

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE SANTA CATARINA – CÂMPUS GERALDO WERNINGHAUS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO
MECÂNICA**

**PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DE SUPERFÍCIE EM PROCESSOS
DE ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO**

RENATO BERNARDES PINHO

JARAGUÁ DO SUL

2016

RENATO BERNARDES PINHO

**PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DE SUPERFÍCIE EM PROCESSOS
DE ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de fabricação mecânica do Câmpus Geraldo Werninghaus do Instituto Federal de Santa Catarina para obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: Gabriel Costa Sousa

JARAGUÁ DO SUL

2016

P654p Pinho, Renato Bernardes

Produtividade e qualidade de superfície em processos de eletroerosão por penetração / Renato Bernardes Pinho ; orientador Gabriel Costa Sousa. – Jaraguá do Sul, SC, 2016.

66 f.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Santa Catarina.
Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica. 2. Eletroerosão. 3. Planejamento. 4. Dimensionamento. 5. Eletrodo. 6. Usinagem I. Sousa, Gabriel Costa. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica. III. Título.

CDD 620.1

Catalogado por: Karla Viviane Garcia Moraes – CRB14/1002

PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DE SUPERFÍCIE EM PROCESSOS DE
ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO

RENATO BERNARDES PINHO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Tecnólogo em Fabricação
Mecânica e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 23 de setembro de 2016.



Gabriel Costa Sousa

Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador



Fernando Henrique Gruber Colaço

Mestre em Engenharia Mecânica



Tiago da Silva

Mestre em Engenharia Mecânica

RESUMO

A usinagem por eletroerosão é um processo não convencional de usinagem usado em larga escala no meio industrial, principalmente nas atividades com materiais de alta dureza ou com geometrias complexas. Nesse processo, a remoção de material ocorre sem contato entre as partes envolvidas, chamadas de eletrodo-peça e eletrodo-ferramenta. O material é removido no momento em que as descargas elétricas são aplicadas nos eletrodos, ocasionando o seu aquecimento e vaporização. Durante o processo, alguns defeitos podem ocorrer, variando de acordo com os parâmetros de usinagem. Os defeitos mais comuns são: alta rugosidade, falhas na integridade superficial, alteração morfológica do material, erros no dimensional de usinagem e, também, a formação de camada branca. Esses defeitos, na maioria das aplicações do processo de eletroerosão, precisam ser evitados, pois sua propagação pode provocar a quebra prematura da peça usinada. Assim, dada a sua importância, esse trabalho consiste em estudar uma forma de planejar as dimensões do eletrodo-ferramenta e a profundidade de usinagem adequada para operações de desbaste e acabamento, a fim de obter uma superfície livre de defeitos. Além disso, esse planejamento foi feito com base nas informações fornecidas pelo fabricante da máquina de eletroerosão utilizada na realização dos ensaios, tornando possível a utilização dessa metodologia por outros usuários do mesmo equipamento. No intuito de garantir a confiabilidade das informações fornecidas pelo fabricante, foram realizados ensaios para comparação dos resultados teóricos e práticos. Esses ensaios possibilitaram realizar pequenas alterações nos dados do manual para que ficassem condizentes com os resultados práticos. Após a realização dos ensaios foram usados diversos equipamentos para análise dos resultados, entre eles: projetor de perfil, rugosímetro, microscópio, estereoscópio e medidor de forma. A realização das análises trouxe resultados que ajudaram a definir quais informações do manual eram confiáveis e quais precisariam ser adaptadas para utilização no planejamento de fabricação do eletrodo e no processo de usinagem. Assim, foram elaboradas equações que utilizam dados fornecidos no manual do equipamento que permitem calcular o diâmetro do eletrodo-ferramenta e a profundidade de usinagem para operações de desbaste e acabamento.

Palavras chave: Eletroerosão. Planejamento. Dimensionamento. Eletrodo. Usinagem.

ABSTRACT

The machining by EDM is a non-conventional machining process used on a large scale in the industrial environment, mainly in activities with high hardness materials or with complex geometries. In this process, the removal of material takes place without contact between the parties involved, called of electrode-workpiece and electrode-tool. The material is removed when the electrical charges are applied to the electrodes, causing your heating and vaporization. During the process, some defects may occur, varying according to the parameters of machining. The most common faults are: high roughness, surface integrity failures, morphological change of material, dimensional machining errors and, also, the formation of white layer. These defects, in most applications of EDM, need to be avoided, because its spread can lead to premature breakage of machined piece. So, given its importance, this academic work consists of studying a way to plan the dimensions of electrode-tool and machining depth suitable for roughing and finishing operations, in order to obtain a surface free of defects. This planning was done on the basis of the information provided by the manufacturer of the EDM machine used in conducting the tests, making it possible to use this methodology for other users of the same equipment. To ensure the reliability of the information provided by the manufacturer, the tests were carried for comparison of the theoretical and practical results. With the tests made it possible to perform small changes on the data of the manual to be consistent with the practical results. After conducting the tests were used various equipment for analysis of results, among them: profile projector, roughness tester, microscope, stereoscope and meter shape. The realization of the analysis results that helped to define what information in the manual were unreliable and which would need to be adapted for use in the planning of the electrode manufacturing and machining process. Finally, equations have been developed using data provided in the instruction manual of the equipment to calculate the diameter of the electrode-tool and machining depth for roughing and finishing operations.

Keywords: Electrical discharge machining. Planning. Sizing. Electrode. Machining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo do circuito Lazarenko	16
Figura 2 - Representação simplificada do processo de eletroerosão por penetração	17
Figura 3 - Esquema de usinagem por descargas elétricas	17
Figura 4 - Série de pulsos de corrente típicos da EDM.....	18
Figura 5 - Negativo do eletrodo usinado na peça	19
Figura 6 - Esquema dos elementos construtivos de um equipamento EDM.....	20
Figura 7 - Fases da descarga elétrica no processo de EDM	23
Figura 8 - Perfil de rugosidade pelo parâmetro Ra.....	29
Figura 9 - Perfil de rugosidade pelo parâmetro Rz.....	29
Figura 10 - Micrografia do aço apresentando as camadas geradas na superfície do material após o processo de EDM	30
Figura 11 - Formação de poros e micro trincas na zona da camada branca	31
Figura 12 - Desenho representativo do eletrodo-ferramenta	32
Figura 13 - Procedimento de abertura de rosca	33
Figura 14 - Usinagem das cavidades pretendidas, número dos programas utilizados e área planejada para fixação do eletrodo-peça	36
Figura 15 - Local e sentido aplicado nas medições da rugosidade.....	37
Figura 16 - Rugosímetro TESA Rugosurf 20	38
Figura 17 – Projetor de perfil utilizado para obtenção das dimensões da cavidade.....	38
Figura 18 - Método de medição do diâmetro da cavidade	39
Figura 19 - Método de medição usado para obtenção da inclinação, raio e profundidade	40
Figura 20 - Demonstração dos pontos utilizados para medição dos diâmetros.....	41
Figura 21 - Representação do eletrodo após a usinagem.....	42
Figura 22 - Medidor de forma RA-1600	42
Figura 23 - Perfil de análise dos defeitos de usinagem	44
Figura 24 - Associação entre parâmetros de usinagem e rugosidade Ra.....	46
Figura 25 - Fotos das superfícies usinadas	47
Figura 26 - Comparação entre alteração do gap de trabalho e taxa de remoção	50
Figura 27 - Relação entre tempo total de pulso e desgaste do eletrodo-ferramenta.....	51

Figura 28 - Dados de corrente de trabalho e desgaste do eletrodo para 1 hora de Ton.....	52
Figura 29 - Fotos laterais dos perfis usinados	54
Figura 30 - Superfície do ensaio 104, aumento de 400x	55
Figura 31 - Superfícies com maior espessura de camada branca para cada ensaio, aumento de 400x	56
Figura 32 - Representação das variáveis usadas no cálculo para eletrodo de desbaste.....	58
Figura 33 - Representação das variáveis usadas no cálculo para eletrodo de acabamento	59
Figura 34 - Variáveis utilizadas no cálculo da profundidade de usinagem, visão lateral da usinagem (vista lateral).....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química percentual do aço AISI H13	27
Tabela 2 - Combinação entre regimes de usinagem e números dos programas ensaiados	35
Tabela 3 – Informações disponibilizadas no manual da máquina para os programas.....	35
Tabela 4 - Parâmetros dos programas utilizados e resultados de rugosidade Ra	45
Tabela 5 - Parâmetros dos programas utilizados e resultados da taxa de remoção	48
Tabela 6 – Comparação entre dados fornecidos em catálogo e ensaios realizados.....	49
Tabela 7 – Dados referentes ao desgaste do eletrodo obtidos nos ensaios.....	50
Tabela 8 - Valores de desgaste frontal dos eletrodos-ferramenta.....	52
Tabela 9 - Parâmetros de usinagem, resultados da inclinação e arredondamento de canto	53
Tabela 10 - Dados de raios formado durante os ensaios e taxa de remoção de material	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI - American Iron and Steel Institute

CB - Espessura da Camada Branca

cm - Centímetros

CNC - Comando Numérico Computadorizado

Dea - Diâmetro do Eletrodo de Acabamento

Ded - Diâmetro do Eletrodo de Desbaste

DN - Diâmetro Nominal da Cavidade

EDM - Elctrical Discharge Machining

g - Grama

G - Gap de Trabalho

ISO - International Organization for Standardization

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

min - Minuto

mm - Milímetro

MR - Material Removido

PG - Tempo Entre Pulsos

PI - Corrente de Trabalho

PN - Profundidade Nominal da Cavidade

Pp - Profundidade Programada

PW - Duração do Pulso

RC - Relaxation Circuit

RPM - Rotações por Minuto

T - Tempo

Ton - Tempo de descarga

TRM - Taxa de remoção de material

VDI - Verein Deutscher Ingenieure

Vw - Taxa de remoção de material

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1.	Questão de pesquisa.....	13
1.2.	Justificativa	13
1.3.	Objetivo geral	14
1.4.	Objetivos específicos	14
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1.	Usinagem por descargas elétricas (EDM)	15
2.1.1.	Generalidades do processo de usinagem por descargas elétricas.....	15
2.1.2.	Detalhamento do processo de usinagem por descargas elétricas	16
2.1.3.	A máquina de eletroerosão	19
2.1.4.	Parâmetros do processo de usinagem por eletroerosão	21
2.1.5.	Fases da descarga elétrica no processo de EDM.....	22
2.1.6.	Fluido dielétrico	23
2.1.7.	Eletrodo-ferramenta.....	25
2.1.7.1.	Material	25
2.1.7.2.	Desgaste.....	26
2.2.	Matéria prima do eletrodo-peça.....	27
2.3.	Aspectos de avaliação após o processo.....	27
2.3.1.	Características de rendimento do processo	27
2.3.2.	Acabamento da superfície usinada	28
2.3.3.	Formação de camadas	30
2.3.4.	Formação de micro trincas e poros.....	31
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1.	Métodos, materiais e técnicas	32
3.1.1.	Fabricação do eletrodo-ferramenta.....	32
3.1.2.	Fabricação do eletrodo-peça.....	34
3.1.3.	Procedimento Experimental	34
3.1.4.	Método de análise dos resultados.....	36
3.1.4.1.	Análise da rugosidade	36
3.1.4.2.	Análise do dimensional da cavidade	38
3.1.4.3.	Análise do GAP de trabalho.....	40
3.1.4.4.	Análise do desgaste do eletrodo-ferramenta	41

3.1.4.5. Análise da taxa de remoção de material da peça.....	43
3.1.4.6. Análise da formação de micro trincas, poros e camada branca.....	43
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	45
4.1. Parâmetro de rugosidade Ra	45
4.2. Taxa de remoção de material	47
4.3. Gap lateral.....	49
4.4. Desgaste do eletrodo-ferramenta	50
4.5. Inclinação lateral.....	53
4.6. Arredondamento de canto	54
4.7. Camada branca.....	55
4.8. Dimensionamento do eletrodo-ferramenta	57
4.9. Definição da profundidade de usinagem.....	59
5. CONCLUSÃO.....	62
REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

A indústria metalmeccânica assume um papel importante no cotidiano de todos, uma vez que atua no segmento de transformação de metais em produtos, bens e serviços utilizados em larga escala, direta ou indiretamente, por empresas, prestadores de serviços e consumidores finais.

Esse ramo da indústria tem como processos de usinagem mais conhecidos os chamados “convencionais”, como torneamento, fresamento, furação, etc. Embora sejam muito utilizados na indústria, esses processos apresentam algumas limitações e, assim, surge a necessidade da utilização dos processos de usinagem chamados de “não convencionais”.

Ao contrário dos processos convencionais, que se utilizam do cisalhamento por ferramentas de corte para remoção do material, nesse processo são utilizadas fontes de energia alternativas, como laser, plasma, reações químicas e eletroquímicas, entre outras.

Nesse segmento destaca-se a usinagem por descargas elétricas, que é conhecida como eletroerosão. A usinagem é realizada em uma máquina própria, com a utilização de um eletrodo-ferramenta - responsável pela geometria da usinagem, um eletrodo-peça - que irá sofrer a erosão causada pelas descargas elétricas, e o fluído dielétrico - responsável pelo isolamento entre os eletrodos e pela solidificação das partículas erodidas.

Este é um processo que se popularizou rapidamente após sua invenção, pois proporciona maior facilidade na usinagem de materiais de elevada dureza e possibilita a confecção de peças com geometrias complexas e dimensões reduzidas, o que torna seu uso quase indispensável em diversas aplicações (EL-HOFY, 2005).

Todavia, embora possibilite usinagens de maior precisão, diversas são as variáveis que influenciam nos resultados obtidos com a usinagem, motivo pelo qual o processo é considerado de alta complexidade. E essa complexidade torna necessário o pleno conhecimento de todos os componentes do processo, assim como suas características e funções, a fim de que se possa utilizar as variáveis da forma mais adequada a atingir o resultado pretendido.

Além desses parâmetros e variáveis, também existem diversos aspectos que devem ser analisados após a usinagem para estudos do processo e aferição de resultados. Nesse momento, os aspectos que tem maior importância são a taxa de remoção, a qualidade superficial obtida e o desgaste dos eletrodos.

Porém, para que sejam alcançados resultados satisfatórios nestes aspectos, outros

pontos provenientes do processo precisam ser avaliados, como a contaminação do eletrodo-ferramenta e do fluido dielétrico, a formação de camada branca, micro trincas e poros nos eletrodos.

Diante dessas considerações, esse trabalho se desenvolve mediante a realização de testes de usinagem por eletroerosão, o estudo bibliográfico da matéria e a análise científica dos resultados obtidos para cada uma das situações testadas, de modo a se buscar a definição dos parâmetros mais adequados a determinados tipos de usinagem e resultados pretendidos.

1.1. Questão de pesquisa

Em virtude dessa problemática, identificou-se a necessidade de um estudo pesquisando dados mais concretos em relação aos parâmetros dos diversos regimes de usinagem encontrados no manual da máquina de eletroerosão por penetração usada no IFSC – Campus Geraldo Werninghaus (Agie Charmilles SP1), buscando estabelecer, assim, os parâmetros necessários para que se obtenha o resultado esperado. A partir disso definiu-se a questão central da pesquisa da seguinte forma: Como os parâmetros de referência informados no manual da máquina podem ser aplicados para se obter os melhores resultados (produtividade, custo e acabamento) no processo de usinagem?

1.2. Justificativa

Atualmente a indústria metalmecânica faz uso de diversos processos de fabricação para obtenção de determinados produtos ou componentes. Esses processos possuem condições de aplicação e resultados específicos, sendo necessário ter conhecimento sobre as diversas formas de usinagem, bem como a definição do produto a ser fabricado, para definir o processo a ser utilizado na sua fabricação. O atendimento à qualidade do produto especificada no projeto, a durabilidade do ferramental de fabricação e o custo para alcançar tais resultados são características determinantes para a escolha do processo a ser utilizado em cada caso.

Todavia, embora esses critérios sejam de suma relevância, eles não são os únicos a serem avaliados quando da definição do procedimento a ser adotado, tendo em vista que há outros fatores que também podem influenciar na escolha do processo de fabricação, como a dureza do material, a complexidade da geometria da peça e a qualidade da superfície usinada. Nesses casos, normalmente se destacam os processos não convencionais de usinagem como

sendo mais eficientes (OLINIKI, 2009).

O processo de eletroerosão por descargas elétricas se destaca nesse campo da usinagem como sendo um dos mais aplicados na indústria, o que resulta em estudos constantes para seu desenvolvimento e aprimoramento, a fim de alcançar melhores resultados no produto final.

Devido à grande variedade de parâmetros que influenciam no processo de usinagem, os estudos realizados até o momento ainda não conseguem desmembrá-los em todos os seus pormenores, de modo que não se atingiu uma base sólida para a definição de todos os procedimentos, de forma a garantir os resultados necessários a cada aplicação.

Cabe destacar que até mesmo nos manuais das máquinas mais novas utilizadas nesse processo não existe um dado quantitativo dos resultados que serão obtidos, como taxa de remoção de material e qualidade da superfície usinada.

A pesquisa que será realizada constituirá em uma fonte para realização de novos estudos, onde poderão ser aplicados os parâmetros estabelecidos com outras variáveis do processo. Além disso, como a máquina utilizada na pesquisa é amplamente aplicada na indústria, o estudo também terá relevância nessa área, sendo que a definição dos parâmetros de usinagem irá ocasionar um aumento de produtividade.

1.3. Objetivo geral

Esta pesquisa possui como objetivo principal desenvolver uma metodologia de seleção correta dos parâmetros de usinagem pré-estabelecido no manual da máquina de eletroerosão, obtendo os resultados desejados. Para fins de análise dos referidos parâmetros, tem-se como objeto a realização de testes sobre uma superfície metálica de aço AISI H13 mediante a repetição de usinagens utilizando diversos programas de usinagem.

