finas paredes;
- b) capacidade de usinar peças de diversas geometrias;
- c) capacidade de usinar materiais de difícil usinabilidade, como, por exemplo, materiais extremamente duros que não podem ser obtidas por meio da usinagem convencional;
- d) durante a usinagem não há formação de rebarbas;
- e) usinagem de moldes e matrizes, como, por exemplo: moldes de injeção plástica, matrizes para extrusão, matrizes para forjamento e matrizes para fundição.

2.1.3 Eletrodos do Processo de Eletroerosão por Penetração

Um elemento fundamental no processo é o eletrodo, em razão de ser o meio pelo qual a energia elétrica é transportada para a peça a ser usinada (Silva, 2006). Podem ser usados como eletrodos de eletroerosão todos os materiais condutores de corrente elétrica, porém, os eletrodos devem possuir algumas características para que não ocorra problemas no processo, conseguindo assim uma eficiência elevada.

Segundo Bolz (2018) o material utilizado para o eletrodo deve apresentar as seguintes características:

- a) elevada condutividade elétrica;
- b) elevado ponto de fusão;
- c) elevada condutividade térmica;
- d) elevada capacidade de armazenar calor a uma determinada temperatura (elevado calor específico);
- e) resistência à erosão (resistência ao desgaste para o processo de EDM).

Essas propriedades levam ao encontro de dois materiais mais utilizados em eletroerosão que são: o cobre eletrolítico e o grafite (GUITRAU, 1997). O tipo de material utilizado tem influência especialmente sobre a taxa de remoção de material e sobre o desgaste do próprio eletrodo. Estes materiais são disponíveis em diferentes classificações ou ligas.

Segundo Drozda (1998) abaixo são relacionados os materiais mais comuns para a fabricação dos eletrodos:

- a) Eletrodo de Latão: utilizado para acabamento, é frequentemente utilizado na usinagem de ligas de titânio. Possui uma alta taxa de desgaste.
- b) Eletrodo de Cobre: é utilizado para obter uma ótima superfície de acabamento. Podendo ser fabricados em alta escala de produção, são utilizados na usinagem de geometrias complexas.
- c) Eletrodo de Cobre-Tungstênio: é recomendado para aplicações de usinagem que necessitam de alto acabamento, alta precisão e ainda para materiais de difícil aplicação da usinagem por EDM, como por exemplo o metal duro.
- d) Eletrodo de Grafita: é o mais utilizado na fabricação de eletrodos para o processo de EDM por proporcionar alta taxa de remoção de material quando comparado com eletrodos de materiais metálicos para a usinagem de aços.

2.1.4 Fatores que Influenciam no desgaste do eletrodo

O desgaste do eletrodo é um problema a ser considerado muito importante no processo de usinagem EDM, pois ele influencia muito na precisão dimensional e na forma da cavidade produzida, o que pode significar inviabilização do processo, em função das necessidades pré-determinadas de tolerâncias ou a necessidade de pós-processamento das superfícies. Os principais parâmetros elétricos e não elétricos que afetam o desgaste do eletrodo são: corrente de descarga, duração de pulso, polaridade, método de lavagem, pressão e taxa de fluxo, ferramenta e materiais, geometria da ferramenta, área de usinagem e movimentação da ferramenta (CAMPOS, 2014).

Conforme Flaño (2018), quando maior a corrente de descarga, maior é o desgaste do eletrodo, pois a alta densidade de corrente superaquece rapidamente o eletrodo e isso é acompanhado por um aumento na taxa de desgaste do eletrodo. Já um grande tempo de pulso leva a um menor desgaste do eletrodo. Este fenômeno é causado pela formação de uma camada protetora na superfície do eletrodo, de tal forma que o desgaste do eletrodo é evitado. Além disso, o desgaste do eletrodo está diretamente ligado com a geometria a ser usinada.

2.1.5 Fundamentos e Princípios Físicos do Processo

O processo de EDM, segundo Zeilmann et. al. (2011), baseia-se na remoção de material por sucessivas descargas elétricas intermitentes capazes de reproduzir sua imagem no eletrodo peça e estão separados por uma fenda de trabalho conhecida como GAP.

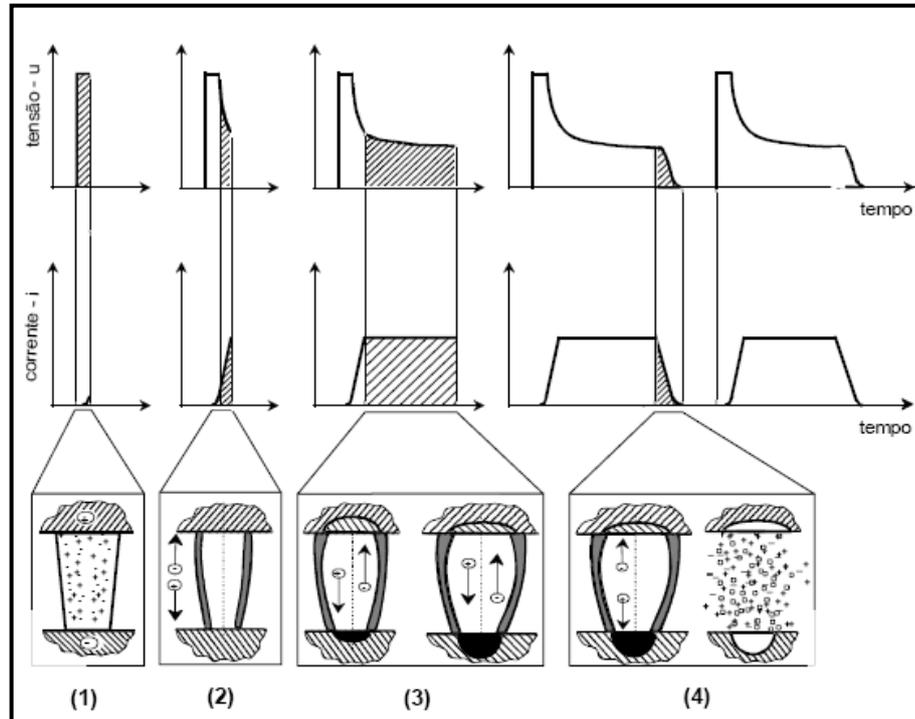
O princípio amplamente aceito por trás da EDM é a conversão de energia elétrica em energia térmica através de uma série de descargas elétricas discretas que ocorrem entre o eletrodo e a peça de trabalho, imersos em um fluido dielétrico (ZEILMANN; BORDIN; VACARO, 2015).

Quando aplicada uma carga conhecida também ionização por impacto, superior à tensão de ruptura imposta pelo fluido dielétrico, ocorre um hiperaquecimento na região, capaz de evaporar o fluido e gerar a faísca (KONIG; KLOCKE, 1997).

Diversas teorias foram formuladas para explicar o complexo fenômeno que ocorre para a remoção do material através de faíscas elétricas no processo de eletroerosão. A teoria que melhor explica é a teoria Termoelétrica, a qual, considera que o ciclo de uma descarga elétrica ocorre durante quatro fases consecutivas entre os dois eletrodos submersos em um fluido dielétrico. Para demonstrar estas quatro fases da descarga elétrica conforme a teoria

termoelétrica, a figura 3 apresenta passo-a-passo cada uma das quatro fases. (KAHNG, 1977 apud OLINIKI, 2009)

Figura 3 – Representação esquemática das descargas elétricas do processo EDM



Fonte: KONIG e KLOCKE (1997).

As fases de uma descarga elétrica no processo de eletroerosão descritas por Kahng (1977, apud OLINIKI, 2009) podem ser divididas em 4 etapas conforme demonstrado na figura 2.4 e descrito abaixo:

- 1ª Fase – Ignição da descarga:** Inicialmente não há passagem de corrente elétrica devido ao fluido dielétrico. Nesse instante, ocorre a aproximação do eletrodo-ferramenta em direção a peça, até atingir a distância da fenda de trabalho (GAP) causando um aumento do campo elétrico. Com este aumento, os elétrons primários liberados no cátodo são acelerados pelo campo elétrico e colidem com as moléculas do fluido dielétrico provocando, assim, uma reação em cadeia, que libera mais elétrons e íons positivos que se encaminham ao cátodo. Isso é conhecido como ionização por impacto (AMORIM, 2002; GUITRAU, 1997).
- 2ª – Formação do canal de plasma:** é onde ocorre o desenvolvimento do canal de descarga, o plasma onde se tem uma difícil compreensão do que ocorre durante esse período, porém para alguns autores como Konig e Klocke (1997) ocorrem efeitos conhecidos como “skin” e “pinch”. Para Amorim (2002) é um colapso de tensão em

aberto, pois nesse momento a tensão decai rapidamente para a tensão de ruptura do dielétrico e então ocorre o tempo de retardo.

- c) 3ª Fase – Fusão e evaporação de parcelas do material de peça e eletrodo: nesse momento aumenta a formação de bolhas no canal do plasma (KONIG; KLOCKE, 1997), o operador nesse momento tem a função de controlar o tempo para evitar arcos e curtos-circuitos, a distância entre a fenda de trabalho dependerá da intensidade de corrente de descarga (AMORIM, 2002).
- d) 4ª Fase – Ejeção do material fundido: é o momento decorrente da ejeção de material fundido ao fim do tempo de descarga segundo Amorim (2002) o sistema de controle de energia interrompe a tensão e a corrente elétrica assim estabelecendo um tempo de intervalo (T_{off}) para o recomeço de um novo ciclo de erosão. Esse período também ocorre um colapso no canal de plasma, onde a baixa pressão induz a redução da temperatura de ebulição do material fundido, por forças hidrodinâmicas ocorre à ejeção do mesmo (IVANISKI, 2015).

2.2 PARÂMETROS DA ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO

Como todo processo de usinagem, o controle dos parâmetros na eletroerosão também é fundamental para seu desempenho. Segundo Ivaniski (2017) os parâmetros elétricos utilizados irão influenciar na integridade superficial do material usinado como formação de micro trincas após rápida taxa de resfriamento e solidificação na pausa de energia.

Wurzel (2015) divide esses parâmetros em três grupos, sendo eles os parâmetros fixos de usinagem, os parâmetros variáveis de usinagem e os parâmetros de desempenho.

2.2.1 Parâmetros Fixos

Os parâmetros fixos são invariáveis em função do processo de usinagem, sendo os mais importantes:

- a) material da peça: quanto maior a condutividade elétrica do material, maior será a taxa de remoção dele e melhora a rugosidade superficial, diminuindo a relação de desgaste (WURZEL, 2015).
- b) fluido dielétrico: isola o processo contra descargas prematuras, limpa a área erodida removendo o resíduo gerado e refrigera a região solidificando materiais fundidos e vaporizados. A composição e a condição do fluido dielétrico influenciam a

estabilidade do processo, alterando todo o resultado da usinagem como a taxa de remoção de material e a rugosidade da peça (WURZEL, 2015).

