



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO



Desenvolvimento de um procedimento para a fabricação de micro eletrodos de seção quadrada por microeletroerosão

Autor: Maria Cristina Minusso Kopacek

Orientador: Prof. Doutor Heraldo Amorim

Porto Alegre, 28 de julho de 2017

Sumário

Abstract	i
Resumo	ii
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	iv
Lista de Abreviaturas e Siglas	v
Lista de Símbolos	vi
1 Introdução	1
2 Revisão bibliográfica	2
2.1 Definição de Eletroerosão	2
2.2 Tipos de Eletroerosão	3
2.3 Tipos de Geradores	4
2.4 Parâmetros Elétricos de Entrada do Processo	6
2.5 Parâmetros Não-Elétricos do Processo	8
2.6 Parâmetros de Saída do Processo	8
3 Fabricação dos Eletrodos	10
3.1 Metodologia do Processo de Fabricação dos Eletrodos	10
3.1.1 Testes Preliminares do Processo de Fabricação dos Eletrodos	12
3.1.2 Projeto de Experimentos do Processo de Fabricação dos Eletrodos	15
3.2 Resultados do Processo de Fabricação dos Eletrodos	16
4 Usinagem dos Furos de Seção Quadrada	21
4.1 Metodologia do Processo de Usinagem dos Furos de Seção Quadrada	21
4.1.1 Testes Preliminares do Processo de Usinagem dos Furos de Seção Quadrada	21
4.1.2 Projeto de Experimentos do Processo de Usinagem dos Furos de Seção Quadrada	22
4.2 Resultados do Processo de Usinagem dos Furos Quadrados	23
5 Conclusão	26
6 Referências	27

Abstract

Electrical discharge machining comes as an interesting machining option for manufacturing of parts with complex features and for processing of hard materials. Since material removal in EDM is not limited by physical contact between tool and material as in traditional machining processes, control of process parameters is especially relevant in this process, where dynamical effects of the influences doesn't allow to determine the material remove in advance. In addition, die-sinking EDM requires a good quality electrode tool in order to obtain acceptable cavities or complex geometries. In that means, machining of square holes is hindered by the lack of square electrodes with angles close to 90 °.

The goal of this work is the development of a methodology for manufacturing tubular square section electrodes from tubular electrodes using die-sinking. This process must include the correct choose of process parameters in order to attend geometrical specifications. These process parameters were studied through a fractioned 2^k design of experiment were influences on corner's angles and material removal during manufacturing of electrodes were evaluated. After definition of process parameters, electrodes manufactured according to the parameters chosen were used in another design of experiments were the influence of process parameters over corner's radius of holes produced with these square section electrodes were evaluated.

With the methodology here implemented using the design of experiment with two fractions, the combination of process parameters for the result desired was achieved. Analyzing the results, time on and time off highlighted as the most relevant process parameters during electrode manufacturing.

Resumo

A eletroerosão aponta como um processo de fabricação interessante e vantajoso na obtenção de formas geométricas complexas e também na usinagem de materiais de alta dureza. Em contraste com processos de usinagem convencionais, na eletroerosão os parâmetros do processo são de difícil controle, uma vez que a dinâmica das suas influências não permite a definição concreta da quantidade de material a ser removido.

Na eletroerosão por penetração de eletrodo, a geometria da cavidade ou furo depende fortemente da qualidade do eletrodo ferramenta utilizado. Dessa forma, a fabricação de micro furos de seção quadrada se depara com a dificuldade de obtenção de eletrodos ferramenta precisos nesta forma com ângulos de quina próximos a 90 °.

O desenvolvimento deste trabalho teve como finalidade a fabricação de eletrodos de seção quadrada a partir de eletrodos tubulares através do processo de eletroerosão. Em um segundo momento, os eletrodos fabricados foram validados através da usinagem de furos de seção quadrada. Ao longo do desenvolvimento buscou-se o conjunto ideal de parâmetros de processo para ambos os casos e também um estudo das influências destes no ângulo de quina e remoção de material durante a fabricação dos eletrodos, bem como sobre o raio de quina, o desgaste da ferramenta e o tempo de processo durante a usinagem dos furos.

Através da metodologia abordada com o projeto de experimentos fracionado pôde-se encontrar o conjunto de parâmetros mais adequado para o processo. Na avaliação final dos resultados obtidos destacou-se a influência do tempo de onda ligado e da corrente sobre as demais variáveis do processo.

Lista de Figuras

1	Representação da eletroerosão	2
2	Fenômeno de formação da descarga	3
3	Tipos de processos de eletroerosão	4
4	Circuito de relaxação	4
5	Curvas de tensão e corrente do gerador de relaxação	5
6	Circuito de tensão e corrente do gerador de pulsos estáticos	5
7	Curvas de tensão e corrente do gerador de pulsos estáticos	6
8	Método de fabricação dos eletrodos	11
9	Medição do ângulo e modelo 3D	12
10	Resultados do pré-teste	13
11	Seção de um microeletrodo produzido na janela de parâmetros definida nos pré-testes.	15
12	Eletrodos fabricados a partir do projeto de experimentos	16
13	Efeito dos parâmetros avaliados sobre o ângulo dos cantos: (a) T_{on} ; (b) interação $M_{descarga}$ e I_s	18
14	Efeito dos parâmetros avaliados sobre o ângulo dos cantos: (a) interação I_s e T_{off} e (b) interação T_{on} e U_s	18
15	Efeito dos parâmetros avaliados sobre a remoção de material lateral: (a) T_{on} ; (b) T_{off}	19
16	Efeito dos parâmetros avaliados sobre a remoção de material lateral: (a) interação $M_{descarga}$ e I_s e (b) interação $M_{descarga}$ e U_s	20
17	Efeito dos parâmetros avaliados sobre a remoção de material lateral: (a) interação T_{on} e T_{off} e (b) interação U_s e T_{off}	20
18	Superfícies superior e inferior de um furo de seção quadrada obtido com um eletrodo produzido segundo os parâmetros definidos.	22
19	Furos usinados com parâmetros do Projeto de Experimentos	23
20	Comparação entre os efeitos dos parâmetros do processo avaliados sobre o raio de quina dos furos usinados	24
21	Efeito dos parâmetros avaliados sobre o raio de quina dos furos usinados: (a) interação T_{on} e $M_{descarga}$ e (b) interação I_s e $M_{descarga}$	25