1.4. Objetivos específicos

A realização dos testes descritos no tópico anterior tem como função o alcance dos objetivos específicos, os quais se encontram abaixo listados:

- a) comparar dados dos ensaios com informações do manual da máquina de eletroerosão;
- b) verificar o grau de confiabilidade dos dados do manual;
- c) estabelecer relações entre os dados práticos e teóricos;
- d) desenvolver um método de planejamento adequado do processo de usinagem.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Diversos são os fatores que influenciam no funcionamento e no resultado da usinagem por eletroerosão, os quais devem ser devidamente conhecidos para que o trabalho de conclusão do curso possa ser desenvolvido de forma correta e eficaz, atingindo, por via de consequência, resultados mais específicos. Assim, de modo a tomar conhecimento de todos esses fatores e fundamentar o projeto de forma concreta, foi necessário o estudo bibliográfico em livros, artigos e dissertações, no intuito de que toda informação necessária fosse efetivamente utilizada no desenvolvimento do trabalho.

2.1. Usinagem por descargas elétricas (EDM)

Nesta seção será apresentado um breve histórico sobre o processo de eletroerosão e suas vantagens, bem como o detalhamento de funcionamento e os componentes que fazem parte do mesmo.

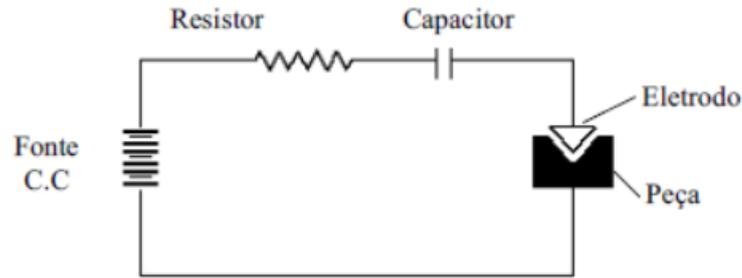
2.1.1. Generalidades do processo de usinagem por descargas elétricas

O processo de eletroerosão por descargas elétricas é também chamado de “usinagem por eletroerosão”, sendo, ainda, bastante conhecido na indústria pela sua sigla inglesa “EDM” (Electrical Discharge Machine). Esse processo teve seu primeiro registro em 1900, quando Kohlschutter fez uso de descargas elétricas para produzir pó metálico coloidal (SCHUMACHER, 1989).

Embora tenha sido criado há diversos anos, o processo de usinagem passou a ser aplicado de forma mais rentável apenas durante o período da primeira e segunda guerras mundiais, quando um casal de cientistas russos, B. R. e N. I Lazarenko, conseguiu diminuir a lacuna entre a peça de trabalho e o eletrodo-ferramenta, de modo a reduzir a formação de arco.

Após o aprimoramento dos procedimentos pelo casal russo, o processo foi melhorado com o uso de geradores de pulso, técnicas de movimento planetário e orbital, controle numérico de computador (CNC) e os sistemas de controle adaptativo, para que se tornasse mais eficaz (EL-HOFY 2005). Na figura 1 é possível compreender melhor o funcionamento do circuito de relaxação (RC), conhecido como “circuito Lazarenko”.

Figura 1 - Esquema representativo do circuito Lazarenko



(KONIG; KLOCKE, 1997, p.113)

Na área industrial, o primeiro processo não convencional de usinagem a se popularizar foi a eletroerosão por penetração, tomando grande importância na fabricação de moldes. O uso desse processo possibilitou que geometrias que não podiam ser usinadas pelos métodos convencionais (como torneamento, fresamento e retificação) fossem facilmente reproduzidas (KOBAYASHI, 1995).

A partir de então, o processo foi sendo aprimorado e, atualmente, as máquinas de eletroerosão por penetração são fabricadas com geradores de pulso em que podem ser controladas a duração do pulso da tensão e a descarga elétrica. Assim, torna-se possível que os parâmetros de controle possam ser estabelecidos com uma grande variedade (SILVA, 2006).

Segundo El-Hofy (2005), a eletroerosão por penetração é um procedimento que apresenta inúmeras vantagens em relação aos processos convencionais de usinagem, sendo essencial na fabricação de determinados produtos. Entre suas principais vantagens estão:

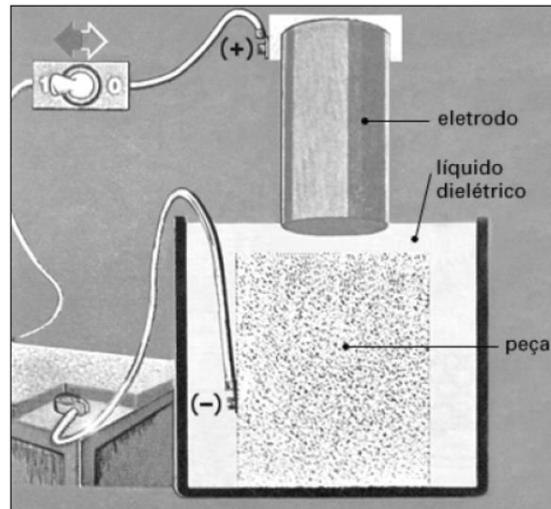
- a) cavidades com paredes ou ferramentas finas podem ser produzidas sem risco de quebrar;
- b) possibilidade de usinagem de superfícies complexas;
- c) a dureza do material usinado afeta menos o processo do que na usinagem convencional;
- d) o processo é livre de rebarbas.

2.1.2. Detalhamento do processo de usinagem por descargas elétricas

O processo de usinagem por descargas elétricas consiste basicamente na remoção de material através da erosão provocada entre dois eletrodos (peça e ferramenta), separados por um dielétrico líquido. Isso possibilita a produção de furos, ranhuras, rebaixos e diversas

geometrias complexas, as quais, nos processos convencionais, seriam difíceis ou até mesmo impossíveis de serem produzidas (SILVA, 2006). Na figura 2 é mostrada uma representação simplificada dos componentes que fazem parte do referido processo:

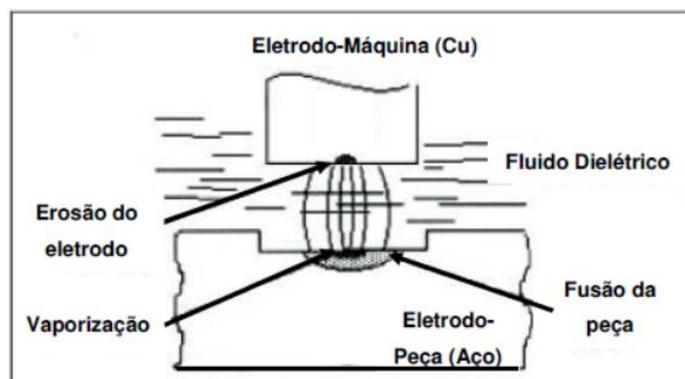
Figura 2 - Representação simplificada do processo de eletroerosão por penetração



(PENTEADO; GASPAR, S/D, p.54)

As descargas elétricas de alta intensidade geram temperaturas extremamente altas entre os eletrodos, resultando na remoção de material pelo derretimento e evaporação desses componentes. Nesse procedimento, há uma maior remoção de material na peça do que no eletrodo-ferramenta, pois ele é fabricado com um material mais resistente ao desgaste, bem como pelo fato de estar ligado ao polo positivo. Na figura 3, abaixo, é possível entender melhor o processo descrito.

Figura 3 - Esquema de usinagem por descargas elétricas

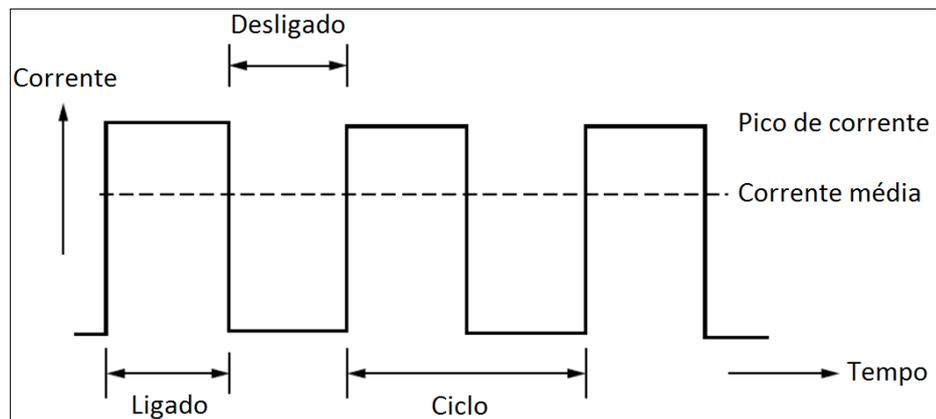


(LIMA; CORREA, 2006, p 28)

No processo de usinagem são aplicados pulsos de tensão entre os dois eletrodos na faixa de 20 a 120V e com frequências próximas a 5 kHz. Esses eletrodos são separados por um pequeno intervalo, chamado de “fenda de trabalho” (ou *gap*, em inglês), que normalmente possui a distância de 0,01 e 0,5 mm (EL-HOFY, 2005).

A descarga elétrica ocorre entre os dois eletrodos, ânodo e catodo, e é produzida por corrente contínua de pulsação controlada. O ânodo é ligado ao polo positivo e normalmente é o eletrodo-ferramenta, enquanto que o catodo é a peça usinada, ligada ao polo negativo. Na maioria dos casos a ligação é feita dessa maneira, mas pode ser invertida de acordo com o material a ser usinado (FULLER, 1989). Na figura 4 pode ser observada a relação entre corrente e tempo no processo de eletroerosão:

Figura 4 - Série de pulsos de corrente típicos da EDM

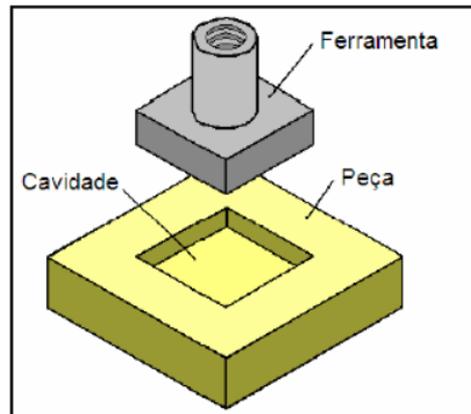


(EL-HOFY 2005, tradução nossa)

Essas descargas elétricas produzem calor, que pode variar entre 10.000 °C e 50.000 °C, provocando, assim, a fusão e a vaporização do eletrodo-peça. O resultado da atuação dessas altas temperaturas é a remoção de pequenas partículas, deixando-o com pequenas crateras.

Através da usinagem obtém-se um negativo do eletrodo-ferramenta na superfície do eletrodo-peça, como pode ser observado na figura 5 (VAN DIJCK, 1974).

Figura 5 - Negativo do eletrodo usinado na peça



(ENGEMAQ, 2002, p. 95)

O material removido da superfície da peça é liberado no fluido dielétrico, que o retira da área de usinagem através de seu fluxo, deixando a superfície limpa para a continuidade do processo. Além disso, ele promove o resfriamento da área usinada e das partículas que se soltam. Ambas as funções são importantes para que o material removido não se prenda novamente à peça, o que formaria áreas de acabamento inferior.

Outra função bastante relevante do fluido é isolar eletricamente os eletrodos. O período em que o fluido promove esse isolamento é chamado de “tempo de ionização”. Todavia, com a aproximação dos eletrodos e o aumento da tensão elétrica, o fluido torna-se condutor, o que ocasiona o aparecimento de faíscas. Logo após a faísca o fluido torna-se um isolante elétrico novamente (SILVA, 2006).

2.1.3. A máquina de eletroerosão

Segundo El-Hofy (2005), existem três componentes que são considerados os principais da máquina de eletroerosão, quais sejam: unidade servo controlada de avanço da ferramenta, fonte de alimentação de pulsos de tensão e unidade de circulação dielétrica.

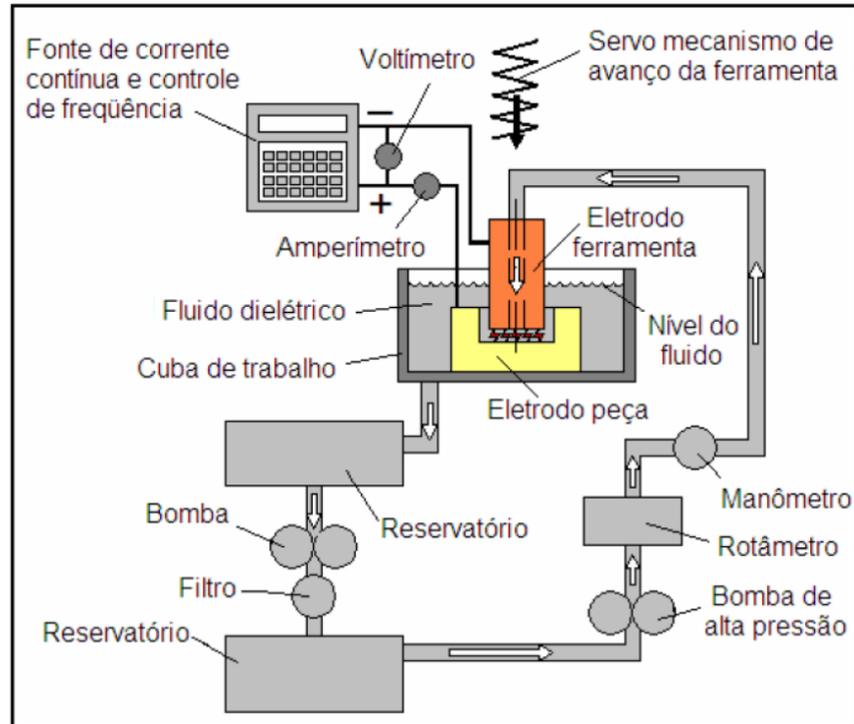
A unidade servo controlada de avanço da ferramenta é responsável por manter o GAP constante durante a usinagem, garantindo, assim, as descargas ativas entre os dois eletrodos.

A fonte de alimentação garante o fornecimento pré-determinado de pulsos em uma tensão, de corrente, de tempo ligado e de tempo desligado.

E, por fim, a unidade de circulação dielétrica realiza o processo de filtragem do dielétrico e libera o fluido para remoção de detritos. A seguir, na figura 6, está uma

demonstração desses principais componentes e os demais que compõem a máquina de eletroerosão.

Figura 6 - Esquema dos elementos construtivos de um equipamento EDM



(BENEDICT, 1987. p. 93)

A máquina de eletroerosão por penetração também pode ser dividida em três sistemas básicos: mecânico, elétrico e dielétrico (SILVA, 2006), os quais podem ser observados na figura 6.

O sistema mecânico é responsável pelo movimento dos eletrodos peça e ferramenta, sendo dividido em três elementos: a) a mesa de trabalho onde o eletrodo é fixado, que possui movimentação nos eixos X e Y, b) servo mecanismo de avanço e posicionamento do eletrodo-ferramenta, sendo responsáveis pelo movimento realizado no eixo Z, bem como por manter a fenda de trabalho adequada entre os eletrodos e c) estrutura da máquina. As máquinas atuais também possuem a possibilidade de inclinação do cabeçote em relação ao eixo Z.

O sistema elétrico é formado pelo gerador de pulsos estáticos, pelos cabos de alimentação de energia e pelo sistema de controle de avanço do eletrodo-ferramenta.

O sistema dielétrico é composto pelo reservatório, cuba de trabalho e moto bomba: a) o reservatório é o local onde o fluido dielétrico fica armazenado após a filtragem; b) a cuba de trabalho é onde ocorre o processo de usinagem; c) a moto-bomba é responsável por transportar

o fluido dielétrico contaminado da cuba de trabalho para o filtro, assim como por levá-lo do reservatório até a cuba de trabalho.

2.1.4. Parâmetros do processo de usinagem por eletroerosão

É indispensável que os parâmetros de maior influência sejam compreendidos de forma minuciosa, tornando possível a otimização do processo de usinagem através de sua manipulação. Dentre os parâmetros do processo de usinagem por eletroerosão, configuram-se como os principais: material do eletrodo-ferramenta, eletrodo-peça e fluido dielétrico (CRUZ, 1989).

Os principais parâmetros elétricos de controle do processo de EDM (tensão e corrente da descarga elétrica) são estabelecidos na norma VDI 3402 de 1990, que determina a combinação desses como meios para determinar o regime de usinagem (AMORIM, 2002).