2.2.2 Parâmetros Variáveis

Os parâmetros variáveis alteram-se em função do processo de usinagem, sendo os mais importantes:

$$DT [\%] = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} * 100 \quad (1)$$

- a) frequência de descarga elétrica (*DT*): determina o número de vezes que a corrente elétrica passa de ligada T_{on} para desligada T_{off} em um determinado tempo. O T_{on} é o tempo em que o processo está eletricamente energizado. O valor deste parâmetro é diretamente inserido na máquina e fica na faixa de alguns microssegundos a alguns milissegundos. O T_{off} é o tempo em que o processo está eletricamente desenergizado. Este tempo é necessário para a estabilização do GAP. No T_{off} está incluído o tempo de explosão da bolha de gases, refrigeração das partículas e limpeza do canal de plasma que afeta diretamente a velocidade do processo, mas também é fundamental para que ocorra a estabilidade deste. Uma regulagem de baixa frequência seria com um T_{on} estendido, normalmente utilizado para obter altas taxas de remoção de matéria em operações de desbaste. Já nas operações de acabamento, a regulagem do T_{on} é curta, obtendo-se vários ciclos por segundo, considerando-se uma regulagem de alta frequência. O T_{on} elevado aumenta a taxa de remoção de material, piora a qualidade da superfície e a camada superficial, porém reduz o desgaste do eletrodo. A relação entre o T_{on} e o T_{off} é chamada de Duty Time (DT) e pode ser vista na equação (1). (Sabbo, 2017)
- b) tensão do Arco (V): quanto maior o valor da tensão, maior será a distância entre o eletrodo e a peça (GAP), melhorando as condições de descargas como resultado.
- c) intensidade de corrente (A): quanto maior a área a ser usinada, maior a corrente elétrica a ser usada pela descarga. A corrente elétrica é o fator que mais influencia na textura da superfície da peça. Uma corrente mais alta aumenta a taxa de remoção dos materiais e o valor da rugosidade superficial (WURZEL,2015).

2.2.3 Parâmetros de Desempenho

a) taxa de remoção do material (V_w): é o volume de material removido da peça na unidade de tempo. Depende diretamente da energia e da frequência empregada para um processo de EDM. É dependente também das propriedades do material da peça a ser erodida, como ponto de fusão, e das propriedades do material do eletrodo. Fatores geométricos, como forma e dimensões do eletrodo e da peça, também influenciam (WURZEL,2015).

$$J [\%] = \frac{V_e [mm^3/min]}{V_w [mm^3/min]} \quad (2)$$

b) relação de desgaste entre eletrodo e peça (Desgaste Relativo – J): é a razão entre a taxa de material removido (V_w) da peça e a taxa de material removido do eletrodo (V_e), como pode ser visto na equação (2) (WURZEL,2015).

Depende das propriedades físicas e químicas dos materiais. O Ponto de fusão é a propriedade que mais afeta a taxa de desgaste do eletrodo. Outros fatores que também influenciam este parâmetro são taxa de remoção de material, área de seção transversal dos eletrodos, conformação do eletrodo e a complexidade da forma geométrica da peça que se deseja usinar (WURZEL,2015).

c) sobre corte lateral (SL): é a diferença entre os raios do furo usinado na peça e do eletrodo. A intensidade de energia elétrica, a frequência de descarga, o sistema de limpeza e o material da peça e do eletrodo influenciam mais fortemente neste parâmetro (WURZEL,2015).

d) rugosidade Superficial: é o parâmetro de qualidade de acabamento determinado pelo desempenho do processo (WURZEL,2015).

2.3 QUALIDADE SUPERFICIAL

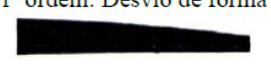
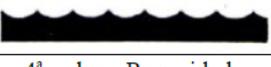
Um dos pontos nos quais a usinagem decididamente está classificada como processo importante de fabricação é justamente na qualidade de superfície obtida. Esse é o parâmetro mais levado em conta na hora de escolher pelos processos de usinagem de uma superfície técnica.

De acordo com Klocke (2009), em termos de geometria, a superfície normalmente é dividida em macrogeometria e qualidade superficial. A macrogeometria é definida em termos de desvios de dimensão, forma e posição. Já a qualidade superficial é mensurada através de parâmetros de rugosidade.

Conforme Oliveira (2004), a textura é caracterizada pelos diferentes processos de transformação metalúrgica ao qual a superfície da peça é submetida. As superfícies geradas nos processos de fabricação não são superfícies perfeitas, apresentando irregularidades provenientes do processo que deu origem aquela superfície. Sendo assim definidos três níveis: desvios de forma (irregularidades), ondulações e rugosidade. Pode ser visto no quadro 1 uma representação e principais motivos para a origem destes desvios.

O acabamento tende a ser uma condição estável, devendo permanecer constante de peça para peça, se não houver mudanças nas condições de processo. Os engenheiros de fabricação podem estimar aproximadamente o acabamento que o processo irá fornecer, conhecendo o material, a máquina, a ferramenta, o fluido e os parâmetros do processo. No monitoramento do processo, a rugosidade média R_a representa, de forma efetiva, a estabilidade. Por esse motivo, compreende-se porque este parâmetro é largamente usado nas indústrias para monitorar a estabilidade do processo (Oliveira, 2006).

Quadro 1 – Desvio de forma das superfícies técnicas

Desvios de forma (representado numa seção do perfil)	Exemplos para tipos de desvios	Exemplos para origem de desvios
1ª ordem: Desvio de forma 	Não plano Ovalado	Defeitos nas guias das máquinas ferramentas; deformação por flexão da máquina ou da peça; fixação errada da peça; deformações devido a temperatura, desgaste
2ª ordem: Ondulação 	Ondas	Fixação excêntrica ou defeito de forma de uma fresa; vibrações da máquina ferramenta, da ferramenta ou da peça.
3ª ordem: Rugosidade 	Ranhuras	Forma do gume da ferramenta; avanço ou profundidade de corte.
4ª ordem: Rugosidade 	Estrias Escamas Ressaltos	Processo de formação do cavaco (cavaco arrancado, cavaco de cisalhamento, gume postiço); jateamento de areia; tratamento galvânico.
5ª ordem: Rugosidade Não mais representável graficamente em forma simples	Estrutura	Processo de cristalização, modificação da superfície por ação química (ex. decapagem), processos de corrosão.
6ª ordem: Não mais representável graficamente em forma simples	Estrutura reticulada do material	Processos físicos e químicos da estrutura do material; tensões e deslizamentos da rede cristalina.

Fonte: Oliveira (2006)

2.4 RUGOSIDADE

A rugosidade está relacionada as imperfeições da superfície, tendo influência direta no comportamento das peças produzidas pela indústria eletromecânica na qualidade de deslizamento, resistência ao desgaste, na possibilidade de ajustes, na resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes, na resistência à corrosão e à fadiga, na vedação e na aparência.

A medição da rugosidade da superfície pode ser avaliada com aparelho denominados rugosímetros, sendo esse, o parâmetro mais utilizado para definição da superfície obtida. (HAN e KUNIEDA, 2004; TARNG, MA e CHUNG, 1995).

A análise de rugosidade é realizada para identificar nas superfícies as irregularidades, tais como relevos ou depressões originadas pela retirada de material durante um processo de fabricação (CHIAVERINI, 1986).

Segundo Ferraresi (1977), a rugosidade superficial é geralmente classificada em transversal e longitudinal. Micro irregularidades transversais apresentam-se na direção do avanço da ferramenta, enquanto que micro irregularidades longitudinais estão na direção do movimento de corte. Em função do processo e das condições de usinagem, pode predominar um ou outro tipo de micro irregularidade. Para o processo de EDM o perfil da rugosidade ocorre de forma irregular, pois não existe uma direção normal no sentido de usinagem, interferências dos sistemas de vibração ou sistema elásticos peça-ferramenta-máquina.

2.5 CONSEQUÊNCIAS SUPERFICIAIS E SUBSUPERFICIAIS DO PROCESSO DE ELETROEROSÃO

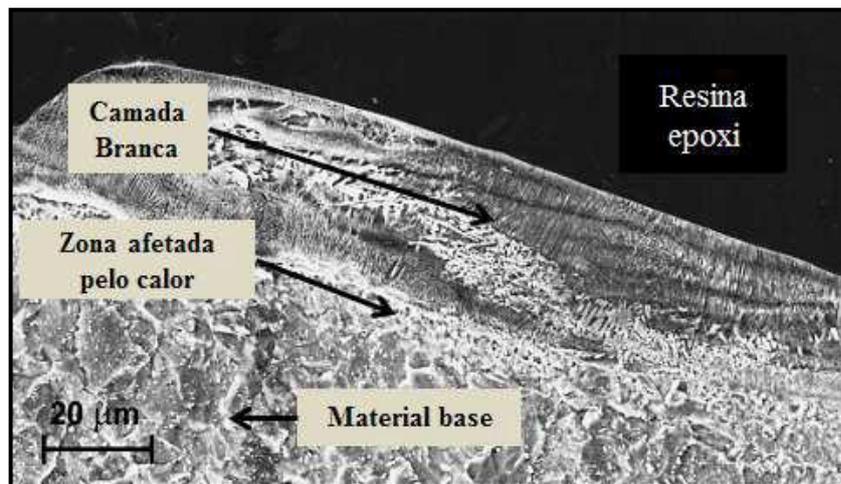
Os altos efeitos térmicos gerados durante a remoção do material por EDM induzem modificações mecânicas, metalúrgicas e químicas nas camadas superiores das superfícies usinadas. Essas camadas são caracterizadas por alto endurecimento do trabalho, alta tensão de tensão residual e ampla rede de trinca térmica que tem efeitos prejudiciais na vida de fadiga dos componentes usinados (ZEILMANN, 2013).

As superfícies obtidas por eletroerosão apresentam características de crateras, que são típicas do processo térmico, com possibilidades de microfissuras na superfície e abaixo desta (LEE e TAI, 2003), e com possibilidades de grande variação estrutural, devido às altas temperaturas e altas taxas de aquecimento e resfriamento repetitivos aos quais a superfície está exposta (KIYAK e ÇAKIR, 2007).

As superfícies geradas por eletroerosão possuem três camadas bastante claras, que são elas:

- a) a camada branca;
- b) a zona termicamente afetada (ZTA);
- c) material base.

Figura 4 – Modificações da peça usinada por eletroerosão



Fonte: Ivaniski (2015)

Conforme Ramos (2016), a camada branca é resultado dos efeitos do aquecimento e resfriamento produzidos no processo de eletroerosão. Esta é a camada de maiores tensões residuais e possui elevada dureza, por esta razão, esta zona apresenta microfissuras. A zona da camada branca resulta da acumulação de Carbono, que é transferido do fluido dielétrico para a peça durante o processo de eletroerosão. Na composição desta camada, também existem materiais migrados da ferramenta. Esta camada é considerada uma danificação da superfície usinada, uma vez que o material desta zona difere consideravelmente do material inicial tanto na sua composição química como nas suas propriedades. Esta zona é de extrema importância uma vez que é nesta camada que são feitas as medições da rugosidade.

A zona termicamente afetada está situada logo abaixo da camada branca e é causada pelo calor irradiado pelo plasma, gerando transformações em sua estrutura e composição química. Para os aços pode ser dividida em duas camadas, sendo elas: a zona temperada e a zona revenida. A zona temperada ocorre devido a temperatura atingida nesta camada ser suficiente para ocorrer a austenitização durante o aquecimento. O arrefecimento rápido origina a zona revenida devido a formação de uma camada dura e frágil de martensita que é função da temperabilidade do aço utilizado.

O material base é a última camada e corresponde ao material da peça ao qual não sofreu alterações microestruturais devido ao efeito térmico do processo de eletroerosão, mantendo as características que possuía antes do processo de eletroerosão.