Lista de Tabelas

1	Propriedades do metal duro	10
2	Parâmetros do pré-teste do processo de fabricação dos eletrodos	13
3	Parâmetros do projeto de experimentos do processo de fabricação dos eletrodos	16
4	Ângulo dos cantos	17
5	Remoção de material	19
6	Parâmetros do projeto de experimentos na usinagem dos eletrodos fabricados	23
7	Resultados do projeto de experimentos na usinagem dos eletrodos	24

Lista de Abreviaturas e Siglas

EDM Electric Discharge Machine. 2, 6–8

Lista de Símbolos

C	Capacitância equivalente do circuito do gerador [μF]. 4, 13, 21
I_s	Corrente da descarga elétrica [A]. iii, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 15–18, 20–25
L_e	Indutância do circuito de descarga do capacitor [H]. 4
L_i	Indutância do circuito de carga do capacitor [H]. 4
$M_{descarga}$	Modo de descarga que define a capacitância equivalente do circuito do gerador. iii, 7, 11, 12, 15–18, 20–25
R_e	Resistência de descarga do capacitor [Ω]. 4
R_i	Resistência de carga do capacitor [Ω]. 4
R_{superf}	Rugosidade Superficial [μm]. 9
T_{off}	Tempo de onda desligado [μs]. iii, 6, 7, 11, 12, 14–26
T_{on}	Tempo de onda ligado [μs]. iii, 3, 6, 7, 9, 11, 12, 15–26
U_s	Tensão de circuito aberto [V]. iii, 3, 6, 7, 11, 12, 15–18, 20–25
V_f	Taxa de desgaste de ferramenta [mm^3/min]. 9
V_m	Taxa de remoção de material [mm^3/min]. 8
X	Eixo translacional de trabalho x. 11, 13, 21
Y	Eixo translacional de trabalho y. 11, 21
Z	Eixo translacional de trabalho z. 11, 21, 22
f_e	Frequência de descarga do capacitor [Hz]. 4
g	Largura da fenda de trabalho [mm]. 8, 11
u_c	Tensão do capacitor do circuito de relaxação [V]. 4
u_d	Tensão de ruptura do dielétrico [V]. 4
u_g	Tensão de fenda de trabalho [V]. 4, 6–8

1 Introdução

A eletroerosão é um processo de usinagem não convencional de crescente uso na indústria, em especial para aplicações como a usinagem de aços-ferramenta tratados termicamente e que possuem dureza elevada, além de cerâmicas dopadas e novos compósitos. Ela é interessante não somente na fabricação de micro furos e cantos tão pequenos quanto $5 \mu m$ mas também para a usinagem de complexas cavidades tridimensionais (K.H.Ho, 2003).

O eletrodo é parte fundamental na eletroerosão uma vez que o resultado do processo depende do seu formato, projeto e material (Fleischer, 2004). Normalmente os eletrodos são fabricados através de processos de corte, usinagem, fundição ou metalurgia do pó e sua fabricação representa mais de 50% do custo e do tempo consumidos no processo como um todo (Jha, 2011).

A evolução da prototipagem e a crescente necessidade de usinar geometrias mais complexas e específicas para cada tipo de aplicação fomenta o desenvolvimento de eletrodos-ferramenta que atendam a essas especificações. Há uma grande demanda de eletrodos de seção quadrada e retangular na indústria têxtil e também para aplicações na nanomedicina, por exemplo.

Neste trabalho buscou-se o desenvolvimento de uma metodologia para a fabricação de eletrodos de seção quadrada por eletroerosão a partir do estudo das influências dos parâmetros de processo sobre as variáveis de resposta. Tem-se aqui, como objetivo específico, a obtenção de eletrodos de seção quadrada com cantos o mais próximos de 90° quanto possível e com bom acabamento superficial.

Após a definição dos parâmetros de processo para a fabricação dos eletrodos serão também definidos os parâmetros de processo para sua utilização na usinagem de furos de seção quadrada. A definição de parâmetros no processo de eletroerosão é dependente de fatores intrínsecos do processo em questão, como os materiais e dimensões do eletrodo e da peça, e da máquina utilizada, entre outros. Devido a esse fato, o procedimento aqui apresentado é único para o contexto dos materiais e métodos utilizados.

O conhecimento do efeito dos parâmetros de processo torna-se uma ferramenta muito útil no controle das características do produto, especialmente na remoção de material e no acabamento superficial. Adicionalmente, a análise dos componentes produzidos pode servir como ferramenta indireta de monitoramento tanto do estado da ferramenta quanto da correta aplicação dos parâmetros de processo pela máquina operatriz.

2 Revisão bibliográfica

Nesse capítulo é apresentada uma revisão teórica a respeito da eletroerosão, tipos de processo e parâmetros de entrada e saída.