A variação desses parâmetros de usinagem tem efeito direto sobre os principais fatores considerados fundamentais na avaliação dos resultados, quais sejam:

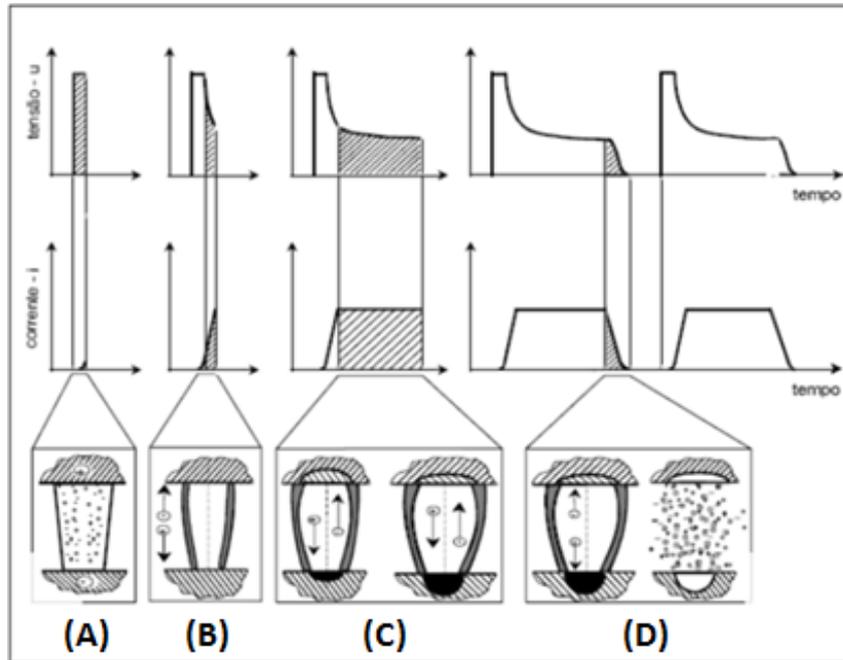
- a) taxa de remoção do material (TRM): é basicamente definida como o volume de material removido da peça durante as descargas elétricas, sendo diretamente ligada à qualidade de usinagem. Para se obter uma alta taxa de remoção de material é necessário aumentar a corrente empregada na usinagem, o que ocasiona maior erosão e perda na qualidade de acabamento da peça (EL-HOFY, 2005);
- b) desgaste relativo: é o percentual dado pela razão entre o desgaste volumétrico relativo entre os eletrodos peça e ferramenta. Tem-se como critérios determinantes para que se atinja um bom desgaste relativo: as propriedades físicas e químicas dos materiais usados para confecção dos eletrodos-ferramenta, sendo que o ponto de fusão do material é a principal característica a ser considerada nesse caso (PANDEY, 1985);
- c) sobrecorte lateral: o sobrecorte lateral é a diferença entre os raios do eletrodo-ferramenta e o furo usinado na peça. O regime de usinagem é tido como um fator determinante para controle do sobrecorte lateral;
- d) rugosidade: são as irregularidades de superfície resultantes da ação inerente do processo de fabricação, importando em áreas relativamente separadas por pequenos espaços na parte onde o processo foi realizado (SINGH, 2006).

2.1.5. Fases da descarga elétrica no processo de EDM

Segundo Amorim (2002), a divisão do fenômeno da descarga elétrica no processo de EDM pode ser dividida em quatro fases, conforme descrito abaixo e mostrado na figura 7:

- a) fase de ignição da descarga: nessa fase o fluido dielétrico ainda mantém os eletrodos isolados, sem passagem de corrente elétrica. Com a aproximação do eletrodo-ferramenta à peça de trabalho ocorre um aumento no campo elétrico, ocasionando a liberação de elétrons e íons positivos do fluido dielétrico, que são direcionados ao catodo. Essa aproximação é feita até pouco antes da fenda de trabalho;
- b) em detrimento da fase anterior ocorre um superaquecimento e a consequente evaporação de uma pequena quantidade de fluido dielétrico. Nessa fase há um aumento da corrente elétrica, importando em perda de resistência no dielétrico. Todavia, antes que a tensão atinja o ponto de ruptura desse fluido, são formados os túneis transportadores de energia para o ânodo e para o catodo. E quando a corrente elétrica atinge o nível definido pelo operador (nos parâmetros da máquina), ela fica restrita à superfície do canal de descarga, concentrando-se em uma seção mínima e formando o canal de plasma;
- c) fusão e evaporação de material nos eletrodos: durante a aplicação da descarga elétrica a fenda de trabalho deve ter sua amplitude mantida, a fim de evitar a formação de arcos e curto circuitos. Essa descarga forma pequenas poças de material líquido em ambos os eletrodos e apenas uma parte desse material líquido é vaporizado;
- d) ejeção de material fundido: posteriormente ao encerramento da descarga especificada, a corrente elétrica é interrompida, fazendo com que o canal de plasma deixe de existir e, nesse momento, o material fundido se desprenda das paredes da cavidade (isso porque o material fundido se mantém junto à cavidade devido à alta pressão do plasma). Após se desprender da cratera, o material é carregado para fora da área de usinagem pelo fluxo do fluido dielétrico. Entretanto, antes que o fluido possa limpar o local, algumas porções do material acabam se solidificando junto à cratera ou a outras partes da peça, implicando na formação de uma superfície chamada de “camada branca”.

Figura 7 - Fases da descarga elétrica no processo de EDM



(KONIG; KLOCKE, 1977, p. 32)

2.1.6. Fluido dielétrico

O fluido dielétrico tem grande importância no processo de usinagem por eletroerosão, uma vez que suas características podem afetar o funcionamento do sistema e os resultados da usinagem de diversas maneiras. Para que um fluido dielétrico tenha um bom rendimento existem algumas características que devem ser consideradas como obrigatórias, a exemplo da viscosidade adequada, alto ponto de ebulição, boa estabilidade de oxidação, baixo odor e com alta resistividade elétrica (EL-HOFY, 2005).

Entre as principais funções do fluido destacam-se as seguintes:

- retirar as partículas erodidas da área de usinagem;
- isolar o eletrodo e a peça de trabalho;
- arrefecer as superfícies aquecidas durante as descargas elétricas.

Segundo Kern (2009), existem inúmeros tipos de fluidos dielétricos no mercado com grande variação nas suas propriedades e no custo, podendo-se destacar o querosene, os óleos sintéticos e os óleos à base de silicone.

O querosene foi o primeiro fluido dielétrico a se popularizar junto ao processo de EDM, justamente porque possuía uma baixa viscosidade, o que melhorava seu fluxo dentro do sistema, além de ter um custo baixo em relação a outros fluidos. Por isso foi usado durante

muito tempo como o principal dielétrico na indústria. Todavia, com o passar do tempo algumas desvantagens foram identificadas, fazendo com que o querosene caísse em desuso. Os motivos que fizeram o querosene deixar de ser usado foram os seguintes: baixo ponto de ebulição, odor, alta volatilidade e as reações cutâneas que eram provocadas durante o manuseio.

Atualmente os fluidos dielétricos mais usados são os óleos sintéticos formulados especificamente para a eletroerosão, uma vez que possuem uma grande gama de propriedades que auxiliam positivamente nesse processo.

Os óleos sintéticos são utilizados como substituto ao óleo refinado do petróleo, tendo sido criados para fornecer propriedades químicas e mecânicas superiores às encontradas nos óleos minerais. O aprimoramento desses dielétricos trouxe uma grande evolução nas suas propriedades, implicando em algumas vantagens de crucial importância, quais sejam: maior tempo de vida, menor volatilidade e evaporação, odor extremamente baixo e com menores riscos à saúde e segurança do operador.

Contudo, embora possuam propriedades de grande eficácia para o processo de eletroerosão, os óleos sintéticos não podem ser utilizados em todas as aplicações, como é o caso da indústria aeroespacial, uma vez que a ação do solvente do óleo não é tolerada pelos materiais. Assim, considerando que eles não podem ser utilizados nessas operações e nem mesmo se pode utilizar os óleos minerais, para a indústria aeroespacial utiliza-se o óleo à base de silicone, que tem ótimo rendimento como fluido dielétrico. Sua única desvantagem em relação aos óleos sintéticos é o custo elevado, o que ocasiona seu uso apenas em casos específicos.

A aplicação do fluido adequado a cada tipo de operação é de suma importância, a fim de que se obtenham os melhores resultados. E, considerando que as funções de um fluido dielétrico são diversas, para que ele atenda aos requisitos necessários para cumprimento total das mesmas, são necessárias as seguintes propriedades (ARANTES E SILVA, 2003):

- a) rigidez dielétrica: também chamada de “resistividade dielétrica”, a rigidez dielétrica possui grande influência na precisão de usinagem. Isso acontece devido ao fato de que uma maior resistência do fluido ocasiona uma menor distância entre os eletrodos durante as descargas elétricas, aumentando, assim, a precisão de usinagem;
- b) tempo de deionização: é o tempo que os íons e elétrons levam para se recombinarem após uma descarga. Quando o tempo de deionização é menor, diminui-se o tempo dos pulsos subsequentes, aumentando, assim, a taxa de remoção de material;
- c) viscosidade: a viscosidade é responsável pelo bom escoamento do fluido. Fluidos com baixa viscosidade têm maior fluxo na cavidade usinada, melhorando a limpeza e o

arrefecimento¹;

d) calor específico: um alto calor específico implica no acúmulo de energia térmica sem grande aumento de temperatura. Tal característica aumenta a vida útil do fluido e o rendimento do processo de usinagem;

e) condutividade térmica: a condutividade térmica ocasiona a solidificação e a refrigeração das partículas erodidas, evitando que elas se prendam no eletrodo, na cavidade ou em outras áreas da peça. Além disso, juntamente com o calor específico, a condutividade térmica previne problemas na estrutura metalúrgica do material da peça durante a operação;

f) ponto de ebulição: quanto maior o ponto de ebulição do fluido, menor a evaporação durante as descargas elétricas. Essa característica também mantém o fluido estável, evitando que perca suas propriedades originais.

2.1.7. Eletrodo-ferramenta

2.1.7.1. Material do eletrodo

Os materiais usados para a produção do eletrodo-ferramenta têm como características termofísicas obrigatórias a boa condutividade térmica e o alto ponto de fusão. Além disso, os materiais empregados devem permitir que o eletrodo-ferramenta seja fabricado através dos processos convencionais.

As propriedades termofísicas, tais como a condutividade térmica, a expansão térmica e temperaturas de fusão e ebulição, são as principais modificadoras dos resultados do processo, uma vez que podem alterar diversos aspectos resultantes da usinagem por eletroerosão, como taxa de remoção de material, desgaste do eletrodo e integridade superficial da peça de trabalho.

Os estudos realizados até hoje evidenciam que, ao contrário das características termofísicas, as propriedades mecânicas do eletrodo-ferramenta não possuem grande influência no processo de eletroerosão (AMORIM, 2004).

Segundo Lima (2009), existem dois materiais entre os mais comuns para a fabricação dos eletrodos-ferramenta, quais sejam, o cobre e o grafita, ambos podendo ser fornecidos com diferentes classificações ou ligas.

¹ Perda de calor.

O cobre é utilizado para esse fim pelo fato de possuir elevada condutividade térmica, boa resistência à corrosão, facilidade na fabricação e elevada resistência mecânica à fadiga. Tais fatores são determinantes para a escolha do cobre como um dos principais materiais usados na fabricação de eletrodos.

Em virtude dessas características, a utilização do eletrodo de cobre pode produzir uma superfície de acabamento com rugosidade $R_a = 0,25 \mu\text{m}$, sendo este um grau de acabamento satisfatório. Esse acabamento é obtido através do polimento do eletrodo (esse processo não atingiria os mesmos resultados no eletrodo de grafita). Assim, nas áreas onde há necessidade de um acabamento de alta qualidade, a utilização do eletrodo de cobre é a mais indicada. Além disso, o eletrodo de cobre promove alta escala de produção sem que o custo seja elevado, mesmo em usinagens complexas, justificando, por mais essa característica, a sua utilização.

Já o eletrodo de grafita apresenta melhor resistência ao desgaste, baixa densidade e baixa dilatação térmica, quando comparado ao cobre. E por possuir baixa densidade, a grafita facilita a fabricação de eletrodos de grande porte, tornado seu manuseio mais fácil durante a produção. Todavia, em comparação ao cobre, a grafita possui uma grande desvantagem - fragilidade - característica essa que dificulta a fabricação de eletrodos de pequeno porte. Ademais, a grafita também apresenta porosidade, o que ocasiona maior contaminação do eletrodo no processo de usinagem por eletroerosão, quando comparada com outros materiais (AMORIM, 2002).

2.1.7.2. Desgaste do eletrodo

Segundo Chen (1997), o desgaste volumétrico relativo é dado em valores percentuais, sendo calculado através da razão entre o volume de material desgastado do eletrodo-ferramenta e o volume de material erodido da peça.

Considerando que o desgaste volumétrico diminui a vida do eletrodo, os catálogos de máquinas de usinagem por descargas elétricas (EDM), fornecidos por seus fabricantes, apresentam tabelas de referências para fins de prevenção do desgaste do eletrodo-ferramenta. Essas informações são baseadas em condições laboratoriais de teste e, assim, podem ocorrer variações nos parâmetros em função do material do eletrodo, dos procedimentos operacionais, da lavagem utilizada, da variação local da rede elétrica, do tipo e da contaminação do dielétrico.

Durante o processo de usinagem por penetração através de descargas elétricas, a energia aplicada no processo cria crateras no eletrodo-ferramenta que podem modificar a sua

geometria e comprometer o desempenho da taxa de remoção de material, bem como a precisão requerida.

2.2. Matéria prima do eletrodo-peça

No processo de eletroerosão é comum a usinagem de aços ferramenta, como por exemplo, o AISI H13. Esse aço é classificado pela AISI (American Iron and Steel Institute) como série H, que é a divisão de aços para trabalhos a quente. Entre os mais usados dessa série estão o H11, H12 e H13, os quais são utilizados, na maioria das vezes, na fabricação de ferramentas para extrusão a quente, matrizes de forjamento e moldes para fundição sob pressão de alumínio (SILVA, 2006).

Esse material possui características específicas que o fazem ser um dos mais importantes nos trabalhos a quente, quais sejam: alta resistência a trincas por fadiga térmica, excelentes propriedades mecânicas, alta tenacidade, ótima resposta a tratamentos térmicos, excelente resposta ao polimento, boa resistência ao desgaste e boa usinabilidade.

A composição química média de comercialização desse aço é mostrada na tabela 1, onde se pode perceber a presença de elementos que são comuns nos aços usados para confecção de moldes de injeção, como o Cromo (Cr), o Molibdênio (Mo), e o Vanádio (V) (MACIEL, 2003).

Tabela 1 - Composição química percentual do aço AISI H13

Aço AISI H13							
Carbono	Manganês	Silício	Cromo	Molibdênio	Vanádio	Fósforo máx.	Enxofre máx.
0,32 - 0,45	0,20 - 0,50	0,80 - 1,20	4,75 - 5,50	1,10 - 1,75	0,80 - 1,20	0,03	0,03

LUCCHINI, 2005, p. 57

2.3. Aspectos de avaliação após o processo

2.3.1. Características de rendimento do processo

Segundo a norma VDI (1990), existem três pontos principais que determinam o rendimento do processo de eletroerosão por penetração: taxa de remoção do material, taxa de desgaste e desgaste relativo.

A taxa de remoção de material é representada pelo volume de material removido do eletrodo-peça durante o tempo de usinagem, sendo apresentada em [mm³/min]. Normalmente obtém-se maiores taxas de remoção nos processos de usinagem em regime severo, onde não existe preocupação com a integridade da peça e o acabamento final.

A representação da taxa de desgaste é obtida através do volume de material removido do eletrodo-ferramenta durante o tempo de usinagem e, na maioria das vezes, é medida em [mm³/min]. Trata-se de um ponto de avaliação importantíssimo no processo, haja vista que o desgaste do eletrodo-ferramenta influencia diretamente no custo e precisão da usinagem. Quanto à precisão, cabe salientar que a taxa de desgaste próximo a zero é tida como ideal.

O desgaste relativo entre os eletrodos-ferramenta e peça é dado pela razão entre V_e e V_w , normalmente expressa em valores percentuais, conforme a equação (1) abaixo apresentada.

$$V\vartheta = \frac{V_e}{V_w} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

V_e = Taxa de desgaste do eletrodo-ferramenta

V_w = Taxa de remoção de material do eletrodo-peça

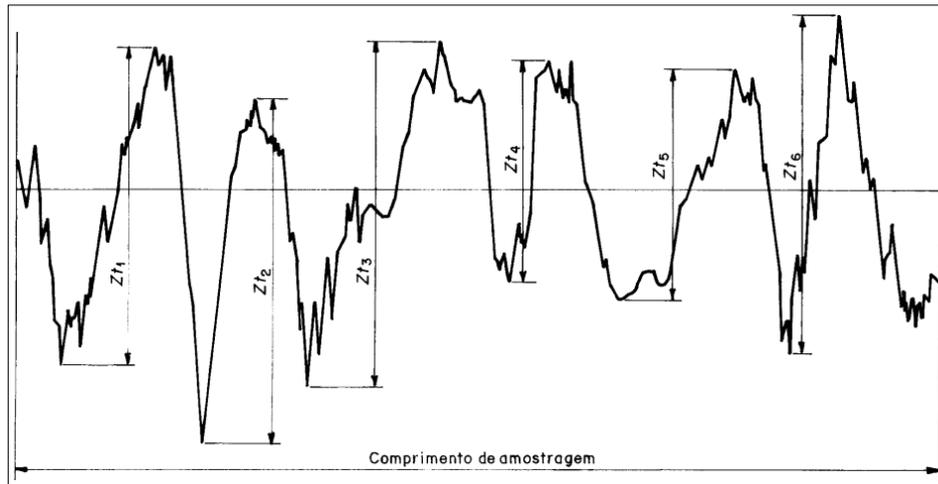
2.3.2. Acabamento da superfície usinada

Segundo Amorim (2002), a principal característica considerada para avaliação do acabamento superficial proveniente do processo de EDM são os parâmetros de rugosidade R_a e R_z .

A rugosidade é considerada um erro micro-geométrico gerado pela remoção do material durante a usinagem. Assim, a análise da rugosidade tem o condão de verificar as irregularidades na superfície, que normalmente se apresentam como relevos ou depressões.

Segundo Chiaverini (1986), o parâmetro R_a tem como seu principal objetivo avaliar o acabamento superficial resultante de um processo de usinagem. Esse parâmetro é calculado pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento $Z(x)$ dentro do comprimento de amostragem (ISO 4287:2002). Tal descrição pode ser melhor entendida com a visualização da figura 8 e a equação 2, postas a seguir.