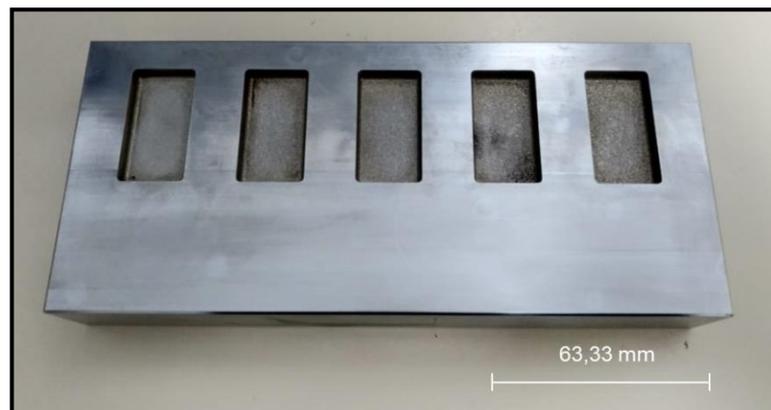
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais, equipamentos e estratégias utilizados para a realização do experimento.

3.1 MATERIAIS

O material utilizado para o desenvolvimento deste trabalho foi um bloco de aço especial para matrizes, AISI H13, que possui uma alta resistência a trincas por fadiga térmica; boas propriedades mecânicas; boa resposta ao tratamento térmico; pouco sensível a choques térmicos quando resfriados com água; boa resistência ao desgaste; boa usinabilidade e boa reprodutibilidade. Esse aço, conforme o catálogo da Schmolz+Bickenbach (2018), é fornecido no estado recozido com uma dureza de 230 HB (Brinell) e sua composição química é apresentada na tabela 1. Para o corpo de prova foi utilizado um bloco de H13 recozido que tinha as dimensões de 190 mm x 80 mm x 30 mm com todas as faces retificadas (figura 5).

Figura 5 – Corpo de Prova após Ensaio



Fonte: O próprio autor.

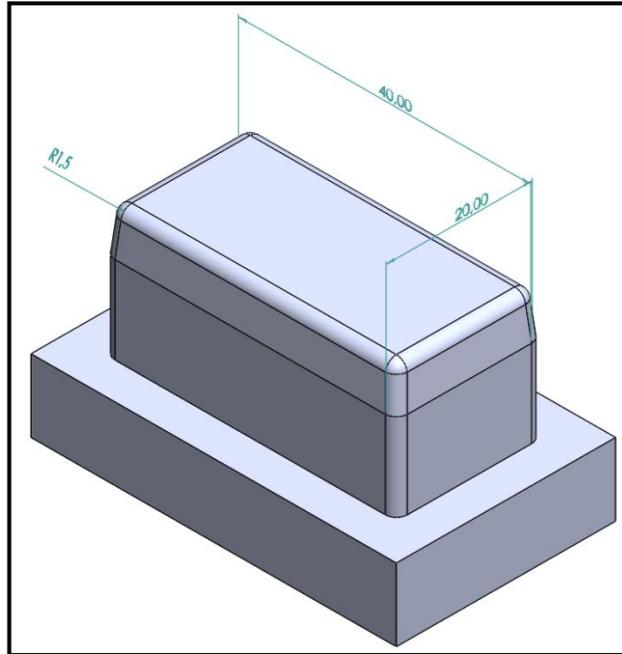
Tabela 1 – Composição Química do Aço AISI H13

<i>Composição</i>	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
<i>Química [%]</i>	0,4	1,0	0,4	5,3	1,4	1,0

Fonte: Schmolz+Bickenbach (2018)

Para ferramenta foi utilizado um eletrodo de cobre eletrolítico com 99,98% de pureza (Cu 99,98%), suas dimensões eram de 40 mm x 20 mm com raio de 1,5mm. (figura 6)

Figura 6 – Formato do Eletrodo



Fonte: O próprio autor.

Como fluido dielétrico foi utilizado óleo mineral para o isolamento do sistema e confinamento da descarga.

3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para a usinagem de eletroerosão por imersão da peça foi utilizado o equipamento AgieCharmilles Modelo FORM 30, que possui um sistema de cabeçote porta-eletrodo-ferramenta com movimento no eixo Z controlado por servo motor. Sua programação de operação é feita em um painel por meio de microprocessador, controlado por um teclado tipo joystick, display de cristal líquido para visualização de parâmetros de controle. A figura 7 representa o equipamento de eletroerosão utilizado.

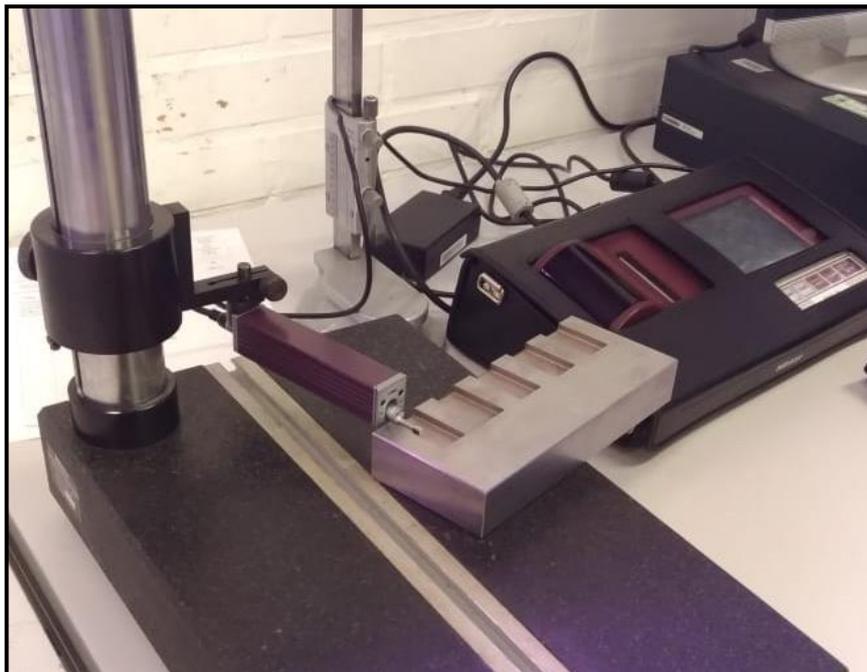
Figura 7 – Máquina de Eletroerosão por Penetração AgieCharmilles FORM 30



Fonte: O próprio autor.

Para avaliação da rugosidade da peça foi utilizado o rugosímetro da marca MITUTOYO SJ-301 (figura 8).

Figura 8 – Sistema de Medição de Rugosidade



Fonte: O próprio autor.

As imagens da textura bidimensional foram obtidas pelo Estereoscópio Trinocular com 20x de magnificação (figura 9).

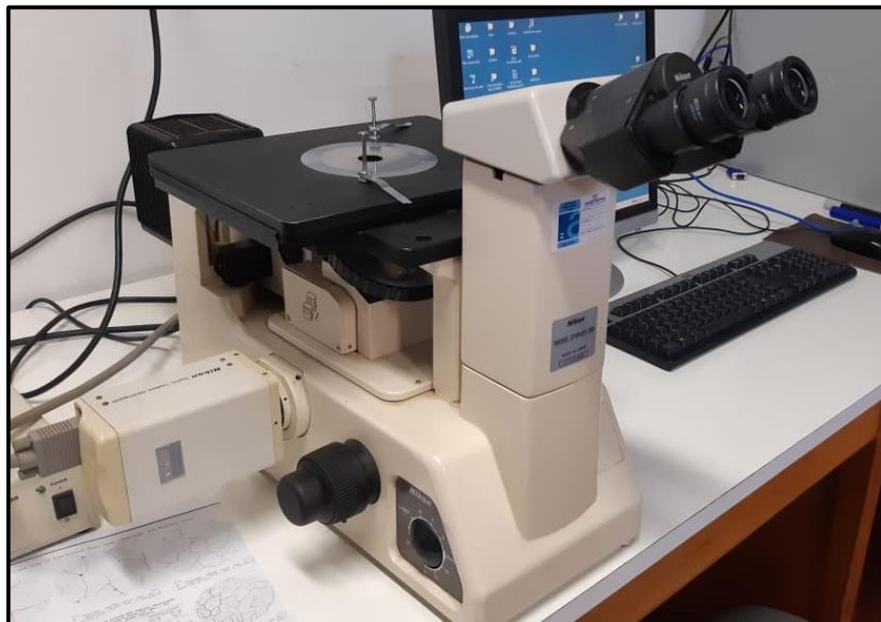
Figura 9 – Microscópio Estereoscópio Trinocular



Fonte: O próprio autor.

Para medição da espessura da camada branca da peça foi necessário se realizar o embutimento de cada uma das cavidades e o processo de lixamento e polimento. Para a visualização das amostras, foi feito ataque químico, usando Nital a 2%. O microscópio ótico Epiphot 200 foi utilizado para as avaliações (figura 10).

Figura 10 – Microscópio Ótico Epiphot 200



Fonte: O próprio autor.

Para medição do desgaste do eletrodo foi feita uma comparação dos eletrodos entre o eletrodo antes do processo e após o processo de eletroerosão, utilizado o Scanner 3D COMET L3D – 8M com uma lente de 75mm (figura 11). Essa lente de 75mm consegue captar um volume de medição de 190 mm^3 (80x60x40) e sua precisão é de $24\mu\text{m}$.

Figura 11 – Scanner 3D



Fonte: O próprio autor.

3.3 ESTRATÉGIA

3.3.1 Estratégia da Usinagem do Processo de Eletroerosão

O corpo de prova foi completamente submerso no fluido dielétrico junto ao bico de lavagem lateral. Foram realizadas 5 cavidades pela EDM, sendo alternado os parâmetros de corrente e tempo de descarga (T_{on}).

Os parâmetros apresentados na tabela 2 foram selecionados após ser analisado uma previsão de tempo de usinagem, acabamento e desgaste de eletrodo (tabela 3), onde se tinha uma rugosidade que aumentava com o aumento da intensidade da corrente e tempo de descarga, mas em contrapartida teve-se uma redução no tempo de processo.

Tabela 2 – Parâmetros da Usinagem por EDM

Cavidades	Profundidade [mm]	Corrente [A]	Ton [μs]	Toff [μs]	Tensão de Trabalho [Volt]
1	5	3	75	23	100
2	5	6	75	23	100
3	5	6	100	23	100
4	5	9	100	23	100
5	5	9	150	23	100

Fonte: O próprio autor.

Os valores previstos de tempo, rugosidade $R_{\text{máx}}$ e desgaste do eletrodo da tabela 3 foram retirados da tabela fornecida pelo manual de operação da máquina EDM-400 da Engemaq. (ANEXO A)

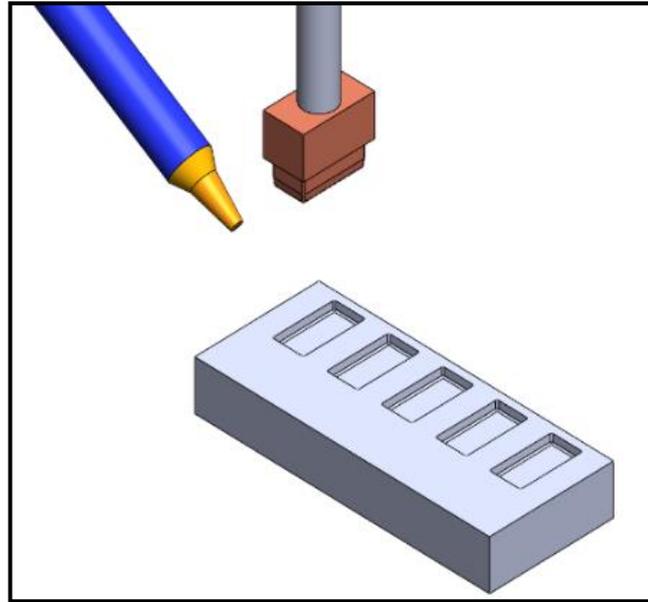
Tabela 3 – Previsão do Processo

Cavidades	Tempo Previsto [horas]	$R_{\text{máx}}$ Previsto [μm]	Desgaste Previsto [%]
1	14	16	0
2	3	20	1,2
3	3	23	0,8
4	2	28	1,2
5	2	32	0

Fonte: ENGEMAQ, 1987.