2.1 Definição de Eletroerosão

A eletroerosão, também denominada Electric Discharge Machine (EDM), é o processo de fabricação de materiais eletricamente condutivos usando faíscas precisamente controladas entre o eletrodo e a peça na presença de um fluido dielétrico. Ela se diferencia das operações de fabricação devido ao fato do eletrodo (ferramenta) não ter contato físico com a peça de trabalho. Uma vez que o eletrodo não toca a peça, não há força de ferramenta na eletroerosão. O eletrodo deve manter-se afastado da peça à uma distância definida como gap, fundamental para surgimento e propagação da faísca. Em caso de contato entre eletrodo e peça, as descargas elétricas serão interrompidas e o material não será removido (Jameson, 2001). A Figura 1 (adaptada de Jameson, 2001) apresenta o fenômeno da descarga elétrica na eletroerosão.

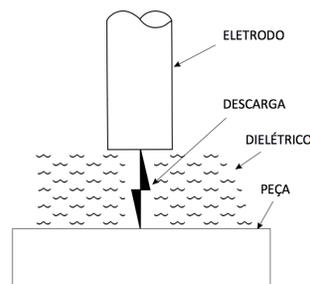


Figura 1: Representação da eletroerosão

O fenômeno de retirada de material na eletroerosão pode ser dividido em três fases: a fase de formação, a fase de descarga e a fase de redução. Na fase de formação, etapas 1 e 2 ilustrada na Figura 2, uma tensão de circuito aberto é aplicada entre o eletrodo e a peça no entanto não há fluxo de corrente nesse momento devido à resistência do fluido dielétrico. À medida que o eletrodo e a peça são aproximados, o campo elétrico entre ambos aumenta e inicia-se, nas regiões mais próximas, a emissão de elétrons do catodo em direção ao anodo. O choque entre os elétrons emitidos e as moléculas do dielétrico promove maior liberação de elétrons e o direcionamento de íons positivos ao catodo, caracterizando a ionização por impacto. Esse fenômeno é intensificado, provocando o superaquecimento e a evaporação parcial do fluido dielétrico, reduzindo sua resistência e possibilitando o aumento da corrente. Neste momento ocorre a queda da tensão e a ruptura do dielétrico, ocasionando o aumento drástico da corrente e a formação do canal de plasma (KÖNIG, 1997).

Durante a fase de descarga, etapa 3 ilustrada na Figura 2, ocorre a intensificação do canal de plasma por um período determinado previamente pelo operador (tempo de onda ligado T_{on}). Durante a aplicação da descarga o sistema de controle do servomecanismo da máquina controla o tamanho da fenda de trabalho (gap) a fim de evitar a formação de arcos e curtos-circuitos. O plasma de alta energia funde continuamente por condução térmica o material do eletrodo e da peça. Devido à alta pressão do plasma pouca quantidade do material fundido é evaporado. A densidade de corrente decresce fortemente com o aumento da profundidade das superfícies do eletrodo e da peça, logo o aumento da temperatura no eletrodo e peça por efeito Joule é desprezível (Amorim, 2002).

Após o término do tempo de onda ligado (T_{on}), o controle do gerador interrompe a corrente e inicia-se então a fase de redução. Durante esse período, etapa 4 ilustrada na Figura 2, denominado tempo de onda desligado, o material fundido é disperso pelo fluido dielétrico, limpando a fenda de trabalho e estabilizando esta para o início do próximo período de descarga (Amorim, 2002). A Figura 2 (retirado de Amorim, 2002) apresenta a evolução da tensão de circuito aberto (U_s) e da corrente (I_s) ao longo da ignição e formação do canal de plasma até a ejeção do material fundido.

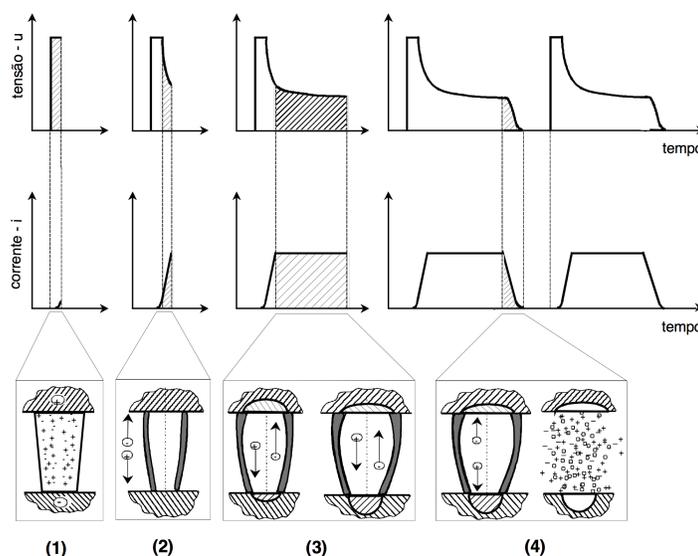


Figura 2: Fenômeno de formação da descarga

2.2 Tipos de Eletroerosão

Os processos de eletroerosão podem ser classificados como eletroerosão por penetração de eletrodo e eletroerosão a fio. Ambos processos utilizam descargas elétricas para remover material eletricamente condutivo, no entanto, há diferenças no seu uso e aplicação. Quanto ao fluido dielétrico, por exemplo, a eletroerosão por penetração de eletrodo utiliza óleos à base de hidrocarbonetos e mantém a peça submersa no fluido durante o processo, enquanto na eletroerosão a fio o fluido

utilizado é água desionizada e somente a área da descarga está submersa. Em termos de aplicação, a eletroerosão por penetração de eletrodo destina-se à produção de furos e cavidades tridimensionais, enquanto a eletroerosão a fio aplica-se a cortes. Além disso, com respeito às descargas, na eletroerosão por penetração de eletrodo estas ocorrem entre a extremidade do eletrodo e da peça, enquanto na eletroerosão a fio estas ocorrem entre a superfície lateral do eletrodo (fio) e a peça Jameson, 2001. A Figura 3 apresenta a eletroerosão por penetração de eletrodo à esquerda e a fio à direita.