Figura 8 - Perfil de rugosidade pelo parâmetro Ra



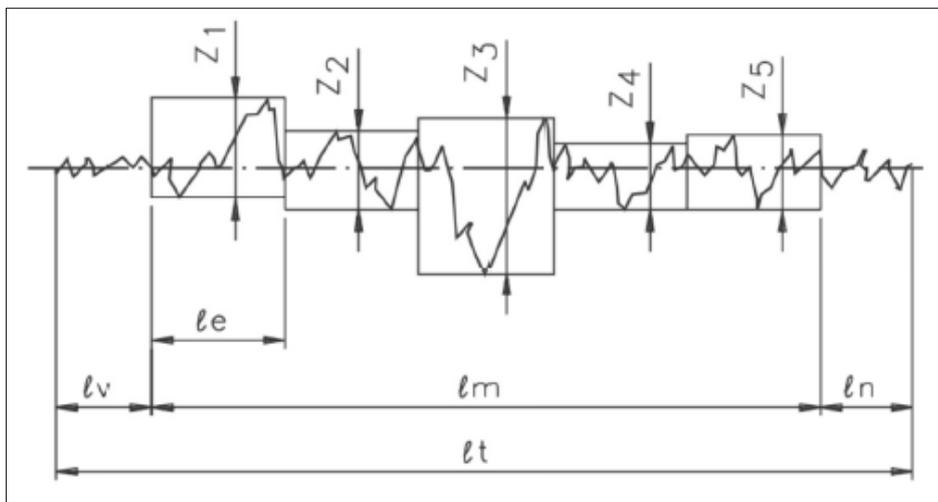
(ISO 4287:2002, p. 10)

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (2)$$

A rugosidade Rz corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial. Conforme mostrado abaixo na equação 3 e figura 9.

$$Rz = \frac{Z1 + Z2 + Z3 + Z4 + Z5}{5} \quad (3)$$

Figura 9 - Perfil de rugosidade pelo parâmetro Rz

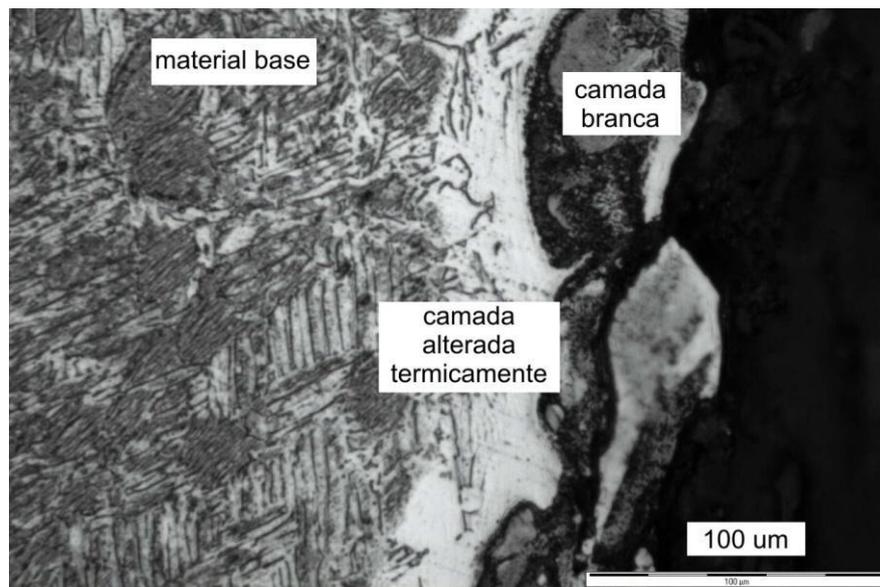


(ISO 4287:2002, p. 11)

2.3.3. Formação de camadas

O processo de EDM produz três camadas que podem ser observadas claramente após a usinagem: camada refundida ou camada branca; camada alterada termicamente; material base (LEE, 2001). Na figura 10 podem ser observadas as camadas.

Figura 10 - Micrografia do aço apresentando as camadas geradas na superfície do material após o processo de EDM



(SANTOS, 2010, p 37)

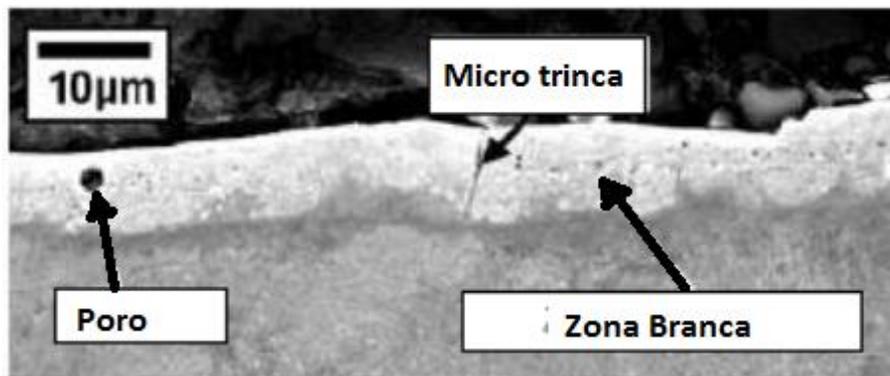
Segundo a norma VDI 3402 (1990), a camada refundida origina-se na superfície da peça durante o intervalo entre os pulsos de energia da máquina e é formada pelas micropartículas que não são expulsas da zona de usinagem pelo fluxo do fluido dielétrico. Essas micropartículas acabam se solidificando na área usinada ou em áreas próximas e as propriedades mecânicas da camada branca se tornam completamente diferentes do material base. Isso acontece em virtude da interação do material erodido com os subprodutos do eletrodo-ferramenta e do fluido dielétrico. A rápida solidificação das partículas que constituem a camada branca ocasiona a formação de poros e micro trincas, as quais, segundo Amorim (2002), não afetam o material base.

A zona afetada termicamente se localiza entre o material base e a camada refundida. Nessa região existem diversas subcamadas, de difícil identificação, formadas pela modificação estrutural e da composição química do material, que ocorre devido às altas temperaturas e a difusão atômica (VDI 3402, 1990).

2.3.4. Formação de micro trincas e poros

A formação de micro trincas e poros são defeitos do processo e estão ligados principalmente à condutividade térmica do material usinado. Isso porque materiais com maior condutividade térmica transportam rapidamente o calor, afastando-o das regiões superficiais, onde normalmente encontram-se esses defeitos (LEE; TAI, 2003). Na figura 11 é possível observar os defeitos da usinagem.

Figura 11 - Formação de poros e micro trincas na zona da camada branca



(SILVA, 2007, p 45)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem o objetivo de mostrar detalhadamente os experimentos e análises planejados para o desenvolvimento do trabalho.

São apresentados os métodos de fabricação dos eletrodos, os parâmetros usados na máquina durante a usinagem para proporcionar o regime de trabalho necessário, as características dos eletrodos e também os procedimentos através dos quais foram analisados os resultados de cada usinagem.

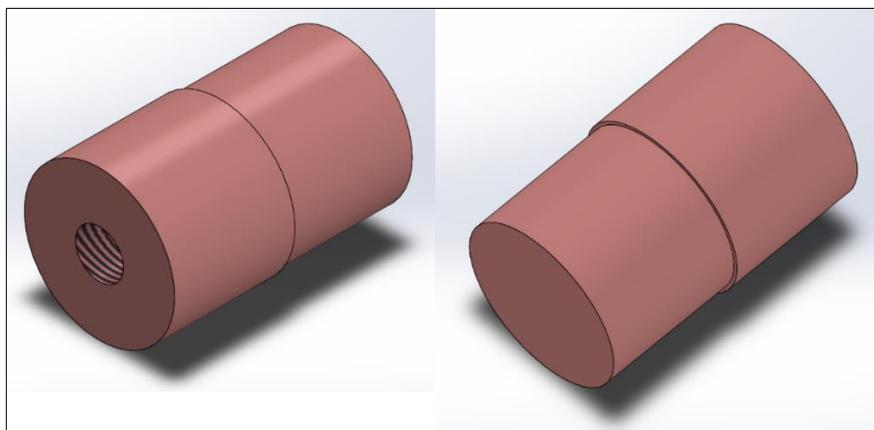
3.1. Métodos, materiais e técnicas

3.1.1. Fabricação do eletrodo-ferramenta

Para a fabricação dos eletrodos-ferramenta foi utilizado o cobre eletrolítico, uma vez que trata-se de um dos materiais mais comuns na indústria, bem como pelo fato de que foi usado como material base pelo fabricante da máquina de eletroerosão para especificar os resultados esperados nas usinagens.

A barra de cobre escolhida para fabricação dos eletrodos possuía diâmetro bruto de uma polegada, e a escolha dessa dimensão bruta da barra favoreceu a fabricação do eletrodo, que teria diâmetro externo de 24 mm após usinado. O comprimento não foi controlado por não ser relevante na avaliação dos resultados dos ensaios. Na figura 12 é possível visualizar o eletrodo pretendido após a fabricação.

Figura 12 - Desenho representativo do eletrodo-ferramenta



(Fonte: O autor)

O eletrodo foi produzido por meio de processo de usinagem em um torno convencional, modelo MS-205, do fabricante Nardini.

Para que se pudesse atingir um melhor acabamento superficial na usinagem do eletrodo, foi usado o menor avanço disponível na máquina (0,042 mm/rev) e rotação de 1000 RPM.

Nesse processo, para fins de facilitar a usinagem, foi utilizado o fluido para corte de metais Quimatic 1, do fabricante TAPMATIC. De acordo com o fabricante, esse fluido é indicado para todos os tipos de metais. Na realização de testes preliminares foi possível observar que o uso do fluido ajudava consideravelmente na usinagem, melhorando o acabamento superficial do eletrodo.

Todo o procedimento de furação foi realizado no torno, com rotação de 400 RPM e avanço manual. Para a furação da rosca de fixação do eletrodo foram usadas, inicialmente, três brocas: uma broca de centro, uma com diâmetro de 4 mm e a última com diâmetro de 7 mm. Após o término da furação, foi feita a rosca com a passagem de um jogo de machos manuais M8. Para fins de alinhamento da rosca no eletrodo, todo o seu processo de confecção foi realizado com o eletrodo fixado na placa de três castanhas do torno e com o macho alinhado pela contra-ponta, conforme mostrado na figura 13.

Figura 13 - Procedimento de abertura de rosca



(Fonte: O autor)

3.1.2. Fabricação do eletrodo-peça

A fabricação do eletrodo-peça foi realizada com em placa de aço AISI H13, material de uso comum no processo de eletroerosão. As dimensões brutas da placa eram de 150x70x40 mm. Considerando que as dimensões do eletrodo-peça não teriam influência sobre os testes, a placa foi usinada apenas para que ficasse no esquadro e para melhorar seu acabamento superficial.

O esquadramento da placa foi feito na fresadora convencional FVF 3000 do fabricante DEB'MAQ. Foram faceados os seis lados da placa, de forma a deixá-la esquadrejada e melhorar seu acabamento em relação à peça bruta, o que serviu de preparação para a retificação das faces.

A retificação da peça foi realizada nas quatro faces que teriam influência no processo de usinagem por eletroerosão ou em sua análise, com a utilização da retificadora plana P25, fabricada pela empresa MELLO. Essa usinagem teve o objetivo de reduzir os erros de forma e de qualidade de superfície decorrentes do processo de fresamento.

3.1.3. Procedimento Experimental

Todas as usinagens desenvolvidas durante o experimento foram realizadas na máquina de eletroerosão por penetração modelo SP1, que possui três eixos de trabalho e é produzida pelo fabricante AgieCharmilles.

Levando em consideração a necessidade identificada durante a realização da fundamentação teórica deste trabalho de conclusão do curso, a longa duração do processo de usinagem por eletroerosão, a disponibilidade do equipamento e a necessidade de materiais para os eletrodos, foi decidido realizar duas usinagens para cada um dos três regimes, variando o programa de usinagem para cada um deles (esses programas e regimes estão pré-estabelecidos no manual da máquina).

Para a realização dos experimentos, as condições dos regimes de usinagem adotadas foram: desgaste mínimo, standard e remoção máxima. A combinação de dois parâmetros aplicados aos três regimes de usinagem escolhidos implicou na realização de seis ensaios, conforme mostrado na tabela 2.

Tabela 2 - Combinação entre regimes de usinagem e números dos programas ensaiados

		Regime de Usinagem		
		Desgaste Mínimo	Standard	Remoção Máxima
Nº Programa	104	X		
	112	X		
	125		X	
	132		X	
	145			X
	151			X

(Fonte: O Autor)

A escolha dos programas usados dentro de cada regime de usinagem foi feita selecionando um parâmetro de desgaste, de acordo com a área do eletrodo e um parâmetro de acabamento para uma rugosidade Ra próxima a 2 μm . Assim, os parâmetros em cada regime de usinagem poderiam ser comparados em termos de rendimento e qualidade.

Os programas que foram utilizados nas usinagens já traziam a definição de todos os parâmetros de regulagem da máquina. Na tabela 3 é possível avaliar quais foram os parâmetros usados para cada usinagem e alguns dos resultados esperados.

Tabela 3 – Informações disponibilizadas no manual da máquina para os programas

Regime de Usinagem	Número do Programa	Gap Lateral (mm)	Gap Frontal (mm)	Velocidade (mm^3/Min)	Desgaste (%)	Ra Lateral (μm)	Ra Frontal (μm)	Corrente de Trabalho - PI (A)	Tempo Entre Pulsos - PG (μs)	Duração do Pulso - PW (μs)
Desgaste mínimo	104	0,060	0,048	N.I.	N.I.	1,10	1,70	2,4	10	32
	112	0,748	0,420	80	0,05	9,68	12,10	25,6	100	420
Standard	125	0,120	0,055	N.I.	N.I.	1,90	1,90	3,2	5,6	18
	132	0,720	0,350	77	0,25	8,20	12,00	25,6	56	240
Remoção máxima	145	0,150	0,070	N.I.	N.I.	2,10	2,60	4	18	56
	151	0,610	0,300	45	0,90	6,00	9,20	18,4	24	100

(Fonte: O autor)

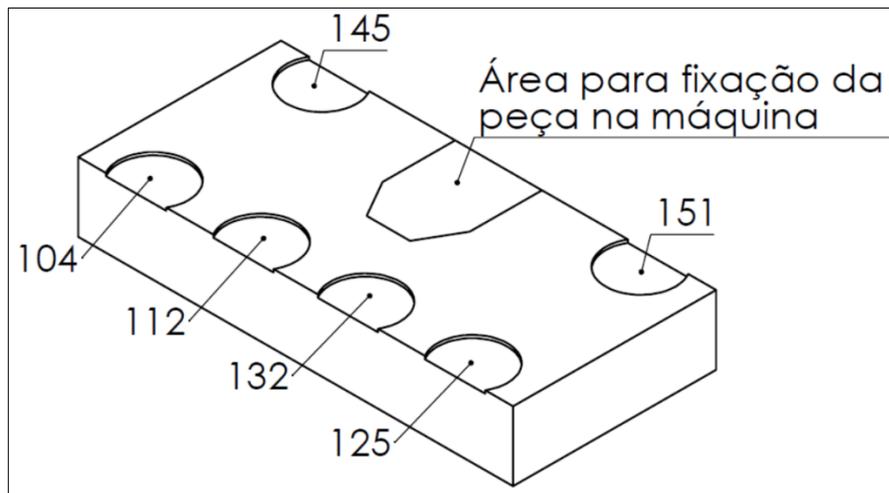
Para a realização dos ensaios foi estabelecida uma profundidade fixa de usinagem, sendo 1,00 mm para cada um deles. As usinagens das cavidades foram realizadas utilizando o mesmo eletrodo-peça, visto que isso não traria nenhuma diferença nos resultados obtidos.

Durante o experimento foi utilizado um eletrodo para cada condição de usinagem, ou seja, foram necessários seis eletrodos para os ensaios. O uso de eletrodos exclusivos nas usinagens possibilita a comparação do desgaste dos eletrodos nos diferentes regimes e programas.

O posicionamento do eletrodo para realizar a usinagem foi definido de forma que a face inferior do eletrodo-ferramenta não estivesse totalmente sobre a peça, diminuindo a área

de contato dos eletrodos e possibilitando a visualização lateral da cavidade. A partir desse posicionamento obteve-se uma área de descarga entre os eletrodos de 363,95 mm². A figura 14 mostra o método utilizado.

Figura 14 - Usinagem das cavidades pretendidas, número dos programas utilizados e área planejada para fixação do eletrodo-peça



(Fonte: O autor)

3.1.4. Método de análise dos resultados

Após a realização dos ensaios propostos para desenvolvimento da pesquisa foi necessária a análise de diversas características dos componentes envolvidos e do processo, tais como dimensões, acabamento superficial, massa e tempo de usinagem. Os principais pontos a serem analisados são as características definidas no manual da máquina como referência para o processo de eletroerosão.

3.1.4.1. Análise da rugosidade

A rugosidade foi analisada para que se tornasse possível a comparação entre os dados de referência encontrados no manual da máquina e os números reais obtidos. Além disso, assim como na maioria dos processos de usinagem, esse é um dos principais pontos considerados na análise da qualidade superficial proveniente do processo.

Com base em pesquisa bibliográfica se pôde constatar que o parâmetro usado para análise da rugosidade normalmente é o Ra (SILVA, 2007 e OLINIKI, 2009). Corroborando

com essa afirmação, cabe salientar que nos números de referência encontrados no manual da máquina o único parâmetro encontrado também é o Ra.

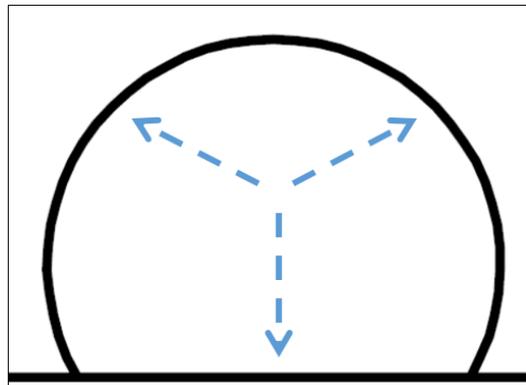
Nas medições foram obtidos os valores de rugosidade nos parâmetros Ra, Rz e Rt. Porém, para efeitos de análise, apenas o parâmetro Ra será considerado.

As superfícies avaliadas foram as faces das cavidades usinadas pela parte frontal dos eletrodos-ferramenta. A análise de rugosidade lateral da cavidade não foi possível, em virtude do seu formato cilíndrico, bem como por não haver profundidade suficiente para posicionamento do rugosímetro.