A tensão de trabalho foi de 100 V, a profundidade das cavidades foi de 5mm e o tempo de pausa entre as descargas (T_{off}) foi de 23μs para todas as cavidades. A figura 12 demonstra como foram dispostas cada cavidade na peça junto ao bico de lavagem.

Figura 12 – Disposição de cada Cavidade



Fonte: O próprio autor.

3.3.2 Estratégia da Análise da Qualidade Superficial

A análise da qualidade superficial do aço AISI H13 aconteceram na base da superfície e nas laterais, onde foi avaliado: a espessura da camada afetada e a rugosidade.

A rugosidade R_a , $R_{máx}$ e R_z foram obtidas pelo rugosímetro Mitutoyo SJ -301, sendo utilizado um cut-off de 2,5 mm (comprimento de amostragem) e $N=5$ (número de medições) para as medições na base da superfície e um cut-off de 0,8 mm e $N=5$ para as medições nas laterais, que são os parâmetros do comprimento usado para varrer mecanicamente as superfícies. Durante a varredura das superfícies, a ponteira responsável pela perfilometria é posicionada em cinco regiões distintas. Para a peça, foi considerado o sentido perpendicular ao do fluxo de lavagem para a realização das medições. Na figura 13 mostra os locais onde foram realizadas as medições do rugosímetro.

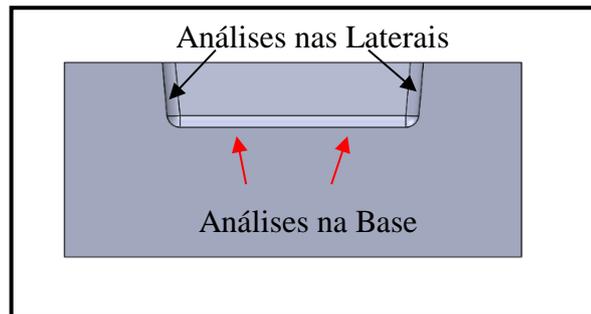
As imagens da espessura da camada afetada durante o processo de acabamento na usinagem pelo processo de EDM foram obtidas pelo microscópio ótico (MO). Para isso foi necessário o embutimento, que foi feito com baquelite, onde as amostras foram submetidas a processo de lixamento, utilizando lixas de água 220, 320, 400, 600, 1000 e 1200, respectivamente. Após o lixamento, as amostras passaram por um processo de polimento e sofreram um ataque químico, usando Nital 2%.

Foi analisado também o tempo do processo (t_p) para cada uma das cavidades, afim de conseguir fazer uma relação entre a qualidade superficial e o tempo de processo, sendo

calculado, também, a taxa de remoção do eletrodo (V_w), conforme equação (3), onde Vol é o volume em mm^3 , tomando como base que todas as cavidades tinham 40 de comprimento por 20 de largura e uma profundidade de 5 mm.

$$V_w [mm^3/min] = \frac{Vol [mm^3]}{t_{tp} [min]} \quad (3)$$

Figura 13 – Local onde foram realizadas as Medições



Fonte: O próprio autor.

3.3.3 Estratégia de Análise do Desgaste do Eletrodo

O desgaste foi obtido pelo Scanner 3D. Para isso foi necessária a utilização de um spray revelador, deixando a superfície do eletrodo coberta por um pó branco (figura 14). Para a utilização correta do spray é recomendado que o aerossol seja posicionado a uma distancia entre 20 a 30 cm da superfície. É importante salientar que o spray revelador é necessário para se realizar as medições, porem, pode ocasionar desvios nas medidas pelo fato de ampliar a camada da superfície.

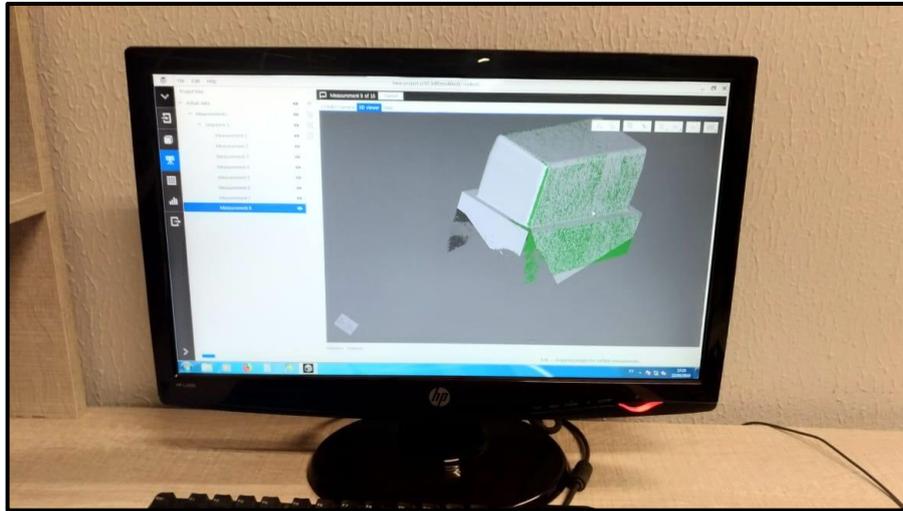
Figura 14 – Eletrodos após a utilização do spray revelador



Fonte: O próprio autor.

Após a utilização do spray revelador, o eletrodo foi colocado sobre uma mesa giratória, a qual é responsável por rotacionar a peça sobre ela para a leitura do scanner. Foi utilizado o software Colin3D para a obtenção do arquivo da peça escaneada (figura 15) e depois utilizado o software Inspect Plus para realizar a comparação.

Figura 15 – Tela Software Colin3D



Fonte O próprio autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem por finalidade apresentar os resultados obtidos no experimento, mostrando os efeitos ocasionados no aço AISI H13, no que se diz respeito à qualidade e integridade superficial, quando submetido ao processo de usinagem por descargas elétricas e os efeitos ocasionados no eletrodo de cobre, no que se diz respeito ao desgaste.

4.1 TEMPO DE PROCESSO

Após realizar-se cada cavidade, era verificado o tempo do processo na própria máquina. Após, foi calculada a taxa de remoção para cada cavidade. Esses dados podem ser vistos na tabela 4.

Tabela 4 – Tempo e Taxa de Remoção decorrentes do Processo

	Cavidade 1	Cavidade 2	Cavidade 3	Cavidade 4	Cavidade 5
Tempo	17h14min	04h22min	04h20min	02h34min	02h40min
Taxa de Remoção (mm³/min)	3,87	15,27	15,38	25,97	25

Fonte: O próprio autor

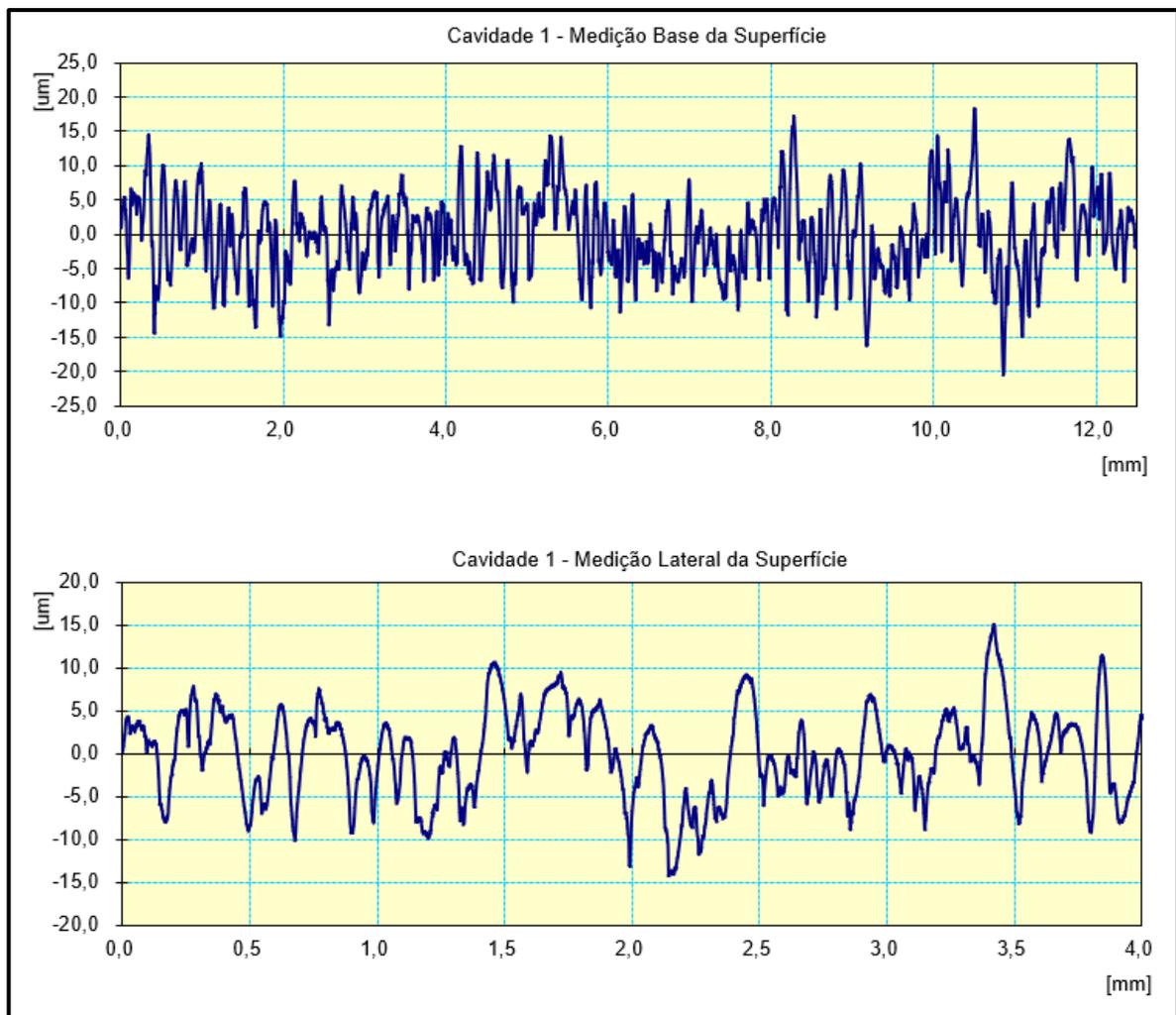
É observado na tabela 4 que devido ao aumento da corrente se obtêm melhores taxas de remoção, conseqüentemente, obtendo-se menores tempos de processo. Estes valores estão dentro do esperado, visto que, a energia fornecida ao sistema aumenta. Também é possível notar que o T_{on} não é algo que interfira diretamente no tempo de processo, em virtude de que, apesar de o aumento desse tempo para a cavidade 3 em relação a cavidade 2, não houve uma redução significativa, e ainda, havendo um aumento no tempo na cavidade 5 em relação a cavidade 4.