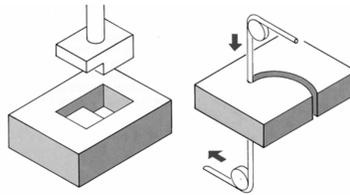


Figura 3: Tipos de processos de eletroerosão

2.3 Tipos de Geradores

Na eletroerosão existem dois tipos principais de geradores: o gerador de relaxação e o gerador de pulsos estáticos (KÖNIG, 1997). O gerador de relaxação funciona de acordo com o circuito apresentado na Figura 4 (retirado de KÖNIG, 1997).

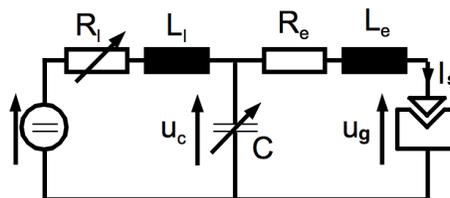


Figura 4: Circuito de relaxação

O circuito do gerador de relaxação é composto por um circuito de carga, representado pelos elementos L_i e R_i e uma fonte de tensão constante, e por um circuito de descarga do capacitor, representado por L_e e R_e e a tensão de gap (u_g). O carregamento do capacitor C é oscilante enquanto a resistência R_i for inferior ao valor de $2\sqrt{\frac{L_i}{C}}$. Quando o valor de R_i aumenta, o carregamento do capacitor é exponencial com constante de tempo dada por $\tau = R_i \cdot C$. Quando a corrente I_s é nula, a tensão u_g tem o mesmo valor da tensão do capacitor (u_c). Conforme u_c eleva-se até a tensão de ruptura do dielétrico u_d , a energia armazenada começa a ser consumida. A frequência de descarga f_e é dada pela equação 1, desconsiderando a resistência R_e (KÖNIG, 1997).

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_e \cdot C}} \quad (1)$$

A Figura 5 (retirado de KÖNIG, 1997) apresenta as curvas de tensão e corrente comuns ao gerador de relaxação.

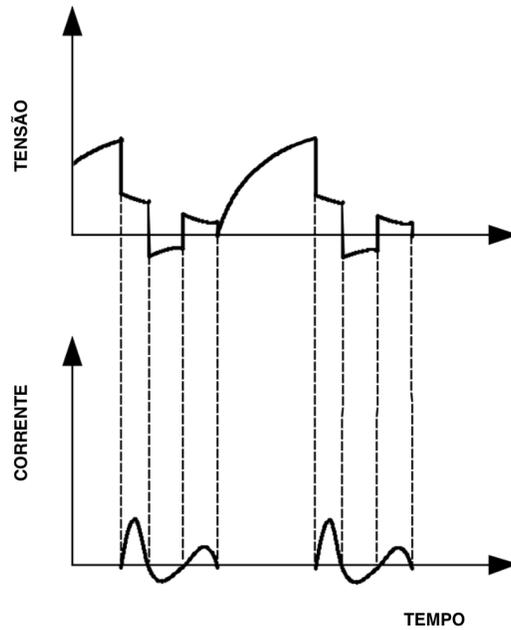


Figura 5: Curvas de tensão e corrente do gerador de relaxação

O segundo tipo de gerador comumente utilizado em máquinas de eletroerosão é o gerador de pulsos estáticos. Esse gerador existe em duas formas construtivas distintas, uma de fonte de corrente e outra de tensão, ambas apresentadas na Figura 6 (retirada de KÖNIG, 1997).

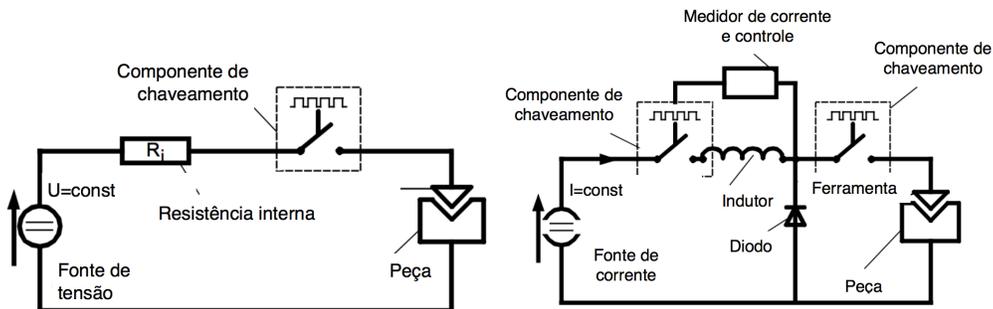


Figura 6: Circuito de tensão e corrente do gerador de pulsos estáticos

O gerador de pulsos estáticos é vantajoso frente ao de relaxação pois nesse é possível definir a energia descarregada através da definição de grandezas fixas para a duração do impulso (T_{on}), da corrente de descarga (I_s) bem como da duração da pausa (T_{off}). Na eletroerosão por penetração de eletrodo, devido à necessidade frequente de um tempo de impulso maior e um tempo de pausa maior, os geradores com fontes de corrente são mais utilizados. No caso da eletroerosão a fio, devido à necessidade frequente de um tempo de impulso (tempo de onda ligado) menor e um tempo de pausa maior (tempo de onda desligado), via de regra os geradores com fonte de tensão são mais utilizados. A forma do impulso desses geradores é retangular, como mostra a Figura 7 (KÖNIG, 1997).