Na medição da rugosidade o valor da amostragem ou *cut-off* usado foi de 0,8 mm x 5. Essa medição foi realizada em três pontos da cavidade e em direções diferentes. As medições foram repetidas três vezes, totalizando nove medições por cavidade.

O processo de eletroerosão por penetração não usa o cisalhamento como forma de remoção de material, razão pela qual após a usinagem não ficam marcas no sentido da ferramenta de usinagem. Sendo assim, a direção e o local de medição na superfície foram definidos para que fossem avaliados diversos pontos da cavidade, como é possível observar na figura 15.

Figura 15 - Local e sentido aplicado nas medições da rugosidade



(Fonte: O autor)

Todas as análises de rugosidade foram feitas utilizando o mesmo rugosímetro, da marca TESA, modelo Rugosurf 20, demonstrado na figura 16, a seguir.

Figura 16 - Rugosímetro TESA Rugosurf 20



(Fonte: Catálogo fabricante)

3.1.4.2. Análise do dimensional da cavidade

O dimensional da cavidade foi avaliado principalmente com o intuito de possibilitar futuras análises como gap de trabalho lateral, desgaste do eletrodo-ferramenta, taxa de remoção, entre outros.

As medições foram realizadas num projetor de perfil da marca Mitutoyo, modelo PJ-A3000, como mostrado na figura 17. Toda a medição realizada foi repetida três vezes, a fim de gerar resultados mais confiáveis.

Figura 17 – Projetor de perfil utilizado para obtenção das dimensões da cavidade

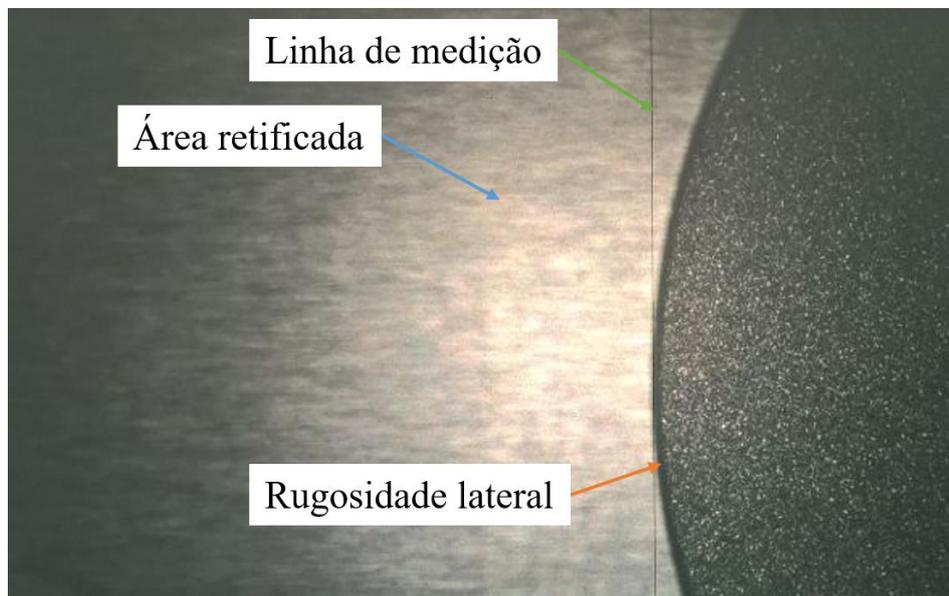


(Fonte: Catálogo fabricante)

Com a as medições no projetor de perfil, foram identificados o diâmetro da cavidade, a profundidade, o raio formado pelo arredondamento de canto e a inclinação lateral da cavidade.

O diâmetro da cavidade foi medido apenas no ponto que seria usado como base para avaliação do gap de trabalho lateral. Essa medição foi realizada usando-se as partes retificadas como referência para posicionamento da linha do projetor de perfil, que, por ter melhor acabamento, reflete adequadamente a luz. Na figura 18 é possível visualizar o método de medição utilizado.

Figura 18 - Método de medição do diâmetro da cavidade

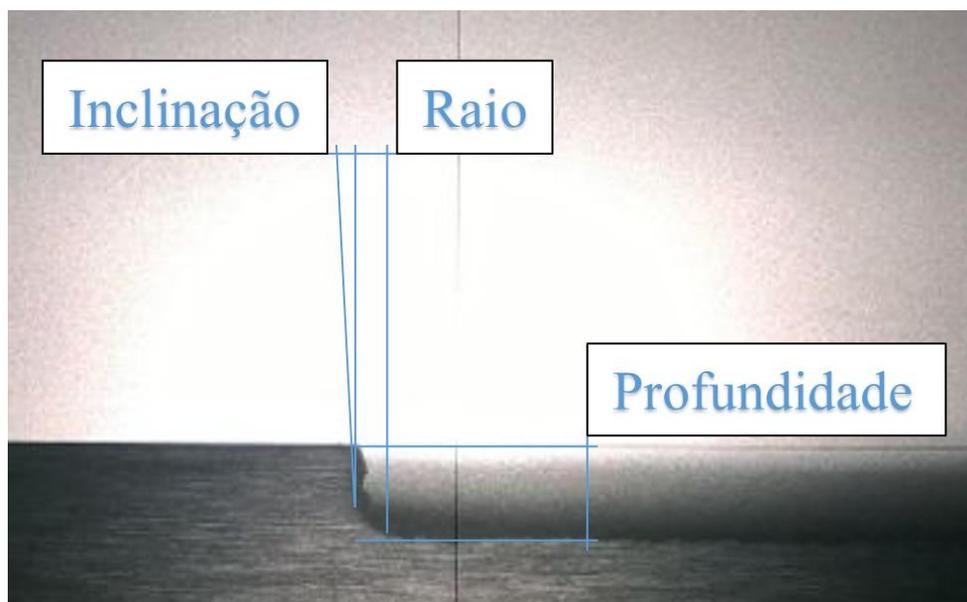


(Fonte: O autor)

A profundidade foi medida de forma similar ao usado para o diâmetro, mas com a peça posicionada lateralmente no projetor de perfil. Usando esse mesmo posicionamento da peça, mediu-se a inclinação lateral e o raio da cavidade.

Na definição do método de análise da inclinação considerou-se o fim do raio como ponto inicial para sua medição. A figura 19, a seguir, mostra detalhadamente a forma de medição de cada uma dessas características.

Figura 19 - Método de medição usado para obtenção da inclinação, raio e profundidade



(Fonte: O autor)

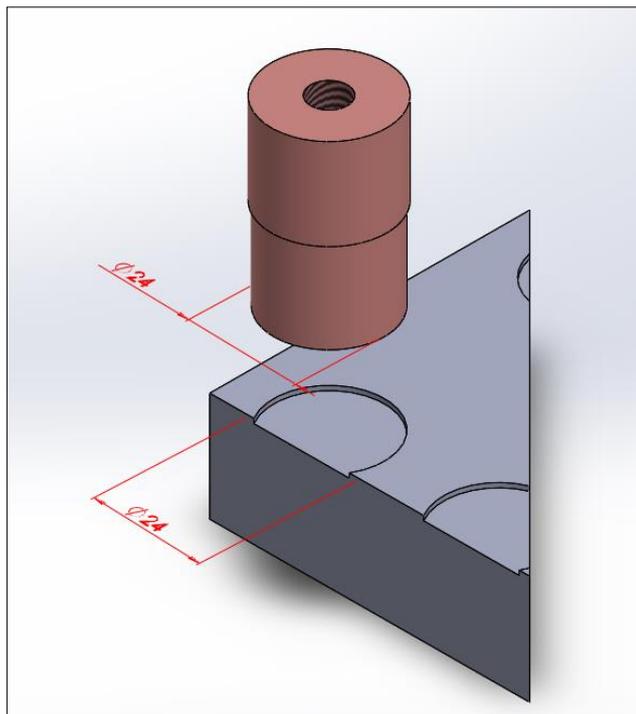
3.1.4.3. Análise do GAP de trabalho

O gap de trabalho, nessa situação, é a metade da diferença entre o diâmetro interno da cavidade e o diâmetro externo do eletrodo. Para obtenção de tais dados, foi necessária a medição do diâmetro da cavidade, utilizando o projetor de perfil, e a medição do diâmetro externo do eletrodo, utilizando o micrômetro.

A avaliação do diâmetro da cavidade foi realizada junto de suas demais dimensões, como relatado anteriormente.

Quanto ao diâmetro do eletrodo, este foi medido com um micrômetro Starrett 231, com resolução de 0,001 mm. Na medição desse diâmetro foi utilizado como referência o mesmo ponto do eletrodo responsável pela usinagem do diâmetro da cavidade medido no projetor de perfil. Tal cuidado foi tomado para evitar que eventuais irregularidades no diâmetro do eletrodo-ferramenta pudessem afetar os resultados. Os pontos usados como referência na medição dos diâmetros podem ser vistos na figura 20, a seguir.

Figura 20 - Demonstração dos pontos utilizados para medição dos diâmetros



(Fonte: O autor)

3.1.4.4. Análise do desgaste do eletrodo-ferramenta

No intuito de possibilitar a análise de desgaste dos eletrodos-ferramenta após os ensaios, eles foram pesados (antes da realização das usinagens) em uma balança com resolução de 0,1 mg, do modelo AUY220 e fabricada pela empresa Shimadzu. A medição foi realizada três vezes para cada eletrodo, a fim de evitar possíveis erros na obtenção dos dados.

Após a realização dos ensaios foram feitas novas medições da massa dos eletrodos para avaliação da quantidade de material removido. Para obtenção desse dado calculou-se a diferença entre a massa dos eletrodos antes e após os ensaios.

O cálculo do percentual de material removido foi realizado relacionando a massa da geometria de usinagem e a massa perdida pelo eletrodo-ferramenta durante a usinagem.

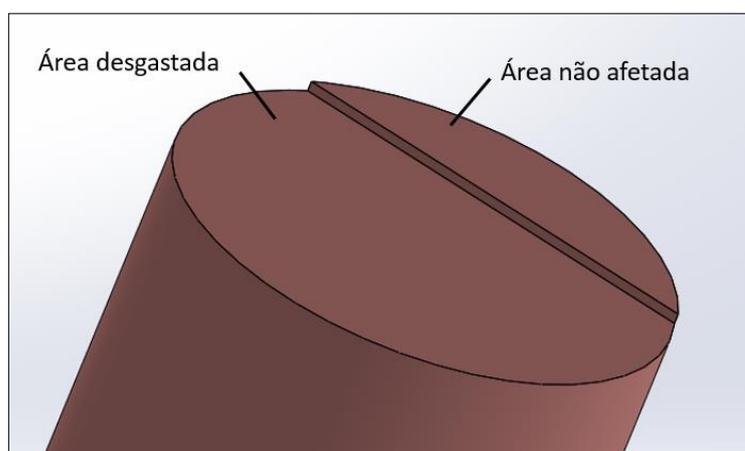
A massa da parte afetada do eletrodo foi calculada utilizando o volume e o peso específico de cobre (8925 kg/m^3).

Apesar de a maneira mais comum de ser calculado o desgaste do eletrodo-ferramenta ser através do volume de material removido, existe a dificuldade de medição precisa em eletrodos com formas geométricas complexas. Por isso, adotou-se a massa do eletrodo como base de cálculo.

A fim de possibilitar a definição correta da profundidade de usinagem, considerando a variação de altura do eletrodo ocasionada pelo desgaste, foi medida a diferença de altura da face frontal entre a parte desgastada e a parte não afetada pela usinagem.

Na figura 21 está representado o eletrodo após o processo de usinagem, bem como a diferença entre a parte desgastada e a parte não afetada pelo processo.

Figura 21 - Representação do eletrodo após a usinagem



(Fonte: O autor)

A altura entre as áreas foi obtida utilizando um medidor de forma de alta precisão modelo RA-1600, do fabricante Mitutoyo. Na figura 22 está demonstrado o equipamento utilizado.

Figura 22 - Medidor de forma RA-1600



(Fonte: Catálogo fabricante)

3.1.4.5. Análise da taxa de remoção de material da peça

A taxa de remoção de cada cavidade usinada na peça foi obtida usando dois dados resultantes do processo: o tempo de usinagem e a quantidade de material removido.

A cronometragem do tempo foi realizada através de relógio convencional e pelo tempo de usinagem indicado no painel da máquina de eletroerosão. Na comparação entre as duas fontes de medição de tempo foi constatado que não há praticamente nenhuma variação nos resultados.

Para possibilitar o cálculo da quantidade de material removido, foi necessário fazer a medição do diâmetro da cavidade para fins de cálculo de sua área frontal. Utilizando a área calculada e a profundidade medida no projetor de perfil foi possível então calcular o volume de material removido.

$$V_w = \frac{MR}{T} \quad (4)$$

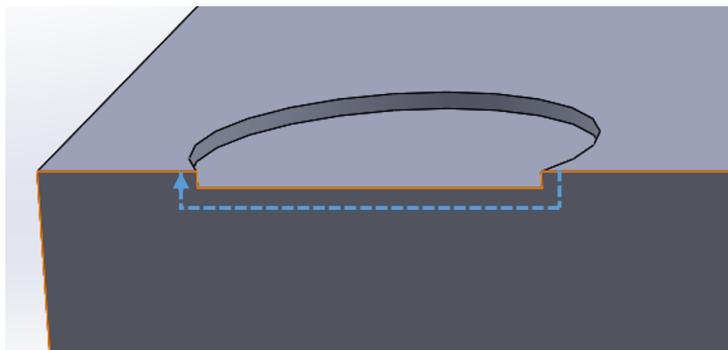
Onde:

- a) V_w – Taxa de remoção de material (mm^3/min);
- b) MR – Material removido (mm^3);
- c) T – Tempo (min).

3.1.4.6. Análise da formação de micro trincas, poros e camada branca

A análise da formação de camada branca, poros e micro trincas no material foi realizada através de uma varredura microscópica visual. Essa varredura foi feita no perfil formado na lateral da peça usinada, conforme mostrado na figura 23.

Figura 23 - Perfil de análise dos defeitos de usinagem



(Fonte: O autor)

Para a efetivação desse procedimento foi necessário cortar as amostras para realizar o seu embutimento. Quanto ao corte das amostras, cabe salientar que ele foi feito de forma que não afetasse a área avaliada, ou seja, transversalmente à superfície usinada.

Após o processo de corte, as amostras foram embutidas em resina fenólica para que pudessem ser lixadas e polidas. Primeiramente utilizou-se lixa, seguindo a granulometria de P400, P600, P800, P1200 e, em seguida, foi então efetuado o polimento.

Com o polimento da peça já foi possível visualizar algumas características que estavam sendo analisadas, mas para evidenciar melhor as camadas do material foi necessário mergulhar as amostras com Nital 2%.

Concluídos esses importantes procedimentos, foi feita a análise microscópica, com um aumento de 400 vezes, onde se pôde observar os defeitos e camadas provenientes do processo de eletroerosão. Tal visualização foi realizada utilizando o microscópio XJM400, do fabricante KOZO.

A medição da espessura da camada branca, o que é o ponto mais importante analisado no microscópio para as considerações finais do trabalho, foi realizada considerando sempre a maior espessura encontrada ao longo da superfície usinada. Para que fosse possível identificá-la, foi realizada uma varredura microscópica visual, onde foram medidos todos os pontos nos quais era observada a maior formação de camada branca, até que se identificasse a mais espessa.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Parâmetro de rugosidade Ra

Na análise da rugosidade os valores obtidos no parâmetro Ra ficaram próximos aos resultados informados no catálogo. Apesar de próximos, cinco dos seis experimentos tiveram a rugosidade abaixo do esperado e, ainda, apenas o ensaio utilizando o programa de usinagem número 132 ficou com valor acima.

Desse modo, levando em consideração a média da diferença entre os números do catálogo e os resultados do ensaio, pode-se afirmar que o resultado real de rugosidade fica 9% abaixo dos valores de referência encontrados no catálogo. Na tabela 4 podem-se visualizar os valores de rugosidade indicados no catálogo, os valores obtidos e os parâmetros de regulagem da máquina de eletroerosão utilizados em cada programa de usinagem.