Segundo Ivaniski (2015), a erosão com baixa corrente causa um baixo rendimento de remoção. Complementando, Amorim (2002) explica que o pulso de descarga T_{on} tem uma grande contribuição para redução do tempo, devido ao sistema utilizar de forma mais eficiente a energia fornecida ao processo.

4.2 RUGOSIDADE DA PEÇA

Após a execução da usinagem foram medidas as rugosidades das cavidades. A rugosidade medida na peça usinada tem uma importante relevância na quantificação da qualidade de peças usinadas. Os indicadores utilizados para estudar e quantificar o perfil das superfícies obtidas no ensaio realizado foram a rugosidade Ra, Rz e Rmáx. Elas foram medidas na base e na lateral da superfície, conforme imagem 13, obtendo os perfis de rugosidade conforme figura 16. Na tabela 5 estão demonstrados os valores médios de cada uma dessas medições, para cada uma das cavidades usinadas.

Figura 16 – Perfil de Rugosidade



Fonte: LAMEC

Tabela 5 – Médias das Rugosidades

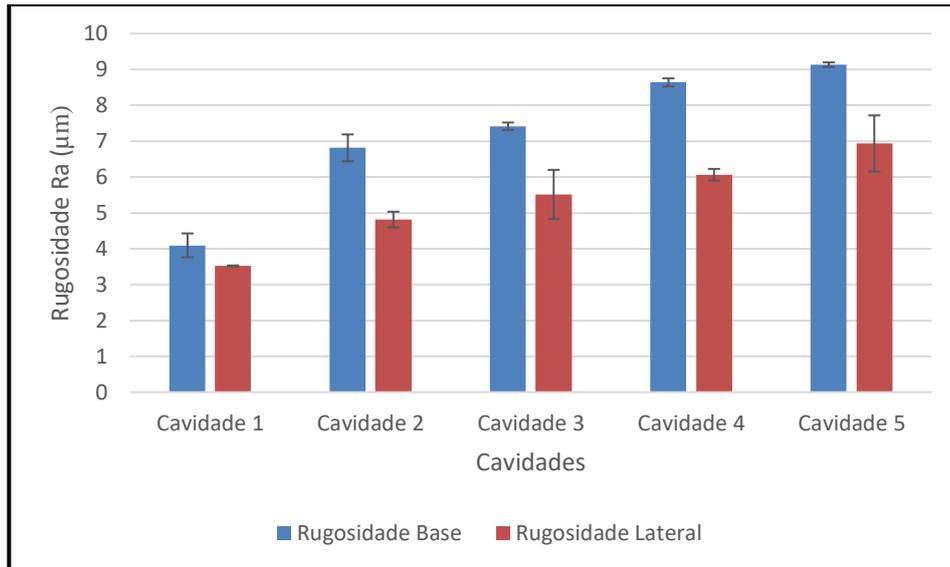
Cavidades	Rugosidades	Região de Análise	
		Base	Lateral
Cavidade 1	Ra	4,095	3,52
	Rz	26,87	18,705
	Rmáx	33,765	22,83
Cavidade 2	Ra	6,815	4,815
	Rz	41,41	26,11
	Rmáx	53,36	31,67
Cavidade 3	Ra	7,415	5,515
	Rz	47,005	29,075
	Rmáx	58,88	35,035
Cavidade 4	Ra	8,64	6,065
	Rz	52,4	28,515
	Rmáx	68,815	35,5
Cavidade 5	Ra	9,135	6,935
	Rz	53,815	31,905
	Rmáx	65,66	39

Fonte: O próprio autor.

O perfil da imagem 16 está dentro do esperado visto que o perfil da superfície gerada pela usinagem por eletroerosão são de crateras, assim tendo sucessivos picos e vales. Os valores médios das rugosidades Ra, Rz e Rmáx estão conforme a tendência esperada, devido ao fato de se obter valores que cresçam à medida que se aumentava os valores de corrente e tempo de descarga. Houve um aumento maior para as rugosidades da região da base da superfície devido ser a região que participa mais efetivamente da usinagem.

Os resultados obtidos da rugosidade Ra da peça mostram que houve uma influência significativa na mudança da intensidade da corrente. Entretanto, a mudança do pulso de descarga T_{on} , teve uma menor influência, visto que a rugosidade teve um aumento médio de $0,55\mu\text{m}$, enquanto para a mudança na intensidade da corrente se teve um aumento médio de $1,97\mu\text{m}$. Isto está demonstrado graficamente na figura 17.

Figura 17 – Gráfico da Rugosidade Ra

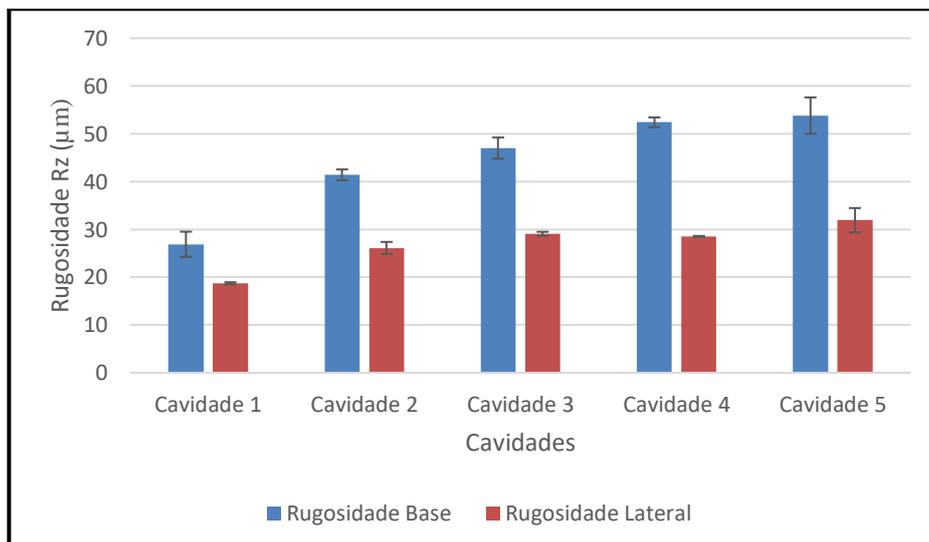


Fonte: O próprio autor.

Os resultados obtidos para a rugosidade Rz confirmam as afirmações realizadas para a rugosidade Ra, apresentando uma diferença maior para as cavidades onde houve mudança na intensidade da corrente, do que nas cavidades onde houve um aumento do tempo de descarga (figura 18).

A mudança nos valores se deve ao fato da rugosidade Ra calcular, através de um algoritmo, o comprimento médio entre os picos e os vales e o desvio da linha média em toda a superfície dentro do comprimento da amostragem, enquanto a rugosidade Rz é calculada medindo a distância vertical dos cinco picos mais altos e dos 5 vales mais profundos.

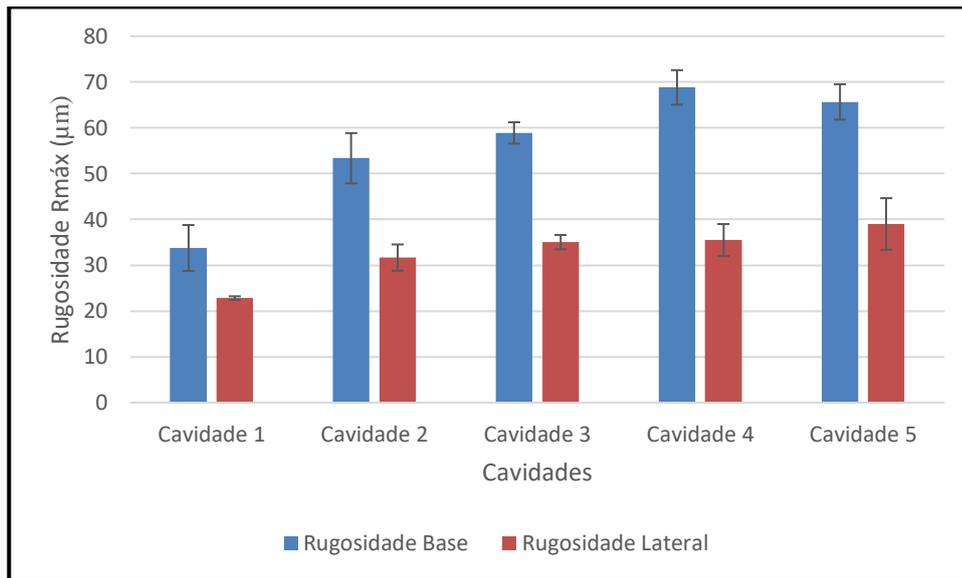
Figura 18 – Gráfico da Rugosidade Rz



Fonte: O próprio autor.

O valor de $R_{\text{máx}}$ é atribuído à maior distância entre o pico mais alto e o vale mais baixo no comprimento total da amostragem. Demonstrando assim que a intensidade de corrente é um dos parâmetros que mais afetou a rugosidade, dado que, com o aumento da corrente da cavidade 3 para a cavidade 4 houve um aumento da rugosidade. Caso que não acontece na cavidade 5, onde houve somente um aumento do tempo de descarga e ocorreu uma diminuição na rugosidade em relação a cavidade 4 (figura 19).

Figura 19 – Gráfico da Rugosidade $R_{\text{máx}}$



Fonte: O próprio auto.

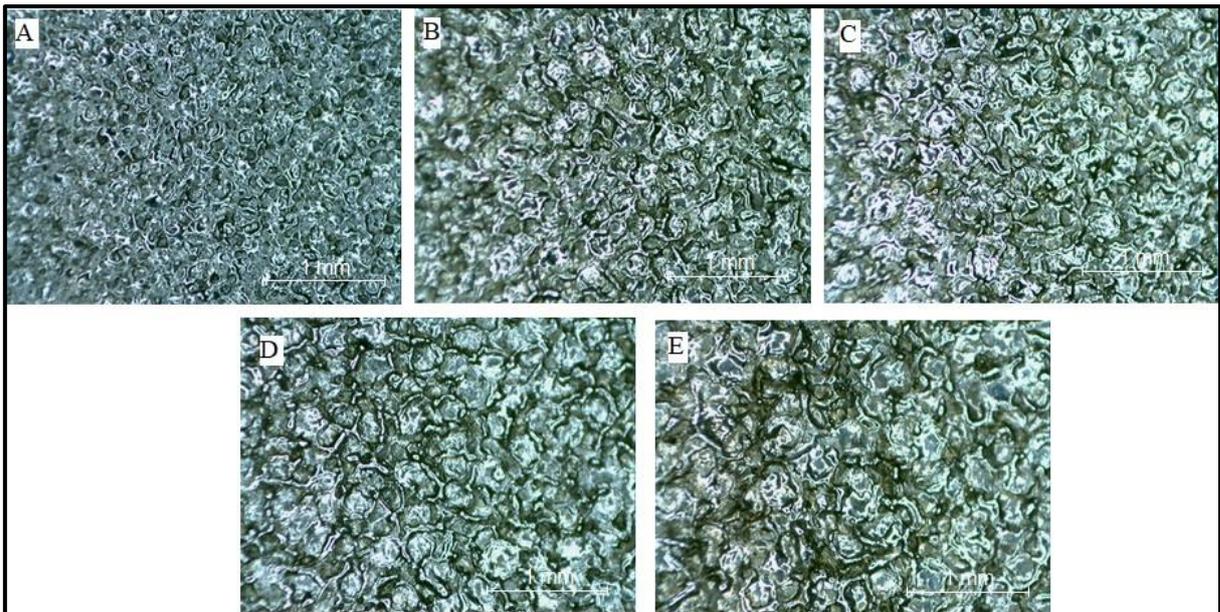
Os resultados para as rugosidades R_a , R_z e $R_{\text{máx}}$ aumentavam conforme a energia fornecida ao sistema era intensificada, assim, era esperado um aumento na rugosidade, partindo da cavidade 1 devido ao aumento dos parâmetros de corrente elétrica e tempo de descarga. Também é possível notar que a mudança da intensidade de corrente sempre teve um impacto maior do que a alteração do tempo de descarga.