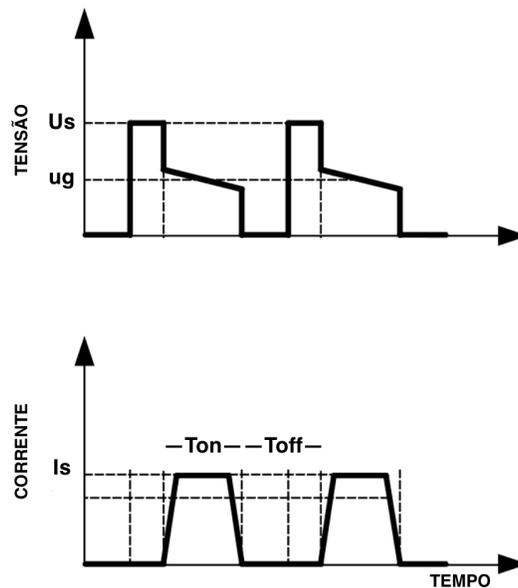


Figura 7: Curvas de tensão e corrente do gerador de pulsos estáticos

2.4 Parâmetros Elétricos de Entrada do Processo

Um aspecto muito importante no estudo da eletroerosão são os parâmetros do processo. Os parâmetros de entrada em EDM podem ser classificados como parâmetros elétricos e parâmetros não elétricos. Os parâmetros elétricos são as variáveis de controle do processo e devem ser definidos de acordo com o tipo de processo e tipo de resultado desejado. Em contrapartida a definição desses parâmetros é uma tarefa difícil uma vez que há a influência de diversos fatores como material do eletrodo e da peça, máquina utilizada e parâmetros não elétricos.

Um parâmetro muito importante é a tensão de circuito aberto (U_s). Antes do início do fluxo de corrente, a tensão de circuito aberto aumenta até criar o canal de ionização pelo dielétrico. Uma vez que a corrente começa a fluir, a tensão cai e estabiliza no valor de u_g . O valor pré-determinado de tensão determina a largura da fenda de trabalho (gap) entre as extremidades do eletrodo e da

peça. Altas tensões aumentam o tamanho do gap, o que contribui para melhora das condições de limpeza e ajuda a estabilizar o corte. A taxa de remoção do material, o desgaste da ferramenta e a rugosidade superficial aumentam com o aumento da U_s , porque a força do campo elétrico aumenta (Singh, 2011).

O parâmetro normalmente mais relevante em EDM é a corrente (I_s). Durante cada tempo de onda ligado, a corrente aumenta até atingir o valor pré-definido, seu valor de pico. Em ambas eletroerosão de penetração de eletrodo e eletroerosão à fio os valores de corrente aplicados são determinados pelo tamanho da área a ser usinada. Altas correntes resultarão em altas taxas de remoção de material contudo à custa de uma alta rugosidade superficial e desgaste da ferramenta. Esses fatores são extremamente importantes em EDM uma vez que as cavidades usinadas são uma imagem espelhada da ferramenta, logo um desgaste excessivo desta implica na perda de precisão (Singh, 2011).

Um terceiro parâmetro de controle é o tempo de onda ligado (T_{on}), período por ciclo no qual é permitido o fluxo de corrente. A remoção de material é diretamente proporcional à quantidade de energia aplicada durante esse tempo. Essa energia é controlada pelo pico de corrente e a duração do tempo de onda ligado (Tomadi, 2009).

O tempo de onda desligado (T_{off}) é definido como o período entre as descargas, ou seja, uma pausa entre os tempos de onda ligado. Esse período permite que o material fundido solidifique-se e seja removido da região da fenda de trabalho. Esse parâmetro afeta o tempo de processo e a estabilidade da usinagem ou corte. No caso de um tempo de onda desligado muito curto, o fluxo de descargas será instável (Tomadi, 2009).

O modo de descarga ($M_{descarga}$) é um parâmetro definido pelo fabricante que determina a capacitância equivalente do circuito do gerador de relaxação. O modo de descarga tem uma denominação diferente de acordo com o fabricante, sendo no caso desse presente trabalho denominado *S – Box* pelo fabricante Agietron. Ele normalmente tem valor nulo quando utilizado o gerador de pulsos estáticos e assume valores correspondentes à capacitância quando utilizado o gerador de relaxação.

Outro parâmetro é a polaridade do eletrodo e da peça que pode ser definida positiva ou negativa. A corrente irá fluir pelo gap e aumentar a temperatura, o que causará a evaporação de material de ambos eletrodos (ferramenta e peça). O canal de plasma é composto de íons e fluxo de elétrons. Elétrons têm menos massa que os ânions e reagem mais rapidamente por isso o anodo é consumido mais rapidamente. A polaridade é determinada experimentalmente e é uma questão de tipo de material do eletrodo e da peça, densidade de corrente e duração do pulso (Mahendran, 2010).

Por fim, o tamanho da fenda de trabalho (gap) também pode ser classificado como um parâmetro elétrico. Na estrutura da máquina EDM existe um servo-mecanismo responsável pelo controle do tamanho da fenda de trabalho (gap), ou seja, da distância entre o eletrodo e a peça, a fim de que este mantenha-se no valor pré-setado. A maioria dos eletro mecanismos (DC ou motores de passo) e sistemas eletro-hidráulicos usados são projetados para responder à média de tensão de fenda de trabalho (u_g) definida. Requerimentos básicos para uma boa performance são a estabilidade do gap

e a velocidade de reação do sistema. A reação deve ser rápida a fim de responder a curto-circuitos. A largura da fenda de trabalho não é medida diretamente, mas pode ser inferida pela média da u_g (Singh, 2011).