Tabela 4 - Parâmetros dos programas utilizados e resultados de rugosidade Ra

Dados Catálogo						Ensaio
Regime de Usinagem	Número do Programa	Corrente de Trabalho - PI (A)	Tempo Entre Pulsos - PG (μ s)	Duração do Pulso - PW (μ s)	Ra Frontal (μ m)	Ra Frontal (μ m)
Desgaste mínimo	104	2,4	10	32	1,7	1,3
	112	25,6	100	420	12,1	10,7
Standard	125	3,2	5,6	18	1,9	1,8
	132	25,6	56	240	12,0	12,1
Remoção máxima	145	4	18	56	2,6	2,2
	151	18,4	24	100	9,2	8,8

(Fonte: O autor)

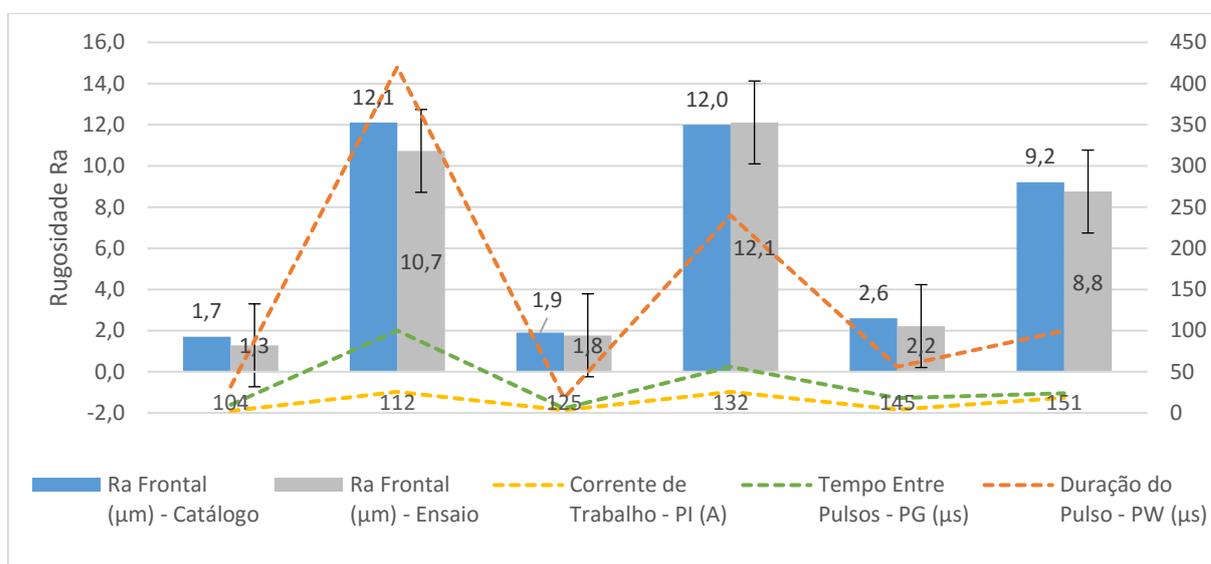
Os maiores valores de rugosidade foram obtidos nos programas com maior corrente de trabalho, ou seja, com aplicação de descargas elétricas mais elevadas. E essa geração de maior rugosidade na utilização dos programas se justifica pela alta quantidade de material erodido durante longas descargas elétricas, tanto do eletrodo-peça, quanto do eletrodo-ferramenta. Esse material não é totalmente expelido pelo fluido dielétrico e acaba se solidificando novamente nos eletrodos (ARANTES E SILVA, 2003).

Para fins dessa análise, pode-se comparar os programas de usinagem 112 e 132, que possuem a mesma corrente de trabalho, mas tempos diferentes de duração do pulso. No programa 112, que possuía maior tempo de aplicação do pulso, houve um aumento no diâmetro

da cavidade, proporcionando uma menor taxa de remoção e, conseqüentemente, reduzindo a rugosidade média. Nesses casos, onde é usado um tempo de pulso prolongado, normalmente usa-se também um maior tempo entre os pulsos, como demonstra o manual da máquina, o que pode ocasionar perdas energéticas, diminuindo a taxa de remoção.

De forma a permitir a melhor visualização da análise descrita acima, os seus dados foram organizados em um gráfico na figura 24, que associa os parâmetros de maior influência na rugosidade, a rugosidade esperada e a obtida nos ensaios. Na figura também está sendo mostrado o desvio padrão dos resultados dos ensaios.

Figura 24 - Associação entre parâmetros de usinagem e rugosidade Ra



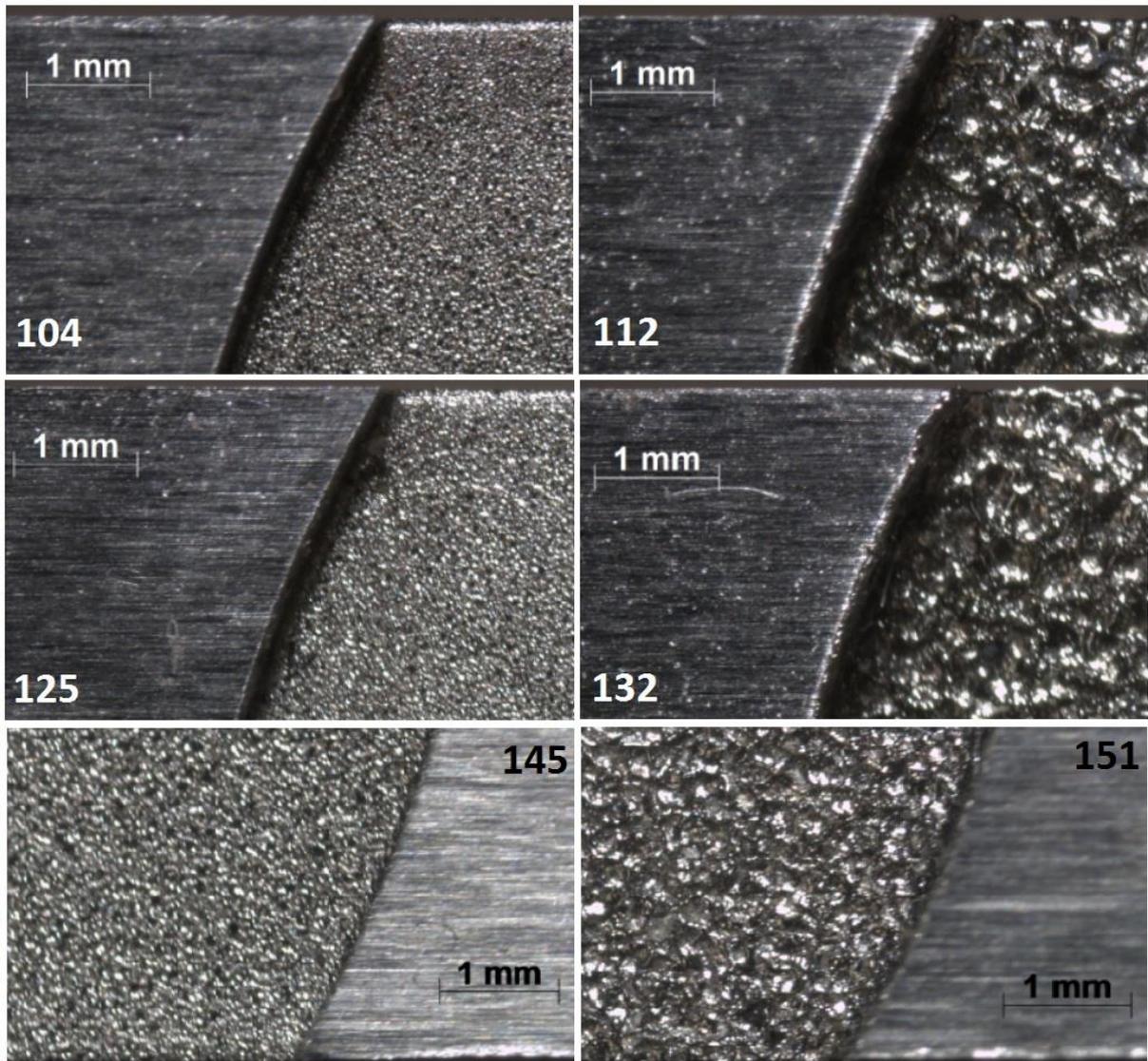
(Fonte: O autor)

A variação entre as medições de rugosidade realizadas entre cada ensaio teve uma diferença máxima de 11%, considerando todos os parâmetros medidos (Ra, Rz e Rt), e sua média ficou em 5%. Levando em consideração apenas as medições do parâmetro Ra, a maior diferença foi 6% e a média foi de 2%.

Esses dados, além de evidenciar que as usinagens tiveram resultados de acabamento uniforme em toda a superfície, também comprovam que o método de medição não afetou o resultado do processo.

A diferença encontrada na rugosidade entre alguns ensaios ficou evidente até mesmo na identificação visual, conforme pode ser verificado na figura 25, a seguir.

Figura 25 - Fotos das superfícies usinadas



(Fonte: O autor)

4.2. Taxa de remoção de material

A taxa de remoção foi calculada conforme a equação 4, utilizando os dados obtidos após os ensaios. Na tabela 5, a seguir, é possível observar a taxa de remoção obtida nos ensaios, chamada de “velocidade” no catálogo da máquina de eletroerosão. Na tabela também estão presentes os parâmetros de entrada na máquina e a taxa de remoção esperada para cada programa de usinagem.

Tabela 5 - Parâmetros dos programas utilizados e resultados da taxa de remoção

Dados de Catálogo							Ensaio	
Regime de Usinagem	Nº do Programa	Área Frontal - Fp (cm ²)	Velocidade (mm ³ /Min)	Corrente de Trabalho - PI (A)	Tempo Entre Pulsos - PG (µs)	Duração do Pulso - PW (µs)	Área Frontal (cm ²)	Velocidade (mm ³ /min)
Desgaste mínimo	104	-	-	2,4	10	32	3,73	0,22
	112	6	80	25,6	100	420	3,75	51,10
Standard	125	-	-	3,2	5,6	18	3,65	0,47
	132	6	77	25,6	56	240	3,70	54,20
Remoção máxima	145	-	-	4	18	56	3,65	0,84
	151	4	45	18,4	24	100	3,68	43,98

Fonte: O autor

Durante os ensaios foram utilizados eletrodos ferramenta com a mesma área frontal, para fins de comparação entre os diferentes programas de usinagem. Desse modo, os eletrodos ficaram com a área frontal diferente do indicado no catálogo para estes programas.

Essa diferença entre a área frontal indicada e a utilizada nos ensaios dificultou maiores comparações entre os resultados esperados e os resultados obtidos para a taxa de remoção, fato que não prejudicou outras avaliações. Em contrapartida, foi possível constatar através de alguns dados provenientes dos ensaios que os valores de catálogo não são tão confiáveis. Todavia, a par das dificuldades encontradas para a análise da taxa de remoção, os experimentos foram realizados e estudados de forma minuciosa.

A usinagem utilizando o programa 151 foi a que utilizou um eletrodo-ferramenta com área frontal mais próxima ao indicado no catálogo. A diferença entre essas áreas fez com que a taxa de remoção diminuísse, o que é comum, pois a área utilizada no ensaio era um pouco maior. O aumento da área de usinagem normalmente provoca uma menor taxa de remoção, e vice-versa, ao contrário do que pode ser observado nos programas 112 e 132.

Nesses programas a área frontal indicada no catálogo era de 6 cm², mas foram usados, respectivamente, 3,75 cm² e 3,70 cm². Em teoria, esses ensaios deveriam ter as taxas de remoção maiores do que nos números de referência, mas o resultado foi o contrário, houve menor taxa de remoção.

A análise da taxa de remoção é algo complexo, pois mesmo conhecendo os seus parâmetros de maior influência, existem diversos outros que podem afetá-la. Esses parâmetros, isolados, não representam interferência significativa nos resultados, mas juntos podem ter grande influência. Entre essa grande variedade de fatores que influenciam na taxa de remoção tem-se o ponto de fusão e o calor latente da peça, propriedades do eletrodo-ferramenta e fatores geométricos (McGEOUGH, 1988).

4.3. Gap lateral

A avaliação do Gap lateral foi a que trouxe a maior diferença em comparação aos dados fornecidos no manual da máquina. A maior diferença obtida chegou a 97,92% e a menor foi de 8,33%, enquanto que a variação média foi de 38%. Tais resultados demonstram que os valores de referência do manual para gap lateral não são confiáveis nas condições ensaiadas. Na tabela 6 encontram-se os números de referência, os valores obtidos no ensaio e a comparação entre os mesmos.

Tabela 6 – Comparação entre dados fornecidos em catálogo e ensaios realizados

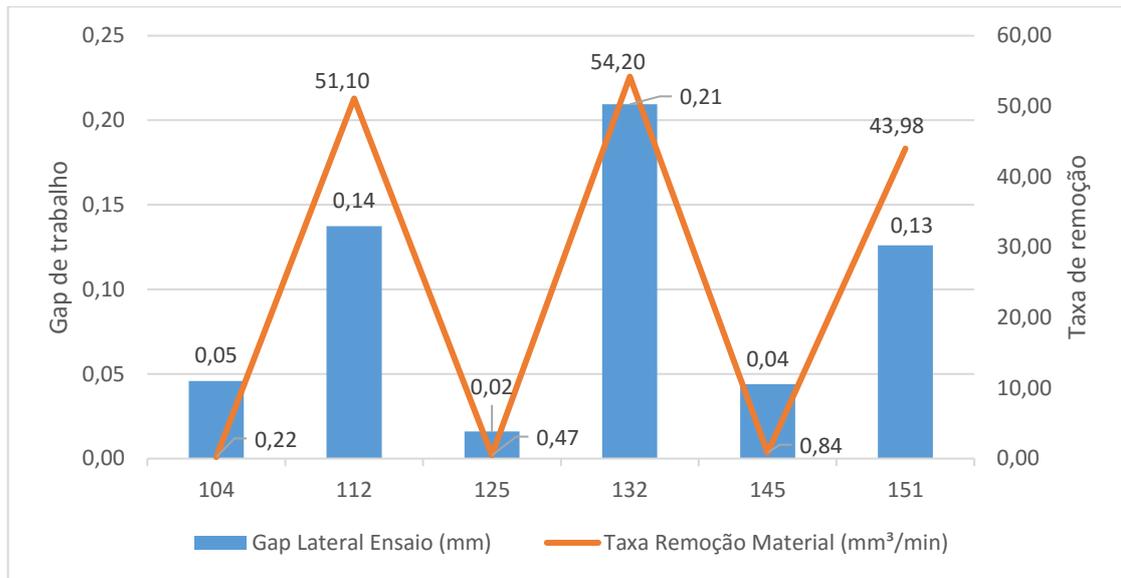
Dados de Catálogo			Ensaio			
Regime de Usinagem	Número do Programa	Gap Lateral (mm)	Diâmetro Eletrodo (mm)	Diâmetro Cavidade (mm)	Gap Lateral (mm)	Diferença Gap Lateral
Desgaste mínimo	104	0,024	24,526	24,621	0,0458	97,92%
	112	0,210	24,440	24,749	0,1373	-26,43%
Standard	125	0,028	24,022	24,061	0,0160	-29,09%
	132	0,175	23,990	24,442	0,2095	29,14%
Remoção máxima	145	0,035	24,000	24,095	0,0439	35,71%
	151	0,150	24,013	24,288	0,1261	-8,33%

Fonte: O autor

Durante as medições realizadas para possibilitar o cálculo do gap de trabalho foram usados os mesmos métodos e cálculos descritos no manual da máquina. A realização do procedimento conforme especificado no manual visa garantir que o método utilizado nas medições ou no cálculo não interfiram nos resultados da comparação.

Apesar do resultado da comparação ter sido completamente diferente do esperado, foi observado que os ensaios seguiram a teoria de que as usinagens com maior taxa de remoção de material ocasionam o aumento do gap de trabalho (Schmidt, 2012). Na figura 26, a seguir, está demonstrado um gráfico comparativo.

Figura 26 - Comparação entre alteração do gap de trabalho e taxa de remoção



(Fonte: O autor)

4.4. Desgaste do eletrodo-ferramenta

O desgaste foi calculado utilizando a medida da massa da geometria de usinagem antes e após os ensaios. Esses dados estão dispostos na tabela 7, mostrada abaixo.

Tabela 7 – Dados referentes ao desgaste do eletrodo obtidos nos ensaios

Dados de Catálogo			Ensaio			
Regime de Usinagem	Número do Programa	Desgaste	Tempo Usinagem	Massa Geometria Usinagem (g)	Massa Desgastada (g)	Desgaste Eletrodo
Desgaste mínimo	104	-	31:22:00	3,329	0,0762	2,29%
	112	0,05%	0:10:52	3,345	0,0010	0,03%
Standard	125	-	13:53:00	3,256	0,0774	2,38%
	132	0,25%	0:08:43	3,306	0,0094	0,28%
Remoção máxima	145	-	9:02:00	3,261	0,0166	0,51%
	151	0,90%	0:09:57	3,286	0,0318	0,97%

(Fonte: O autor)

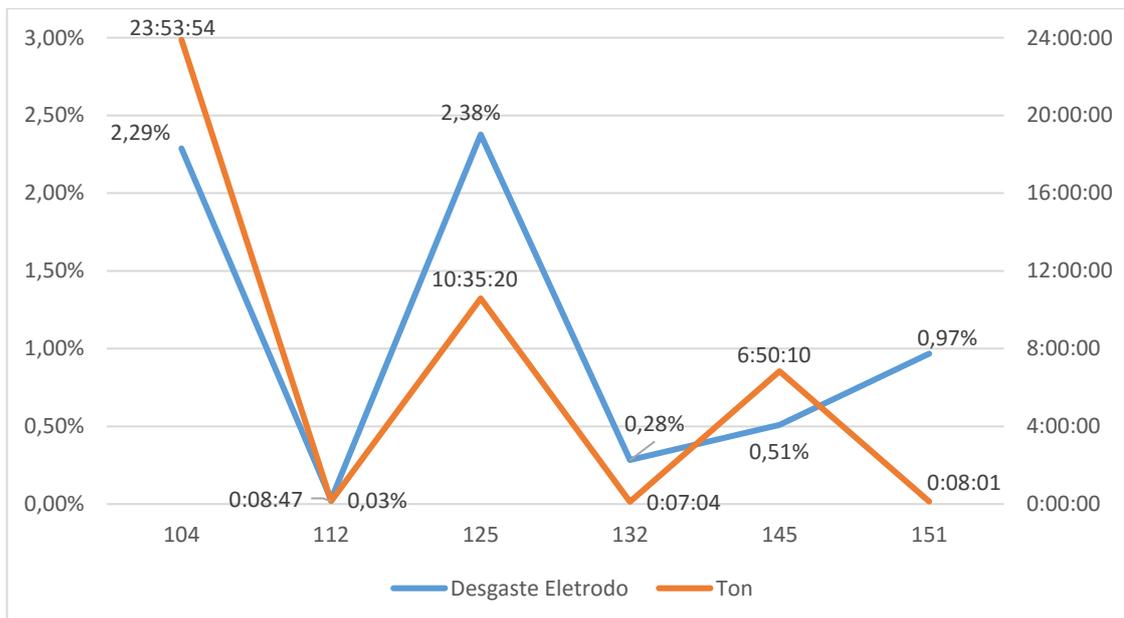
Os resultados de desgaste do eletro-ferramenta obtidos nos ensaios, ficaram próximos aos números fornecidos pelo fabricante no manual da máquina. Foi possível realizar essa comparação apenas nos programas de usinagem 112, 132 e 151, que tinham o desgaste informado no manual. Isso porque os demais programas foram selecionados em função da rugosidade desejada. Esses programas de usinagem (104, 125 e 145), por terem parâmetros de

acabamento, indicados para remoção de pouco material, não apresentam o desgaste informado no manual, pois estes teriam um desgaste proporcional baixo. Além disso, no manual da máquina é indicada uma metodologia onde deve-se selecionar o eletrodo de desbaste de acordo com a área de usinagem e o eletrodo de acabamento apenas pela rugosidade desejada, justificando a análise desses programas de usinagem.