Amorim (2002) afirma que conforme há o aumento do pulso de descarga, as rugosidades R_a e R_z apresentam um aumento gradual. Porém quando o aumento do pulso é muito elevado, a partir de $400\mu\text{s}$, essas rugosidades começam a apresentar pouca elevação.

4.3 TEXTURA DA PEÇA

Após a medição das rugosidades, foram obtidas fotografias da textura do aço AISI H13, utilizando o microscópio estereoscópio trinocular com ampliação de 20x. Estas imagens serão apresentadas na figura 20, onde para cada imagem um parâmetro diferente foi utilizado.

Figura 20 – Texturas Bidimensionais para diferentes Parâmetros de Acabamento



Fonte: O próprio autor.

A representação (A), é a textura do aço H13 usinado em condição de pulso de descarga T_{on} de 75 μ s e corrente de 3 Amperes. A imagem (B), representa o mesmo pulso de descarga T_{on} , porém com a corrente de 6 Amperes.

A textura apresentada na imagem (C) possui o pulso de descarga T_{on} de 100 μ s e corrente de 6 Amperes, diferente da imagem (D) que mantém o tempo de pulso de descarga T_{on} , porém alterando a corrente para 9 Amperes.

Na última condição de ensaio, a imagem (E) apresenta a textura com a corrente de 9 Amperes com T_{on} de 150 μ s. Lembrando que para todas as condições foi utilizado o mesmo tempo de pausa entre as descargas T_{off} de 23 μ s, mesma profundidade de 5mm e mesma tensão de trabalho de 100 Volts.

Esses resultados tem uma importante relevância na quantificação dos resultados obtidos na medição das rugosidades, por mostraram que as crateras formadas, devido ao processo de eletroerosão, são maiores quando se aumenta a corrente. Isso fica evidente na figura 20, onde o aumento dos parâmetros formou uma textura mais grosseira, comprovando os resultados obtidos na rugosidade. Os resultados obtidos com as texturas bidimensionais também mostram que o tempo de descarga elétrica causa um aumento na dimensão das crateras ocasionadas pelo processo.

Conforme Sabbo (2017), a dimensão das crateras formadas após a descarga depende da energia fornecida ao sistema. O perfil das superfícies analisadas é caracterizado por uma sucessão de picos separados por vales de diferentes dimensões. De forma a ser possível avaliar

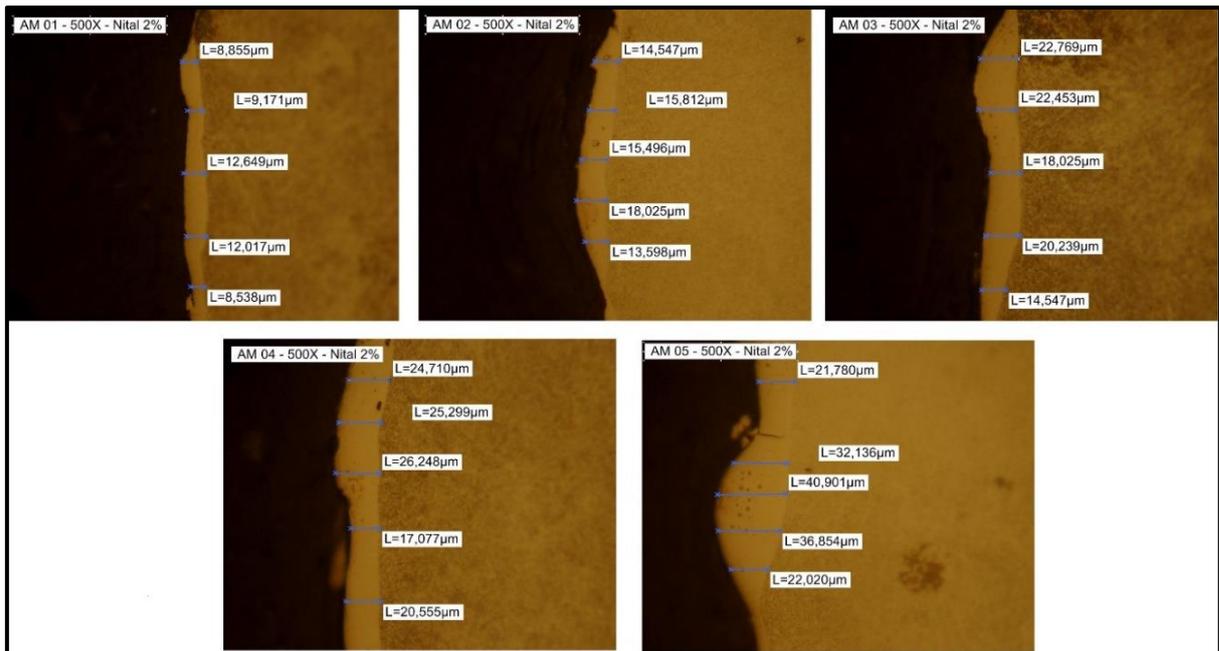
o perfil de superfície, através da sua altura, conforme análise da rugosidade e do seu espaçamento, conforme fotografias das texturas bidimensionais.

4.4 ESPESSURA DE CAMADA AFETADA

A análise da espessura de camada afetada é uma análise subsuperficial. Essa camada é gerada por transformações do material usinado causadas pelas seguidas descargas elétricas decorrentes do processo de usinagem por eletroerosão. Os resultados foram obtidos pelo microscópio ótico e foram medidas as espessuras de camada branca com o auxílio de um software. A figura 21 apresenta as imagens geradas com a utilização do software.

Foram traçadas cinco linhas horizontais, uma a partir do início da superfície da camada branca e outra na região de transição térmica (zona afetada pelo calor). Após esse procedimento, com o auxílio do software, pode-se medir a espessura dessas regiões e avaliar as espessuras de camada afetada geradas pelo processo.

Figura 21 – Fotografia da Subsuperfície das Amostras



Fonte: O próprio autor.

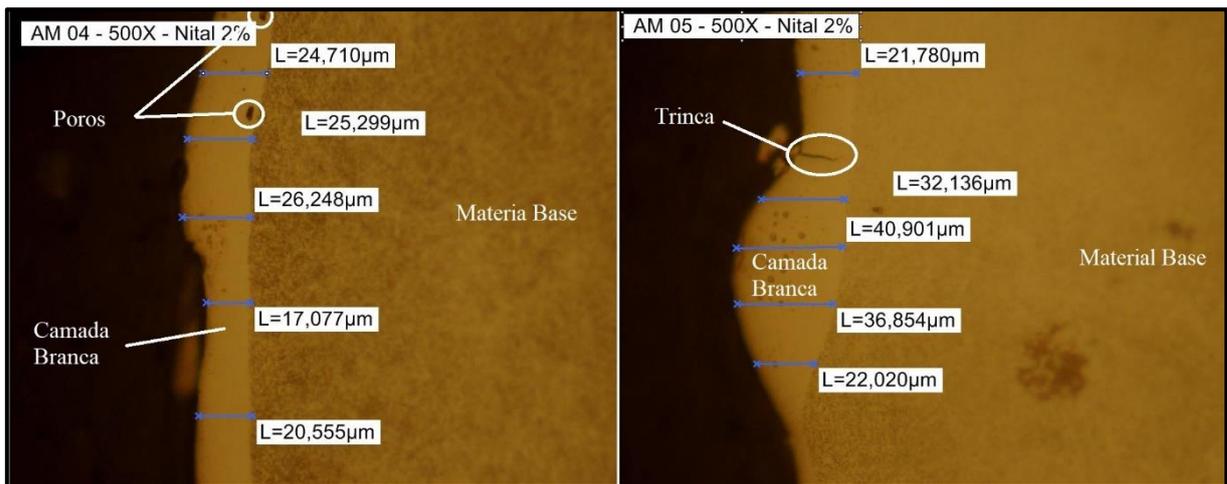
Para os resultados obtidos da espessura de camada afetada, conforme a figura 21, foi feita uma tabela com a média e o desvio padrão para cada cavidade (tabela 6).

Tabela 6 – Espessura Média de Camada Branca

	Cavidade 1	Cavidade 2	Cavidade 3	Cavidade 4	Cavidade 5
Espessura (μm)	10,246	15,496	19,607	22,778	30,738
Desvio Padrão	1,931	1,658	3,413	3,859	8,644

Fonte: O próprio autor.

Figura 22 – Fotografia da Presença de Poros e Microfissuras



Fonte: O próprio autor.

Analisando os resultados atingidos, observa-se que a variação do pulso de descarga T_{on} e o aumento da corrente causam um aumento na espessura da camada branca gerada. O aumento da espessura de camada branca representa um aumento na existência de poros e microfissuras (figura 22), fragilizando a região e podendo ocasionar uma propagação de trincas. Nesse caso o tempo de descarga elétrica causa um aumento maior nas espessuras de camada branca geradas no processo.

Lee e Tai (2003) destaca que conforme o aumento o regime de trabalho como pulso de descarga T_{on} , ocorre o aumento dessas espessuras. Relatam também que as densidades de trincas formadas pela tensão interna aumentam conforme a variação desse parâmetro.

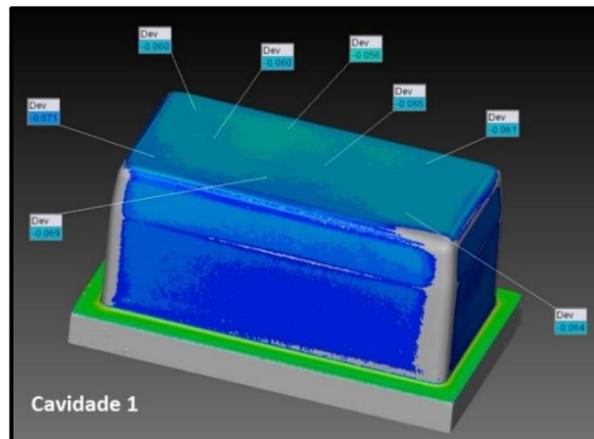
4.5 DESGASTE DO ELETRODO

Após a execução da usinagem foram escaneados os eletrodos utilizados, com o auxílio de um Scanner 3D. As técnicas utilizadas para a preparação dos eletrodos com o spray revelador

têm grande importância nos resultados obtidos, visto que o spray pode causar um aumento da superfície scaneada, por esse motivo buscou-se utilizar a mesma distância e mesmo tempo de exposição da superfície dos eletrodos ao spray revelador. Após a utilização do spray, os eletrodos foram escaneados e os arquivos gerados foram comparados com uma versão que não foi usinada, obtendo assim a diferença em milímetros dos dois arquivos. As imagens são apresentadas nas figuras 23 a 27, onde, para cada imagem, um eletrodo e um parâmetro diferente foi utilizado. O desgaste foi medido na parte inferior, visto que, conforme a literatura, a região onde ocorre o maior desgaste é a região que participa mais efetivamente da usinagem, apresentando certo nível de deformação nos cantos e em sua superfície frontal, caracterizados por pequenas ondulações.