2.5 Parâmetros Não-Elétricos do Processo

Além dos parâmetros elétricos apresentados na seção anterior, é de grande relevância a definição dos parâmetros não-elétricos do processo, uma vez que estes influenciam fortemente no resultado. Os parâmetros não elétricos mais importantes são o fluido dielétrico e as formas de limpeza. Adicionalmente o tipo de eletrodo também influencia o processo e pode ser classificado como parâmetro não elétricos de processo.

O fluido Dielétrico é um isolante elétrico que resiste à condução de eletricidade até atingir tensão elétrica suficiente que o transforma em um condutor elétrico. O ponto no qual o fluido se transforma de isolante elétrico para condutor é chamado de ponto de ionização. É comum o uso de óleos derivados de petróleo ou água dionizada (Jameson, 2001). As propriedades do dielétrico também são muito importantes no processo de limpeza do gap das partículas removidas. O desgaste da ferramenta e a taxa de remoção de material dependem da resistência de ionização, condutividade, viscosidade, qualidade e fatores de segurança dos fluidos dielétricos (K.H.Ho, 2003).

As formas de limpeza têm a finalidade de facilitar a limpeza da fenda de trabalho. O dielétrico pode fluir através do canal interno do eletrodo por meio de vácuo, vibração ou jato. Também é possível melhorar as condições de limpeza fazendo movimentos relativos entre o eletrodo e a peça (K.H.Ho, 2003).

O tipo de eletrodo depende do tipo de processo. Na usinagem de cavidades tem-se a necessidade normalmente de eletrodos com geometrias complexas e específicas, o que acarreta um aumento considerável no custo de fabricação. Para a fabricação de furos utiliza-se normalmente eletrodos tubulares. Os eletrodos podem ainda ser classificados quanto ao seu canal interno. Existem configurações sem canal, com um canal somente ou multicanal. Os canais são normalmente circulares mas podem ter formato de estrela também. A existência do canal interno influencia na implementação das formas de limpeza do g que facilitam a neutralização deste e estabilizam o processo (Jha, 2011).

2.6 Parâmetros de Saída do Processo

Inúmeros parâmetros de saída podem ser observados em EDM dependendo do objetivo do processo em questão. No entanto é comum avaliar-se a taxa de remoção de material, a taxa de desgaste de ferramenta e a rugosidade.

A taxa de remoção de material (V_m), também denominada frequentemente de MRR (*material remove rate*), é, segundo KÖNIG, 1997, o volume de material da peça removido por unidade

de tempo. Uma máxima taxa de remoção de material é um importante indicador de eficiência e otimização de custos no processo de eletroerosão, contudo não é desejável para todas aplicações uma vez que o acabamento superficial é comprometido (Tomadi, 2009).

A taxa de desgaste de ferramenta (V_f), também denominada frequentemente de *TWR* (*tool wear rate*), é, segundo KÖNIG, 1997, o volume de material da ferramenta removido por unidade de tempo. O desgaste do eletrodo é resultado do bombardeamento de elétrons bem como de íons positivos. Quando o eletrodo tem polaridade negativa, ele é bombardeado por íons positivos e quando positivo, por elétrons (Jameson, 2001).

A superfície produzida pelo processo de eletroerosão consiste em um grande número de crateras que são formadas de energia de descarga. A rugosidade (R_{superf}) depende principalmente da energia por descarga (Tomadi, 2009). Logo, valores altos de I_s e T_{on} pioram o acabamento superficial.

3 Fabricação dos Eletrodos

3.1 Metodologia do Processo de Fabricação dos Eletrodos

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de eletrodos para a fabricação de furos de seção quadrada através do processo de micro-eletroerosão por penetração. A metodologia aplicada foi separada em duas etapas: a fabricação dos eletrodos e a usinagem dos furos quadrados usando como ferramenta os eletrodos produzidos na etapa anterior. Inicialmente foi realizada uma investigação sobre o efeito dos parâmetros de processo na geometria dos eletrodos, apresentada nesse capítulo. Na sequência utilizou-se o eletrodo proveniente do melhor conjunto de parâmetros para realizar o processo de usinagem dos furos quadrados, que será apresentado no capítulo 4.

Na eletroerosão, a qualidade do formato da cavidade ou furo obtido é influenciada pela qualidade das dimensões do eletrodo-ferramenta. Dessa forma, na fabricação de eletrodos com seção quadrada, deseja-se a obtenção de cantos tão próximos de 90° quanto possível. Sendo assim, definiu-se como objetivo um erro de no máximo $0,1^\circ$ em torno de 90° . Além disso, arestas retilíneas e de mesmo tamanho, assim como a simetria em relação ao canal interno são requisitos de projeto na fabricação de eletrodos. Dessa forma, serão avaliados neste trabalho o ângulo dos cantos e a remoção de material lateral do eletrodo.

Os eletrodos de seção quadrada foram fabricados a partir de eletrodos tubulares através do desgaste desses contra uma superfície reta de uma peça. Este desgaste ocorre à medida que o tubo translada em uma direção paralela à superfície da peça (Figura 8), e é repetido para todas as faces do eletrodo de seção quadrada. A remoção de material dos tubos ocorre devido à inversão da polaridade, fazendo com que, na prática, a peça se comporte como ferramenta. Os eletrodos tubulares utilizados possuem seção circular com diâmetro externo de $0,6\text{ mm}$ e um canal interno em forma de estrela.

Quanto à escolha do material do eletrodo e da peça é necessário que este tenha boa condutividade elétrica e térmica, um ponto alto de fusão, baixa taxa de desgaste e resistência à deformação. Nesse contexto, os eletrodos tubulares utilizados para a fabricação dos eletrodos de seção quadrada foram fabricados em metal duro *CTS20L*. A peça utilizada para efetuar o desgaste do eletrodo também foi fabricada em metal duro. A Tabela 1 apresenta as propriedades dos materiais utilizados na fabricação dos eletrodos tubulares e da peça (catálogo Ceratizit *Wear Parts*).