A realização dos ensaios possibilitou confirmar a influência do tempo de usinagem no desgaste dos eletrodos. Foi possível observar que a longa duração do processo aumenta o desgaste do eletrodo, mesmo em usinagens com menor corrente de trabalho. Esse fato foi constatado nos regimes de usinagem de desgaste mínimo e standard.

Em processos de longa duração o tempo total de pulso se eleva na mesma proporção que o tempo total de usinagem, ocasionando maior desgaste do eletrodo. A figura 27 mostra o gráfico da relação entre o tempo total de pulso em cada ensaio e o valor obtido para o desgaste dos eletrodos.

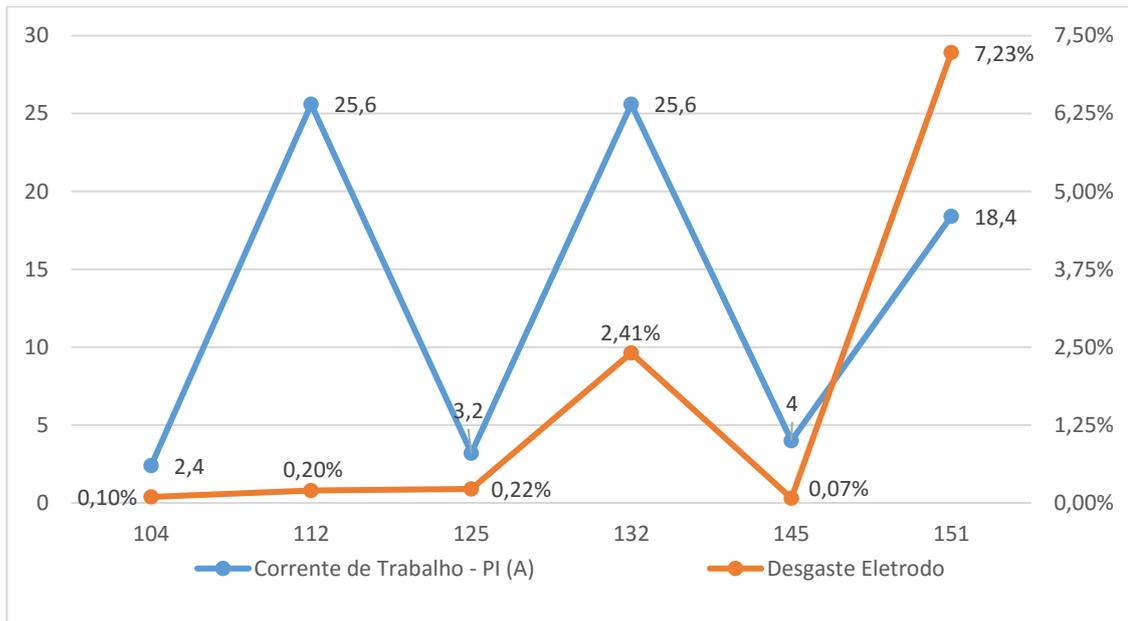
Figura 27 - Relação entre tempo total de pulso e desgaste do eletrodo-ferramenta



(Fonte: O autor)

Utilizando os resultados obtidos foi calculado o desgaste dos eletrodos simulando usinagens com um período comum de descargas elétricas e, com isso, chegou-se à conclusão de que a corrente de trabalho é outro fator de grande influência nos resultados de desgaste do eletrodo-ferramenta. O gráfico da figura 28 demonstra a associação da corrente de trabalho e do desgaste do eletrodo para uma usinagem com período de uma hora de descargas elétricas.

Figura 28 - Dados de corrente de trabalho e desgaste do eletrodo para 1 hora de Ton



(Fonte: O autor)

Nos ensaios onde foram aplicados os programas 112 e 151 o desgaste do eletrodo não acompanhou a alteração da corrente de trabalho da mesma forma que nos demais. Essa diferença ocorre devido a variáveis do processo como a duração do pulso e o tempo entre os mesmos. A combinação do tempo total de pulsos e a tensão das descargas elétricas foi o principal fator que exerceu influência nos resultados de desgaste do eletrodo-ferramenta.

O desgaste do eletrodo ocorre em toda a superfície responsável pela aplicação da descarga elétrica, mas para fins de definição da profundidade de usinagem, apenas o desgaste frontal é levado em consideração. Os números obtidos estão dispostos na tabela 8, a seguir. Na tabela estão mostrados com valores em negativo os resultados onde o houve desgaste do eletrodo e em positivo os casos com aumento de material.

Tabela 8 - Valores de desgaste frontal dos eletrodos-ferramenta

Regime de Usinagem	Número do Programa	Desgaste Frontal (μm)
Desgaste mínimo	104	- 10
	112	+ 17
Standard	125	- 12
	132	+ 16
Remoção máxima	145	- 4
	151	+ 2

(Fonte: O autor)

Os programas de usinagem que apresentaram maior desgaste frontal foram os mesmos onde se identificou maior desgaste total.

O aumento no dimensional dos eletrodos ocorrido em alguns ensaios se justifica pela contaminação da superfície do eletrodo com partículas provenientes do processo usinagem por eletroerosão, fato normal em casos onde é usada uma maior corrente de trabalho (SILVA, 2006).

4.5. Inclinação lateral

Durante a análise geral das dimensões da cavidade foi possível identificar que as laterais das cavidades ficaram inclinadas em relação à lateral do eletrodo-ferramenta. Esse defeito foi provocado pelo desgaste lateral do eletrodo, que durante a usinagem teve seu diâmetro reduzido.

No processo de eletroerosão, sabe-se que toda mudança geométrica na superfície de usinagem do eletrodo-ferramenta, também é transferida para a cavidade. Por isso, com a diminuição no diâmetro do eletrodo, a cavidade fica com um diâmetro maior no início e esse diâmetro diminui ao longo do processo. Na tabela 9, a seguir, estão os dados obtidos referentes à inclinação lateral.

Tabela 9 - Parâmetros de usinagem, resultados da inclinação e arredondamento de canto

Dados de Catálogo					Ensaio			
Regime de Usinagem	Número do Programa	Corrente de Trabalho - PI (A)	Tempo Entre Pulsos - PG (µs)	Duração do Pulso - PW (µs)	Inclinação Direita (°)	Inclinação Esquerda (°)	Taxa Remoção Material (mm ³ /min)	Raio (mm)
Desgaste mínimo	104	2,4	10	32	0,22	0,21	0,22	0,047
	112	25,6	100	420	2,26	2,01	0,47	0,427
Standard	125	3,2	5,6	18	1,16	1,1	0,84	0,082
	132	25,6	56	240	2,1	2,36	43,98	0,384
Remoção máxima	145	4	18	56	0,31	0,35	51,10	0,216
	151	18,4	24	100	2,25	2,35	54,20	0,379

Fonte: O autor

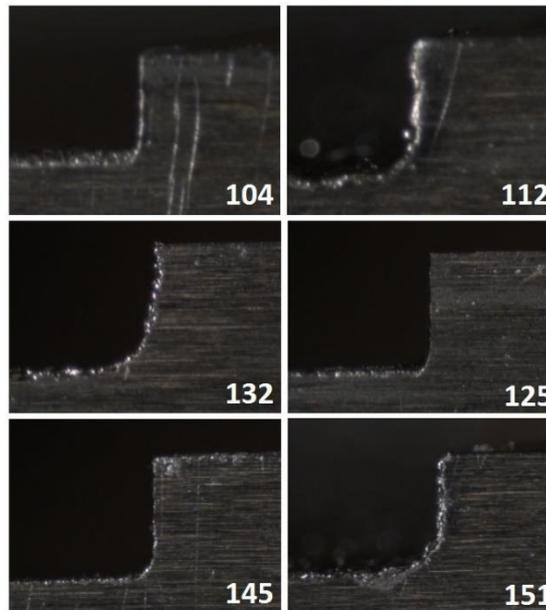
Os ensaios onde foram usados os parâmetros de usinagem que provocavam maior taxa de remoção foram também os que tiveram maior inclinação na lateral da cavidade. A relação entre essas variáveis do processo é bastante comum, pois ambas são encontradas em usinagens com maior corrente de trabalho, por estarem associadas ao desgaste do eletrodo.

A análise da inclinação lateral é importante no planejamento de processos onde se

utilizam eletrodos diferentes para desbaste e acabamento, pois esse é um fator que deve ser considerado na seleção do programa de usinagem. Ignorar esse fator faz com o processo fique sujeito a erros de geometria na cavidade usinada.

Na figura 29 é possível observar a inclinação de cada cavidade obtida com os ensaios.

Figura 29 - Fotos laterais dos perfis usinados



(Fonte: O autor)

4.6. Arredondamento de canto

O defeito de arredondamento de canto na usinagem por eletroerosão é normalmente uma consequência de elevadas taxas de remoção de material, pois está associado ao desgaste do eletrodo. Assim, em usinagens onde usam-se maiores taxas de remoção é extremamente difícil evitar a ocorrência de arredondamento de cantos.

Levando esses fatos em consideração, pode-se afirmar que os mesmos fatores responsáveis pela taxa de remoção, também são responsáveis pela formação de arredondamento nos cantos do perfil usinado. Tais fatores, nesse estudo, seriam os seguintes: tensão de trabalho e duração total das descargas elétricas.

Cabe salientar que a área de usinagem influencia na taxa de remoção, mas não possui influência sobre o arredondamento de cantos. O registro de imagens realizado para observação do arredondamento de canto pode ser visto na figura 29, mostrada anteriormente, e os valores das medições dos raios formados estão dispostos na tabela 10.

Tabela 10 - Dados de raios formado durante os ensaios e taxa de remoção de material

Dados de Catálogo					Ensaio		
Regime de Usinagem	Número do Programa	Corrente de Trabalho - PI (A)	Tempo Entre Pulsos - PG (μ s)	Duração do Pulso - PW (μ s)	Raio D (mm)	Raio E (mm)	Taxa Remoção Material (mm^3/min)
Desgaste mínimo	104	2,4	10	32	0,048	0,046	0,219
	112	25,6	100	420	0,446	0,407	51,104
Standard	125	3,2	5,6	18	0,078	0,086	0,475
	132	25,6	56	240	0,407	0,361	54,201
Remoção máxima	145	4	18	56	0,249	0,182	0,836
	151	18,4	24	100	0,385	0,372	43,981

Fonte: O autor

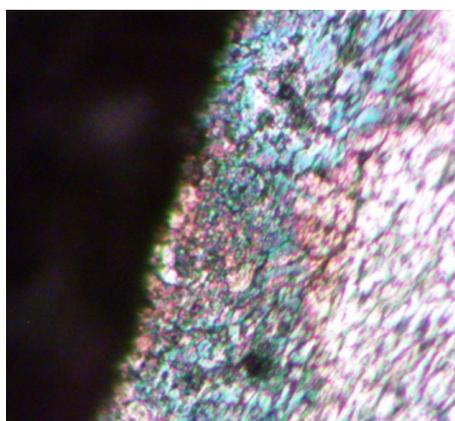
4.7. Camada branca

Na análise da superfície usinada com uso do microscópio foi possível observar a formação da camada branca em quase todas as cavidades usinadas. Essa camada é formada durante o processo, no momento da interrupção da descarga elétrica, quando o material erodido não é expulso pelo fluido dielétrico da área de usinagem e acaba se solidificando na cavidade (AMORIM, 2002).

A diferença entre essa camada e o restante da área avaliada no microscópio pode ser facilmente identificada, devido a sua interação com subprodutos do dielétrico e do eletrodo-ferramenta. O segundo fator responsável pela diferença da camada branca é a rápida solidificação do material, que acaba alterando a sua estrutura.

A única usinagem ensaiada que não apresentou formação de camada branca foi a que utilizou o programa 104, conforme mostrado na figura 30.

Figura 30 - Superfície do ensaio 104, aumento de 400x

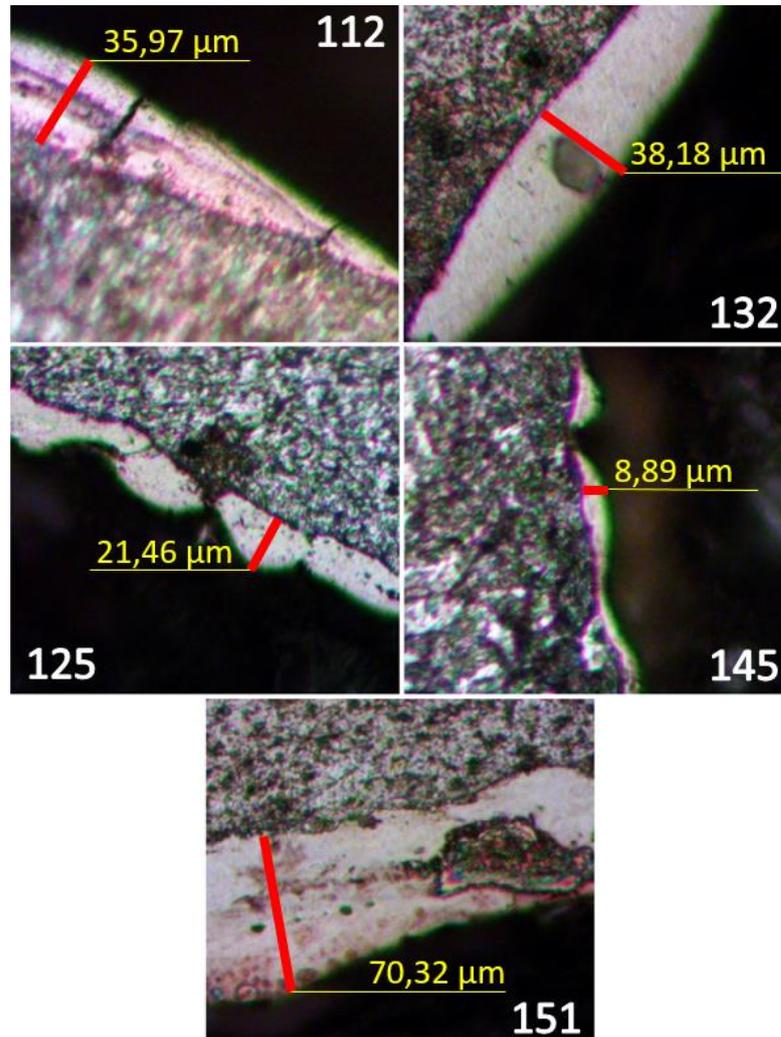


(Fonte: O autor)

Os principais fatores que influenciam na formação da camada branca são a corrente de trabalho e a duração do pulso (LEE; TAI, 2003). Tal afirmação explica o fato de praticamente não haver formação de camada branca no ensaio utilizando o programa de usinagem 104.

Os demais programas de usinagem apresentaram formação dessa camada, variando a sua espessura de acordo com os parâmetros de usinagem. Na figura 31, a seguir, estão dispostas as imagens onde foi encontrada a maior espessura de camada branca para cada ensaio realizado.

Figura 31 - Superfícies com maior espessura de camada branca para cada ensaio, aumento de 400x



(Fonte: O autor)

Essas análises são importantes devido ao fato de que a camada branca é uma região extremamente prejudicial à integridade do material, pois é nela que ocorre, com maior frequência, a formação de micro trincas e micro poros. Esses defeitos podem se propagar, chegando até o material base, e provocar a quebra da peça (AMORIM, 2002).

A propagação das micro trincas acontece principalmente em casos onde há fadiga térmica, ou seja, quando a peça usinada é constantemente aquecida e resfriada, como por exemplo na utilização em moldes de injeção. O procedimento utilizado para eliminar a camada branca após o desbaste é a realização de uma usinagem de acabamento com menor corrente de trabalho, como mostra a figura 30.

Nos ensaios realizados, considerando o aspecto de formação da camada branca, apenas a usinagem utilizando o programa 104 pode ser considerada ideal para realizar o acabamento. A usinagem com a aplicação do programa 145 formou uma camada branca bem reduzida, sendo que também poderia ser utilizada, dependendo da aplicação da peça usinada.

Quanto às demais usinagens, essas apresentaram espessuras maiores de camada branca e, nesses casos, seria necessário realizar sua remoção para garantir a integridade do material usinado.

4.8. Dimensionamento do eletrodo-ferramenta

A partir de todas as informações obtidas no desenvolvimento desse trabalho, foi possível encontrar uma forma de dimensionar o eletrodo-ferramenta buscando maior produtividade e mantendo o acabamento e o dimensional da cavidade de acordo com o desejado. Essa proposta de dimensionamento do eletrodo-ferramenta tem o objetivo de facilitar a definição do seu diâmetro, utilizando eletrodos distintos para as operações de desbaste e acabamento.

A definição do diâmetro do eletrodo de desbaste deverá ser realizada utilizando o diâmetro da cavidade que será usinada, o gap de trabalho e espessura da camada branca.

Para a realização do cálculo, recomenda-se usar a menor dimensão da cavidade permitida pela tolerância de projeto, buscando compensar possíveis erros, como posicionamento e geometria irregular do eletrodo.

Nos ensaios realizados verificou-se que o gap de trabalho obtido ficou com uma variação de aproximadamente 100% do informado no manual. Essa diferença foi considerada na elaboração da equação usada para o cálculo, possibilitando, assim, realizar o cálculo utilizando o gap lateral informado no manual.