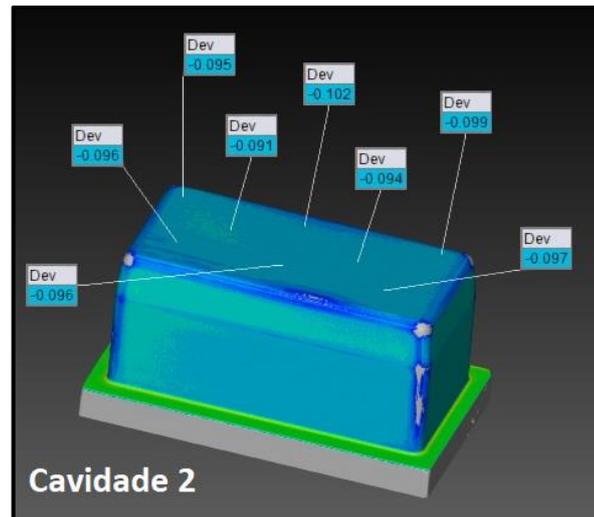
A média dos valores gerados e o desvio padrão estão apresentados na tabela 7.

Figura 23 – Desgaste do Eletrodo (Cavidade 1)



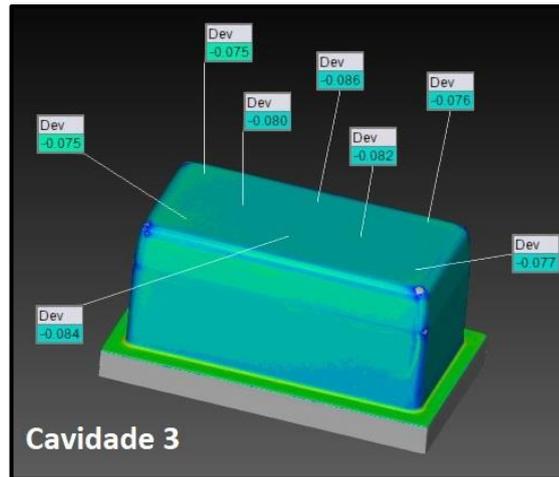
Fonte: O próprio autor.

Figura 24 – Desgaste do Eletrodo (Cavidade 2)



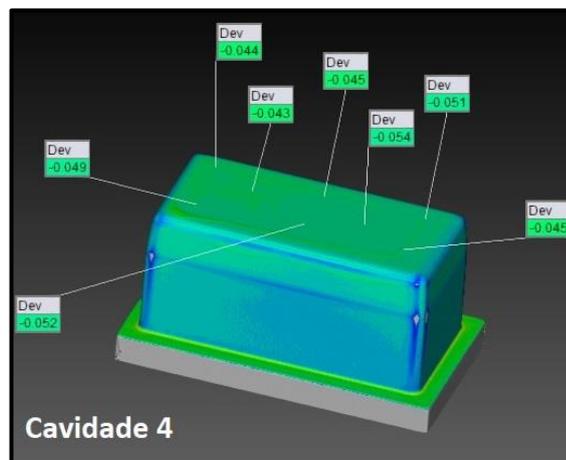
Fonte: O próprio autor.

Figura 25 – Desgaste do Eletrodo (Cavidade 3)



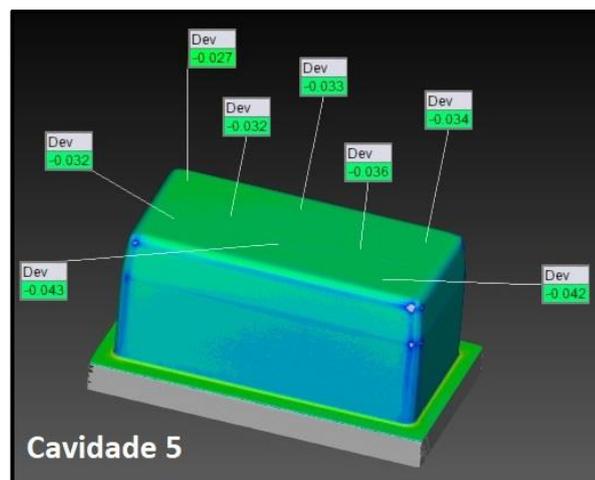
Fonte: O próprio autor.

Figura 26 – Desgaste do Eletrodo (Cavidade 4)



Fonte: O próprio autor.

Figura 27 – Desgaste do Eletrodo (Cavidade 5)



Fonte: O próprio autor.

Tabela 7 – Desgaste Médio para cada Cavidade

	Cavidade 1	Cavidade 2	Cavidade 3	Cavidade 4	Cavidade 5
Desgaste Médio (mm)	0,063	0,096	0,079	0,048	0,035
Desvio Padrão	0,005	0,003	0,004	0,004	0,005

Fonte: O próprio autor.

Os resultados para o desgaste dos eletrodos apresentados na tabela 7 condizem com a literatura, dado que houve um desgaste maior para as cavidades com maior intensidade de corrente e uma redução no desgaste quando se aumentava o tempo de descarga. Entretanto para a cavidade 4 houve uma divergência do resultado esperado, onde era esperado um aumento no desgaste em relação a cavidade 3.

Conforme Amorim (2002) afirma, a elevação da corrente de descarga eleva o desgaste, enquanto, a elevação da duração do pulso de descarga T_{on} diminui o desgaste.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, observou-se os efeitos da variação da corrente e do tempo de descarga (T_{on}) no aço AISI H13, após o processo de usinagem de eletroerosão por penetração, tendo como foco avaliar a relação entre o tempo de processo e a qualidade superficial por meio dos seguintes aspectos.

Observou-se que nas diferentes condições que foram realizadas, pode-se notar uma diminuição dos tempos e, conseqüentemente, um aumento nas taxas de remoção, sendo ocasionadas principalmente pelo aumento da intensidade da corrente, devido a energia fornecida ao sistema ser maior.

A rugosidade do aço AISI H13 foi investigada utilizando os parâmetros Ra, Rz e Rmáx. Foi possível notar uma variação significativa nestas rugosidades para o aço, devido à, principalmente, o aumento da intensidade da corrente. Entretanto, conforme a análise dos resultados e dados da literatura, pode-se notar que o aumento do pulso de descarga T_{on} também teve influência no aumento da rugosidade superficial da peça, contudo, quando há um aumento excessivo deste pulso, a rugosidade superficial começa a apresentar pouca elevação, podendo ocorrer a redução da profundidade das crateras. Isso pode ocorrer devido à estrutura formada pela camada branca ser uma superfície amorfa e homogênea, causada pela diminuição da eficiência da lavagem com fluido dielétrico na fenda de trabalho.

Na avaliação da textura, notou-se que quanto mais energia era fornecida ao processo (maior amperagem e maior tempo de descarga) maior eram as crateras geradas, comprovando o aumento da rugosidade.

A espessura de camada afetada foi analisada pelo microscópio ótico e medida com o auxílio de um software. Pode-se concluir que houve uma variação significativa na espessura da camada branca com o aumento da corrente e principalmente com o aumento do T_{on} .

O desgaste do eletrodo foi visto com o auxílio de um software de comparação, onde foi apresentado um desgaste que crescia quando se aumentava a corrente e decrescia com o aumento do tempo de duração de descargas elétricas T_{on} . Apesar disso foi encontrado uma incoerência em um dos resultados de uma das cavidades, onde o resultado esperado era um aumento no desgaste do eletrodo, visto que houve um aumento na intensidade da corrente.

Através desta investigação pode se concluir que o tempo de descarga elétrica tem uma grande influência dentro do processo, controlando principalmente o tempo de processo, a espessuras de camada afetada e o desgaste do eletrodo. A intensidade da corrente nas descargas elétricas também tem uma grande importância quanto ao rendimento do processo, rugosidade

da superfície gerada e o desgaste do eletrodo. Essas transformações causadas pela aplicação de diferentes parâmetros garantem a importância deste presente estudo.

6 TRABALHOS FUTUROS

Conforme as conclusões apresentadas e para a continuidade dos estudos desenvolvidos nesta linha de pesquisa, tem-se a necessidade de estudos mais detalhados sobre a combinação de parâmetros juntamente com as transformações físicas ocasionadas por estas combinações. A variação do parâmetro de tempo de pausa entre as descargas elétricas (T_{off}), ocasionando a alteração do Duty Time, é uma das linhas de pesquisa que podem gerar contribuições para os estudos desenvolvidos nesse trabalho.

Existem linhas de pesquisa que avaliam a qualidade superficial do material usinado, com diferentes materiais para o eletrodo e que trazem benefícios na qualidade superficial. Tornando-se uma linha de pesquisa interessante para continuidade e coleta de dados para este trabalho. Outras técnicas de avaliação como a microscopia eletrônica de varredura e a microdureza podem trazer dados que contribuem para esses resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, F.L., “Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga de Cobre CuBe para Ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos”, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, Brazil, 147f, 2002.

ARANTES, L. J. e SILVA, M., “**Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão**”, Artigo publicado na Revista Metalúrgica & Materiais, Minas, Ouro Preto, 56(2): 91-96, 2003.

BOLZ, R. Application of Additive Manufactured Tungsten Carbide Tool Electrodes in EDM. **Procedia CIRP**, v. 68, p. 86-90, 2018. ISSN 2212-8271.

BRALLA, J. G. **Handbook of Manufacturing Processes**. Industrial press, 2006. ISBN 0831131799.

CHARMILLES TECHNOLOGIES, Photos. <<http://www.agie-charmilles.com/>> Acessado em 2018.

CHIAVERINI, V., “**Processos de Fabricação e Tratamento**”, V2, São Paulo, McGraw-Hill, Brazil, pp.227-230, 1986.

CHIAVERINI, V., “**Materiais de Construção Mecânica**”, V3, São Paulo, McGraw- Hill, Brazil, pp.227-230, 1986.

CAMPOS, José Alexandre de. **Avaliação Experimental do Desgaste de Canto Durante o Processo de Eletroerosão do AISI H13**. 2014. 101 f. Dissertação de Pós-Graduação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

DROZDA, T. J. Tool and manufacturing engineers handbook: A reference book for manufacturing managers and technicians. v.14, Electrical Discharge Machining (EDM), 1998.

ENGEMAQ. **Manual de Operação EDM-400**. São Paulo, 1987. 121 p.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem de Metais**, São Paulo: Editora Edgard Blucher. 1970.

FLAÑO, O. Experimental Study on the Influence of Electrode Geometry and Electrode Path on Wear Pattern in EDM. **Procedia CIRP**, v. 68, p. 405-410, 2018. ISSN 2212-8271.

FULLER, J. E., “**Electrical discharge machining.**” 9th ed. Terre Haute: Joseph R. D., Metals Handbook Machining, v. 16, 1989.