Tabela 1: Propriedades do metal duro

Propriedade	Valor
Condutividade	85 W/mK
Densidade	$14,45\text{ g/cm}^3$
Módulo de elasticidade	580 GPa
Dureza (HRA)	92,3

A quantidade de material retirada depende da intensidade dos parâmetros elétricos aplicados: tensão de circuito aberto (U_s), corrente (I_s), tempo de onda ligado (T_{off}), tempo de onda desligado (T_{on}), modo de descarga ($M_{descarga}$) e largura da fenda de trabalho, também denominada *gap* (g). Devido a essa influência não é possível especificar previamente o tamanho exato da lateral do eletrodo a ser produzido. Sendo assim, optou-se por fixar g , buscando a remoção de material desejada através da variação dos parâmetros elétricos.

O comprimento do *gap* (g) foi definido a partir das dimensões iniciais e finais do eletrodo. Para tanto, considerou-se um quadrado inscrito em um círculo cujo diâmetro corresponde ao diâmetro inicial do eletrodo. Para o eletrodo utilizado, com diâmetro de $0,6\text{ mm}$, $g = 0,0878\text{ mm}$. A altura dos eletrodos foi definida em 10 mm . A rigidez do sistema é aumentada através do uso de uma guia cerâmica fixada ao eixo por um braço (Figura 8), garantindo o alinhamento e reduzindo a flexão dos eletrodos durante o processo.

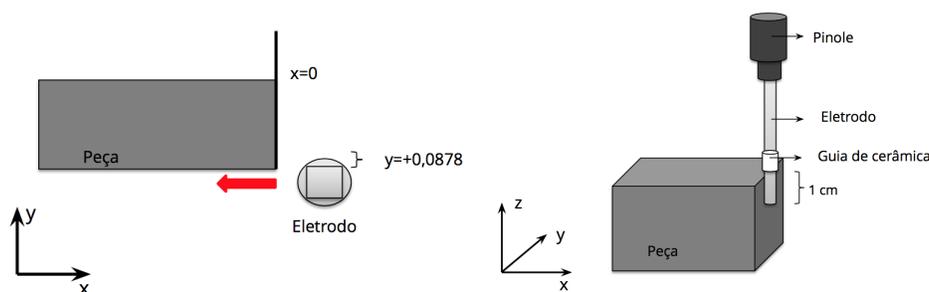


Figura 8: Método de fabricação dos eletrodos

Todas operações de eletroerosão realizadas neste trabalho foram executadas em uma máquina de eletroerosão por penetração Agie Compact 1. Essa máquina é constituída elementarmente por um tanque de trabalho, uma mesa de posicionamento XY e um eixo translacional Z , perpendicular à mesa, onde é fixada a extremidade superior do eletrodo através do *pinole*.

Para a fabricação dos eletrodos, o processo ocorreu imerso em fluido dielétrico IME 63. Não foi utilizado nenhum tipo de limpeza.

Após definida a forma como o eletrodo será fabricado, a largura da fenda de trabalho (*gap*), a altura e material do eletrodo, dielétrico e tipo de fixação, é necessário ainda a escolha dos parâmetros elétricos do processo. Nesse trabalho serão estudadas as influências dos seguintes parâmetros: tensão de circuito aberto (U_s), corrente (I_s), tempo de onda ligado (T_{off}), tempo de onda desligado (T_{on}), modo de descarga ($M_{descarga}$) e polaridade.

Para validação dos eletrodos produzidos utilizou-se o sistema de medição Alicona Infinite Focus. Durante a medição o eletrodo foi fixado em uma posição perpendicular à lente do sistema e através da variação do foco obteve-se um modelo 3D cara cada canto. Lentes com aumento de $10X$ e resoluções lateral e vertical de $3,68\ \mu\text{m}$ e $572\ \text{nm}$ respectivamente foram utilizadas.

Após a obtenção do modelo tridimensional, a medição do ângulo do canto é feita selecionando-

se com uma linha a região onde se deseja traçar um perfil. A largura, comprimento e inclinação dessa linha influenciam no perfil obtido, pois o software faz uma média dos pontos. Dispondo desse perfil, seleciona-se a região de interesse, nesse caso, a intersecção das duas arestas, e um círculo é gerado, a partir do qual são obtidos o raio e o ângulo de quina do perfil. Três linhas foram traçadas ao longo de cada canto do eletrodo e a média dos ângulos obtidos para essas três linhas foi considerada (Figura 9).

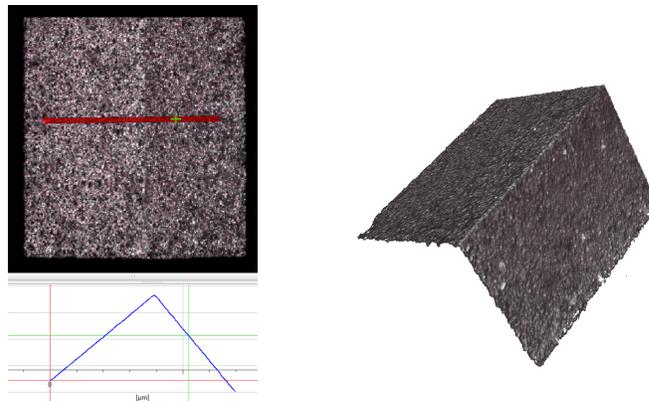


Figura 9: Medição do ângulo e modelo 3D

3.1.1 Testes Preliminares do Processo de Fabricação dos Eletrodos

Os parâmetros de controle do processo de eletroerosão são intrínsecos de cada projeto em particular. Os valores adequados a serem empregados dependem do material, forma e tamanho do eletrodo e da peça, bem como da máquina em questão, da direção de desgaste ou profundidade do furo, do tipo de limpeza empregada e também do fluido dielétrico. Sendo assim, não há literatura que aborde perfeitamente o caso aqui apresentado. Contudo é possível definir uma janela de operação considerando os limites dos parâmetros da máquina e o objetivo do trabalho aqui proposto, que é a obtenção de eletrodos de seção quadrada com cantos tão próximos de 90° quanto possível e com bom acabamento superficial. Para obter-se um bom acabamento superficial é necessário remover material a uma taxa lenta, o que exige menor energia durante a criação do canal ionizado e do colapsamento da faísca.