A camada branca não é informada no manual, mas possui muita importância nos resultados do processo, pois em grande parte das aplicações de usinagem por eletroerosão é necessário remover a camada branca na etapa de acabamento. O fator de maior influência na

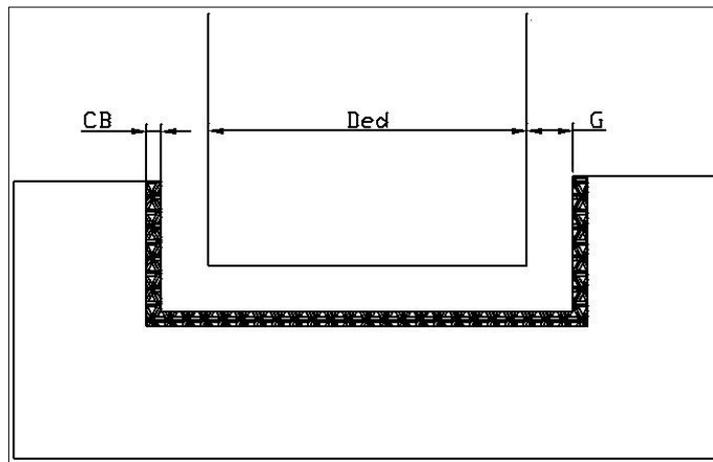
espessura da camada branca é a corrente de trabalho e, por isso, deve ser considerado na realização do cálculo. Para o desenvolvimento do cálculo é necessário considerar o valor de espessura da camada branca do ensaio que possua uma corrente de trabalho mais próxima ao que será usado na usinagem de desbaste. Tais considerações resultaram na equação 5, que pode ser melhor compreendida na figura 32, seguir.

$$D_{ed} = DN - 4G - CB \quad (5)$$

Onde:

- a) D_{ed} – Diâmetro do eletrodo de desbaste;
- b) DN – Diâmetro nominal da cavidade;
- c) G – Gap lateral de trabalho;
- d) CB – Espessura da camada branca.

Figura 32 - Representação das variáveis usadas no cálculo para eletrodo de desbaste



(Fonte: O autor)

O cálculo do diâmetro do eletrodo de acabamento segue uma ideia similar ao do eletrodo de desbaste, mas com algumas considerações diferentes, que serão tratadas adiante.

Nesse caso, a camada branca foi desconsiderada no cálculo, pois sua espessura em operações de acabamento tende a ser próxima a zero. Contudo, mesmo que o acabamento resultasse em uma espessura de camada branca elevada, esta não poderia ser considerada no cálculo, já que teria influência na dimensão final da cavidade.

Para o gap de trabalho não foi considerada a variação nos resultados dos ensaios em relação ao manual, pois essa compensação poderia prejudicar dimensional desejado da cavidade. Apesar de a variação do gap chegar próxima a 100%, levando em consideração valores absolutos, essa diferença é pequena. Por isso, o uso do gap de trabalho informado no manual da máquina pode ser aplicado também ao cálculo do diâmetro do eletrodo de acabamento.

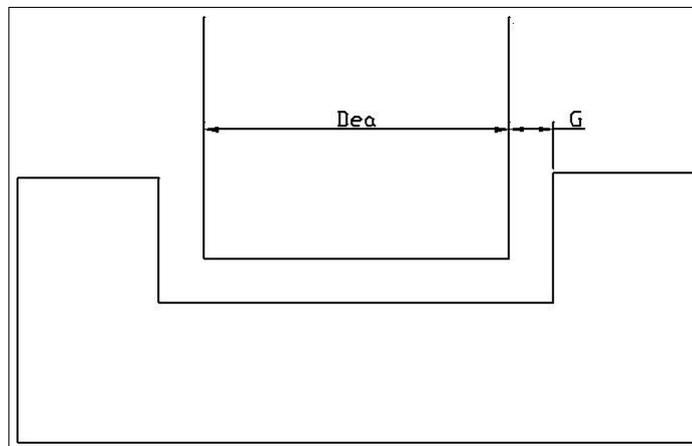
Esses fatos resultaram na elaboração da equação 6, que pode ser melhor compreendida na figura 33, abaixo.

$$Dea = DN - 2G \quad (6)$$

Onde:

- a) Dea – Diâmetro do eletrodo de acabamento;
- b) DN – Diâmetro nominal da cavidade;
- c) G – Gap lateral de trabalho.

Figura 33 - Representação das variáveis usadas no cálculo para eletrodo de acabamento



(Fonte: O autor)

4.9. Definição da profundidade de usinagem

A profundidade de usinagem, assim como as dimensões do eletrodo-ferramenta, é um fator que define diretamente o dimensional da cavidade usinada. Por isso, também foi elaborada

uma equação para calcular a profundidade de usinagem ideal a ser programada na máquina de eletroerosão para obtenção da profundidade da cavidade pretendida.

Utilizando os resultados dos ensaios, foram considerados como dados necessários para cálculo da cavidade: a profundidade da cavidade a ser usinada, o desgaste frontal do eletrodo, o gap de trabalho frontal e a espessura da camada branca.

A definição do valor de espessura da camada branca deve ser feita da mesma forma utilizada para o cálculo de diâmetro do eletrodo. Isso porque durante a medição de espessura da camada branca foram identificados valores similares nas regiões frontal e lateral.

Os valores de gap frontal a serem usados nos cálculos podem ser os mesmos que foram aplicados no cálculo do diâmetro do eletrodo, ou seja, valores informados no manual da máquina. Essa forma de definir o gap frontal foi adotada em virtude de que no manual da máquina não existe essa informação e, normalmente, os valores de gap frontal e lateral são relativamente próximos.

Apesar de ser um fator de influência na definição da profundidade de usinagem, principalmente no desbaste, o desgaste frontal foi desconsiderado no cálculo, pois não foi possível associar os valores obtidos nos ensaios com o desgaste informado no manual da máquina. Isso aconteceu porque nos ensaios de desbaste, apesar de ter ocorrido perda de massa do eletrodo, não houve desgaste frontal.

Na elaboração das equações foram consideradas duas situações, desbaste e acabamento. Sendo que a diferença entre a elas foram as mesmas demonstradas nas equações de cálculo do diâmetro do eletrodo, uso do dobro do valor do gap de trabalho e consideração da espessura da camada branca apenas no cálculo para operação de desbaste.

Assim, as equações de cálculo da profundidade de usinagem para desbaste (Equação 7) e acabamento (Equação 8) foram montadas conforme mostrado a abaixo.

$$Pp = PN - 2G - CB \quad (7)$$

$$Pp = PN - G \quad (8)$$

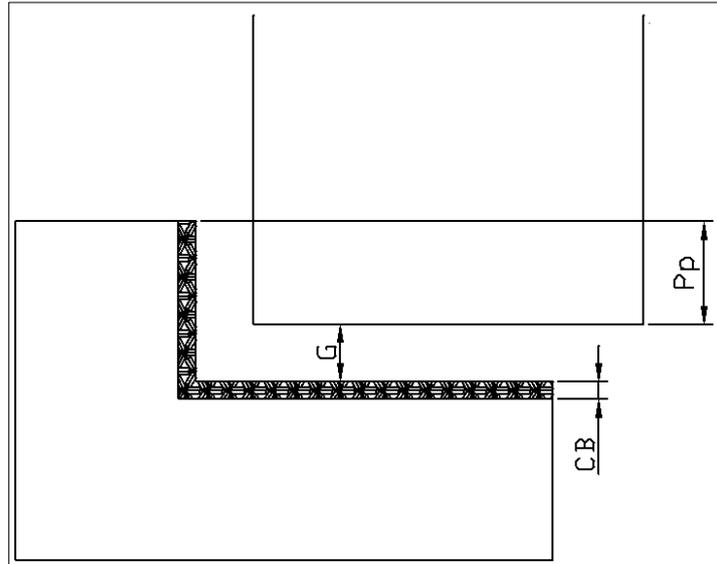
Onde:

- a) Pp – Profundidade programada;
- b) PN – Profundidade nominal da cavidade;
- c) G – Gap frontal de trabalho

d) CB – Espessura da camada branca.

A figura 34, mostrada a seguir, traz a representação de cada variável utilizada nas equações 7 e 8.

Figura 34 - Variáveis utilizadas no cálculo da profundidade de usinagem, visão lateral da usinagem (vista lateral)



(Fonte: O autor)

5. CONCLUSÃO

A realização dos ensaios trouxe uma fonte de informações importantes para o uso da máquina, até mesmo para usuários com conhecimento do processo, pois o estudo apresenta algumas particularidades. Com base nessas informações, o programa de usinagem, as dimensões do eletrodo e a profundidade de usinagem podem ser definidos mais facilmente.

Os resultados de rugosidade da cavidade demonstraram que mesmo no regime de usinagem standard foi possível obter um resultado próximo ao regime de desgaste mínimo. Levando em consideração os programas 104 e 125, que tiveram resultados próximos de rugosidade (1,283 e 1,770 respectivamente) e, comparando essa diferença com o tempo de usinagem de cada programa, percebe-se que o aumento da rugosidade é de apenas 38%, enquanto que o tempo de usinagem se reduz em 66%. Fatos como esse mostram que a seleção de um programa de usinagem com acabamento um pouco abaixo do necessário pode custar uma grande perda na produtividade do processo.

Na análise do desgaste de eletrodo percebeu-se que houve ganho no dimensional frontal nos casos onde foram usados programas destinados ao desbaste. Isso porque nos ensaios realizados a profundidade de usinagem era de apenas 1 mm e eles duraram aproximadamente 10 min. O tempo reduzido não foi suficiente para provocar desgaste nos eletrodos, apesar das altas taxa de remoção. Essa alta taxa de remoção extrai grandes porções de material da cavidade, dificultando a limpeza completa da área de usinagem e provocando solidificação de micropartículas no eletrodo, o que justifica o ganho de massa.

Os ensaios destinados ao acabamento apresentaram desgaste muito acima do informado no manual, o que demonstra a necessidade de operações diferente para desbaste e acabamento, pois esses programas devem ser aplicados em usinagens com remoção de pequenas espessuras de material.

Após a realização das análises dos dados obtidos durante o experimento e comparação com as informações disponibilizadas pelo fabricante da máquina de eletroerosão, foi possível concluir que:

- a) considerando os resultados obtidos com as condições de usinagem ensaiadas, de forma geral, foi possível constatar que os principais fatores de influência nos aspectos avaliados após o processo são os mesmos informados nos programas de usinagens do manual do equipamento. São eles: corrente de trabalho, tempo entre pulsos e duração do pulso. Essa

característica possibilitou que os resultados práticos fossem facilmente associados aos parâmetros de entrada do processo;

b) dependendo do tempo de usinagem, o uso de parâmetros com menor corrente de trabalho pode ocasionar maior desgaste do que quando utilizadas correntes de trabalho elevadas. Por isso, usinagens com baixa corrente de trabalho devem ser aplicadas apenas aos processos onde a área de descarga é reduzida, ou seja, quando usado um eletrodo-ferramenta com dimensões reduzidas ou na etapa de acabamento;

c) alguns dados que não faziam parte do objetivo principal da pesquisa foram observados e relatados para fins de registro, como por exemplo, inclinação lateral da cavidade e arredondamento de cantos, ambos provocados pelo desgaste do eletrodo. Embora não possuam influência no objetivo principal do trabalho, são características que podem ter grande influência em algumas aplicações do processo de eletroerosão, principalmente em usinagens com geometrias reduzidas;

d) a rugosidade, apesar de ser considerada como um dos principais pontos para analisar a qualidade da usinagem, para o processo de desbaste não se mostrou tão importante quanto a espessura da camada branca nas considerações feitas para a elaboração do método de dimensionamento do diâmetro do eletrodo e da profundidade de usinagem. Isso, devido ao fato de que em todos os ensaios onde houve formação de camada branca, sua espessura ficou acima dos valores do parâmetro de rugosidade Rz. Dessa forma, na etapa de acabamento, a remoção da camada branca fará com que a cavidade tenha um melhor acabamento superficial;

e) em relação à comparação dos dados obtidos com os ensaios e os dados fornecidos no manual da máquina, pode-se observar que algumas características de resultados do processo se mostraram bem próximas, como a rugosidade e o desgaste do eletrodo. Entretanto, em alguns aspectos houve bastante diferença, caso da taxa de remoção de material e gap lateral;

f) por fim, pode-se concluir que os objetivos da pesquisa foram alcançados com a elaboração das equações de cálculo dos diâmetros dos eletrodos para os processos de desbaste e acabamento, com a utilização da informação apresentada no manual da máquina como base.

Durante o trabalho foi constatada a necessidade de estudos complementares para reforçar em alguns pontos, o trabalho realizado. Para complementar o cálculo da profundidade de usinagem, seria necessário a realização de estudos focados na avaliação do desgaste frontal, utilizando profundidades de usinagem distintas entre os programas destinados a operação de

desbaste e operação de acabamento. Após esses estudos, a equação desenvolvida poderia ser complementada.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 4287:2002. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.**

AGIECHARMILLES, **Manual da máquina de eletroerosão modelo SP1.**

AMORIM, F.L., **Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga do 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, Brasil, 2002.

AMORIM, F.L.; WEINGAERTNER, W.L., **Influence of Duty Factor on the Die-Sinking Electrical Discharge Machining of High-Strength Copper-Based Alloy for Injection Molds**, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol 26, No. 2, Brazil, pp. 137-144, 2004.

ARANTES, L. J.; SILVA, M., **Avaliação de Superfícies Usinadas por Diferentes Flúidos Dielétricos no Processo de Usinagem por Eletroerosão**. Artigo publicado na Revista Metalúrgica & Materiais, Minas, Ouro Preto, 2003.

CHEN, S. L; YAN, B.H; HUANG, F. Y. **Influence of Kerosene and Distilled Water as Dielectrics on the Electric Discharge Machining Characteristic of Ti-6Al-4V**. Journal of Materials Processing Technology. Taiwan, n. 87, p. 107-111, 1997.

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

CRUZ, C., **Há Inúmeras Maneiras Não-tradicionais de Usinar Materiais: Conheça Alumas**. Máquinas e Metais, São Paulo, ano 29, v. 27, n. 324, p.80-85, 1989.

CRUZ, C., **Introdução à Usinagem Não Tradicional**. Uberlândia-MG: DEEME, 1989.

ENGEMAQ. **Manual de instalação, operação e manutenção da máquina EDM 440 NC**. Caxias do Sul: Agie Charmilles Ltda. 95p.

EL-HOFY, Gawad. **Advanced Machining Processes**. Ed. 1. Estados Unidos da América, 2005.

FULLER, J. E., **Electrical Discharge Machining**. 9th ed. Terre Haute: Joseph R. D., Metals Handbook Machining, 1989.

BENEDICT G. F. **Nontraditional Manufacturing Processes**, Volume 19, CRC Press, 1987.

KERN R., **Sinker Dielectric Fundamentals**. EDM Today 2009. January/February issue.

KOBAYASHI, K. **The Present and Future Developments of EDM and ECM**, ISEM. Ed. 1. Estados Unidos da América, 1995.

König, W., Klocke, F., 1997, **Fertigungsverfahren - 3: Abtragen und Generieren**, Springer, Berlin

LEE, S. H.; LI, X. P. **Study of the Effect of Machining Parameters on the Machining Characteristics in Electrical Discharge Machining of Tungsten Carbide**. Journal of Materials processing Technology 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, Elsevier, Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan, 2003.

LIMA, Francisco Elicivaldo; CORRÊA, Maurício. **Efeitos da Eletroerosão Sobre a Superfície de Peças Usinadas**. Revista Tecnologia, v. 27, n. 1, 2006.

LIMA, R. M.; RASLAN, A. A. **Utilização de Fluidos Dielétricos à Base de Óleos Vegetais na usinagem por Descargas Elétricas por Penetração**. 5° COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Belo Horizonte, 2009.

MACIEL, J. C., “**Aços para molde**”. Villares Metals S/A – Grupo Sidenor, Artigo publicado na revista “O Mundo da Usinagem”, 2003.

McGeough, J.A. **Advanced Methods of Machining**, Springer Science & Business Media, 1988.

NBR ISO 4287, “**Especificações Geométricas do Produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, Definições e Parâmetros da Rugosidade**”, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.

OLINIKI, Ricardo. **Influência da Combinação Entre os Parâmetros de Usinagem por Eletroerosão na Integridade Superficial do Aço AISI H13 Temperado e Revenido**. Tese (Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba, Brasil, 2009.

PANDEY, P. C., **Shan. H. S. Modern Machining Processes**. New Delhi: McGraw Hill, 1985.

SANTOS, I., “**Análise dos parâmetros de entrada na eletroerosão de penetração da liga de titânio Ti-6Al-4V**”, dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2010.

SCHMIDT, I. **Princípios e Processos da Usinagem por Eletroerosão**, Dissertação (Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2012.

SHUMACHER, BM.; DAUW, D.F. **Milestones of Worldwide EDM Research Activities**. Proceedings of 9th International Symposium for Electromachining, vol.1, 1989.

SILVA, E. R., “**Comparação do Desempenho do Fluido Dielétrico Vegetal com Mineral Sintético e Querosene na Eletroerosão do Aço AISI H13**” Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica, Minas Gerais, Brasil, 2007.

SILVA, N. H., **Usinagem de Furos de Pequenos Diâmetros na Liga de Titânio Ti6Al4v em Máquina de Eletroerosão por Penetração**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica, Curitiba, Brasil, 2006.

SINGH, S.; BHARDWA, A. **Review to EDM by Using Water and Powder-Mixed Dielectric Fluid**. *Jornal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. India, v. 10, n. 2, p. 199-239, 2006.

VAN DIJCK, F. **Some Results of Physical Research in EDM**. Bratislava. Proceedings, Bratislava, 1974.

VDI 3402 **“Elektroerosive Bearbeitung – Definitionen and Terminologie”** VDI – handbuch Betriebstechnik, 1976.