GUITRAU, E. P. **The EDM Handbook**. Hansen Gardner Publications. Cincinnati , OH. 1997. 306p.

HAN, F.; KUNIEDA, M. **Development of parallel spark electrical discharge machining.**

Precision Engineering 28 p. 65–72. 2004.

HO, K. H.; NEWMAN, S. T. State of the art Electrical Discharge Machining (EDM). **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 13, p. 1287-1300, 2003. ISSN 0890-6955.

IVANISKI, T. M. **Avaliação da Integridade do Material AISI H13 e Cobre Eletrolítico Usinado através do Processo de Eletroerosão EDM**. 2015. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais). Universidade de Caxias do Sul, 2015.

IVANISKI, T. M.; ZEILMANN, R. P.; KEMPSKI, L.; ROCHA, A. S. Integridade Superficial do Aço AISI H13 Usinados por EDM na Fabricação de Matrizes de Conformação a Quente. **71º Congresso Annual da ABM**, 2017. ISSN 1516-392X-27716.

KIYAK, M.; ÇAKIR, O. **Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel**. Journal of Materials Processing Technology 191 p. 141–144. 2007.

KLOCKE, F. Manufacturing Processes 2—Grinding. **Honing, Lapping**, Springer, 2009.

KOBAYASHI, K. “**The present and future developments of EDM and ECM, ISEM.**” In: International symposium for electromachining, 11., 1995.

KONIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia de fabricação volume 3**. Tradução de Walter Lindolfo Weingaertner. 1997.

LEE, H.T.; TAI, T.Y., “**Relationship between EDM parameters and surface crack formation**”, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan, 2003.

MCGEOUGH, J. A., “**Advanced methods of machining**”. London: Chapman and Hall, 1988.

OLINIKI, R. **Influência da Combinação entre os Parâmetros de Usinagem por Eletroerosão na Integridade Superficial do Aço AISI H13 Temperado e Revenido**. 2009. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Manufatura). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

OLIVEIRA, C. J.; **Avaliação da Influência de Sistemas de Filtragem Aplicados a Topografia de Superfície em Usinagem**, 2004. 123f. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG

OLIVEIRA, J. M.; **Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas Para Produção de Moldes e Matrizes**. Dissertação (Mestrado em Materiais). Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, p.110, 2006.

RAMOS, G. F. S., **Efeito da Maquinagem por Eletroerosão no Comportamento à Fadiga do Aço AISI D2**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade do Porto, Porto, 2016.

SABBO, J. N. B. M., **ANÁLISE DO ESTADO SUPERFICIAL DE AÇOS NO**

PROCESSO DE ELETROEROSÃO. 2017. 74 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Metalúrgica). Universidade do Porto, Porto, 2017.

SCHMOLZ+BICKENBACH, AISI H13. < https://www.schmolz-bickenbach.com.br/fileadmin/files/schmolz-bickenbach.com.br/documents/FICHAS_TECNICAS/Thermotur_2344.pdf> Acessado em 2018.

SILVA, N. H., “**Usinagem de furos de pequenos diâmetros na liga de titânio Ti6Al4v em máquina de eletroerosão por penetração**”, Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica). Pontifícia Universidade Católica, Curitiba, Brazil, 2006.

SIMAO, J.; LEE, H.G.; ASPINWALL, D. K.; DEWES, R. C.; ASPINWALL, E. M. **Workpiece surface modification using electrical discharge machining.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 p 212-128. 2003.

TARNG, Y. S.; MA, S.C.; CHUNG, L. K. **Determination of optimal cutting parameters in wire electrical discharge machining.** Int. J. mach. Tools Manufact. Vol. 35. No. 12 p. 1693-1701. 1995.

TSAI, H.C.; YAN, B.H.; HUANG, F.Y. **EDM performance of Cr/Cu-based composite electrodes.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 p. 245–252. 2003.

VAN DIJCK, F. et al. **Some results of physical research in EDM.** In: International symposium for electromachining, 4, 1974, Bratislava. Proceedings, Bratislava: [s.n.], [1974?]. 1 v.

WURZEL, C. A. Estudo para a fabricação de eletrodos por metalurgia do pó e desenvolvimento de parâmetros de eletroerosão com ligas de cobre-nióbio. 2015. 109 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [S.l.], 2015.

ZEILMANN, R. P. et al. Estudo da Qualidade Superficial de Cavidades Eletroerodidas em Aço. 2011.

ZEILMANN, R. P.; BORDIN, F. M.; VACARO, T. Surface integrity of electrodischarge machined cavities for different depths and radii. **The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2015. ISSN 1678-5878.

ZEILMANN, R. P.; VACARO, T.; ZANOTTO, F. M.; CZARNOBAY, M., Metallurgical alterations in the surface of steel cavities machined by EDM. **Matéria (Rio J.)**, v. 18, n.4, p. 1541-1548, 2013. ISSN 1517-7076.

ANEXO A – TABELA COBRE/AÇO ENGEMAQ

Figura 28 – Tabela Testes Cobre/Aço Cav. 1 e 2

ELETRODO : Cobre (eletrolítico)
 PEÇA : Aço
 POLARIDADE DO ELETRODO: +
 TENSÃO : 100 V

VALORES ESTABELECIDOS			RUGOSIDADE DE REMOÇÃO DE MATERIAL TAXA DE DESGASTE			SUBDIMENSIONAMENTO 2 gs = 2 GAP SIDE (mm)				CONDIÇÕES DE TESTE		
TUM µs	POT. TS	TOFF Pos.	Rmax. µm	Vw mm ³ /min	VV %	PRESSÃO		SUCCÃO		Vmin Volts	Iav Amp.	ÁREA cm ²
						2gs máx.	2gs	2gs máx.	2gs			
75	1	22	16	5	-	0,155	0,090	0,138	0,073	38	2,5	5
75	2	22	20	24	1,2	0,185	0,103	0,169	0,088	39	5,5	5
75	3	23	24	43	2,1	0,211	0,116	0,195	0,099	36	8,5	5
75	4	23	26	60	3,7	0,222	0,120	0,206	0,103	33	12	10
75	5	23	29	79	5,4	0,249	0,130	0,233	0,113	32	15	10
75	6	23	32	112	7	0,275	0,139	0,260	0,123	30	19	10
75	7	23	34	128	9,5	0,285	0,142			30	21	10
75	8	23	36	144	12	0,294	0,145			30	24	10
75	9	23	37	168	13	0,307	0,151			30	27	10
75	10	23	38	192	14	0,320	0,156			30	30	10
75	11	23	39	204	15	0,329	0,159			30	33	10
75	12	23	40	216	16	0,337	0,162			30	37	10
75	13	23	42	256	17	0,344	0,165			30	39	10
75	14	23	43	296	17	0,351	0,168			30	42	15
75	15	23	45	316	18	0,173	0,173			30	45	15
75	16	23	46	332	18	0,376	0,177			30	48	15
75	17	23	47	352	18	0,381	0,179			30	51	15
75	18	23	48	368	18	0,386	0,180			30	55	15
75	19	23	50	386	19	0,396	0,184			31	57	15
75	20	23	51	400	20	0,406	0,188			31	59	15

Fonte: ENGEMAQ, 1987

Figura 29 – Tabela Testes Cobre/Aço Cav. 3 e 4

POLARIDADE DO ELETRODO : +
TENSÃO : 100 V

VALORES ESTABELECIDOS			RUGOSIDADE DE MATERIAL REMOÇÃO DE MATERIAL TAXA DE DESGASTE			SUBDIMENSIONAMENTO 2 gs = 2 GAP SIDE (mm)			CONDIÇÕES DE TESTE			
TON μs	POT. TS	TOFF Pos.	Rmax. μm	Vw mm ³ /min	vV %	PRESSÃO		SUÇÃO		Vmin Volts	Iav Amp.	ÁREA cm ²
						2gs máx.	2 gs	2gs máx.	2 gs			
75	21	23	53	424	20	0,411	0,190			31	61	25
75	22	22	54	442	21	0,416	0,191			30	64	25
75	23	22	54	460	21	0,435	0,194			31	68	25
75	24	22	54	480	21	0,454	0,197			31	72	25
100	1	22	19	3,5	-	0,172	0,096	0,156	0,080	36	2,5	5
100	2	22	23	22	0,8	0,203	0,110	0,189	0,096	38	6	5
100	3	23	28	37	1,2	0,237	0,124	0,223	0,110	35	9	5
100	4	23	30	62	1,3	0,254	0,132	0,242	0,120	35	12	10
100	5	23	33	87	2,7	0,278	0,139	0,266	0,127	32	15	10
100	6	23	35	112	4	0,301	0,146	0,289	0,134	30	19	10
100	7	23	37	128	6,5	0,316	0,152			30	22	10
100	8	23	38	144	9	0,330	0,157			30	26	10
100	9	23	40	172	10	0,345	0,163			30	29	10
100	10	23	42	200	11	0,360	0,168			30	32	10
100	11	23	45	216	12	0,371	0,172			30	35	10
100	12	23	47	232	13	0,381	0,175			30	38	10
100	13	23	48	272	13	0,392	0,179			30	40	10
100	14	23	49	312	13	0,402	0,182			30	43	15
100	15	23	51	328	14	0,414	0,187			30	46	15

Figura 30 – Tabela Testes Cobre/Aço Cav. 5

ELETRODO : Cobre (eletrolítico)
 PEÇA : Aço
 POLARIDADE DO ELETRODO : +
 TENSÃO : 100 V

VALORES ENTABULADOS			RUGOSIDADE REMOÇÃO DE MATERIAL TAXA DE DESGASTE			SUBDIMENSIONAMENTO 2 gs = 2 GAP SIDE (mm)			CONDIÇÕES DE TESTE			
T _{ON} μs	POT. TS	TOFF Pos.	R _{max} μm	V _w mm ³ /min	vV %	PRESSÃO		SUÇÃO		V _{min} Volts	I _{av} Ampr.	ÁREA cm ²
						2gs máx.	2 gs	2gs máx.	2 gs			
100	16	23	52	344	15	0,425	0,191			30	50	15
100	17	23	53	360	15	0,434	0,194			30	53	15
100	18	23	54	376	15	0,443	0,197			30	56	15
100	19	23	56	396	15	0,452	0,200			31	59	15
100	20	23	58	416	16	0,461	0,203			31	62	25
100	21	23	59	436	16	0,465	0,204			31	65	25
100	22	23	59	456	16	0,469	0,205			30	69	25
100	23	23	60	476	16	0,478	0,209			31	72	25
100	24	23	61	496	16	0,487	0,212			31	76	25
150	2	22	26	16	-	0,223	0,121	0,208	0,106	38	6,5	5
150	3	23	32	36	-	0,261	0,136	0,245	0,121	35	9,5	5
150	4	23	35	62	0,8	0,279	0,145	0,266	0,132	33	13	10
150	5	23	38	87	1,8	0,305	0,153	0,292	0,140	32	16	10
150	6	23	40	12	2,8	0,331	0,161	0,318	0,147	30	19	10
150	7	23	42	32	4,8	0,347	0,167			30	23	10
150	8	23	44	152	5,5	0,363	0,173			30	26	10
150	9	23	46	176	6,4	0,380	0,179			30	29	10
150	10	23	48	200	7,3	0,396	0,185			30	33	10
150	11	23	51	216	8,2	0,408	0,198			300	36	10
150	12	23	54	232	9	0,419	0,193			30	39	10

Fonte: ENGEMAQ, 1987