A tensão de circuito aberto (U_s) determina a largura do gap e valores altos desta implicam em alta taxa de desgaste do material e aumento da rugosidade. Portanto, definiu-se nesse primeiro momento $U_s = 60 V$, valor mínimo possível na máquina utilizada. A corrente também deve ser moderada, uma vez que altas correntes implicam em altas taxas de remoção de material, com influências desgastivas sobre a qualidade da superfície. Da mesma forma, o T_{on} alto implica em uma maior quantidade de energia aplicada e em uma maior taxa de remoção de material. O T_{off} , em oposição, é importante para a neutralização do gap e dispersão das partículas removidas, ou seja, sua duração prolongada é desejada. O $M_{descarga}$ define a capacitância do circuito do gerador e

quanto mais alta, maior é a taxa de remoção de material e menor é a qualidade superficial. Durante a execução dos pré-testes, C foi fixada no valor mínimo permitido. Uma vez que a remoção de material deverá ocorrer no eletrodo, optou-se por mantê-lo com polaridade positiva. A Tabela 2 ilustra os conjuntos de parâmetros utilizados.

Tabela 2: Parâmetros do pré-teste do processo de fabricação dos eletrodos

Eletrodo	$I_s [A]$	$T_{on} [\mu s]$	$T_{off} [\mu s]$
1	8,3	5,6	3,2
2	2,4	5,6	3,2
3	1,8	3,2	5,6
4	1,4	3,2	5,6
5	1,4	3,2	10
6	0,8	3,2	5,6

Ao iniciar-se o programa, dielétrico filtrado flui para o tanque da máquina. Na sequência o eletrodo desloca-se em X , aproximando-se da peça até a posição inicial. A partir dessa posição inicia-se a formação da camada de plasma e conseqüentemente o processo de desgaste do eletrodo. O eletrodo desloca-se por 10 mm contra a peça. Finalizada essa etapa, o eletrodo se afasta da peça, retornando à posição inicial, onde rotaciona $+90^\circ$ e repete-se o processo de desgaste da próxima lateral. Após a finalização das quatro faces o programa se encerra e o tanque preenchido com fluido dielétrico se esvazia. A Figura 10 ilustra os resultados obtidos com a implementação dos parâmetros citados na Tabela 2.

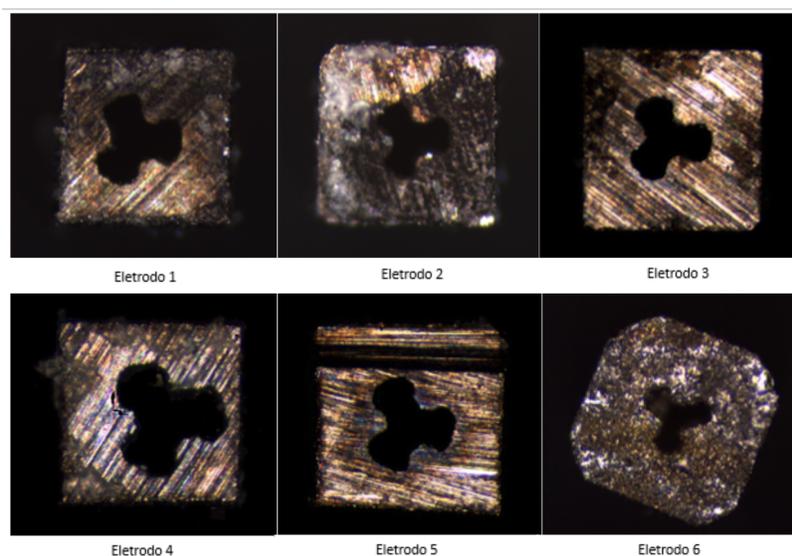


Figura 10: Resultados do pré-teste

Ao observar as imagens dos eletrodos obtidos nos testes preliminares são evidentes três problemas:

- 1. cantos arredondados (eletrodos 2, 3, 5 e 6);
- 2. arestas do eletrodo não retilíneas (eletrodo 1) e não centralizadas com relação a seu canal interno (eletrodo 4);
- 3. eletrodos fabricados com os mesmos parâmetros elétricos apresentaram aparências diferenciadas.

Com relação ao primeiro problema pode-se inferir que os parâmetros utilizados foram de intensidade muito alta ou muito baixa. Com relação ao segundo problema, diversos fatores podem ser responsáveis, como a não estabilidade do processo, o desgaste da peça ou ainda a assimetria original do eletrodo circular. A respeito do problema 3 pode-se inferir que o desgaste da peça causou a obtenção de formatos diferenciados.

Refletindo-se sobre possíveis soluções conclui-se que, considerando que o alinhamento da peça e do conjunto eletrodo-pinole é garantido pelos instrumentos utilizados, deve-se investigar, em um primeiro momento, o desgaste da peça e em um segundo momento, otimizar os parâmetros elétricos implementados.

O desgaste da peça é um efeito inevitável neste processo de eletroerosão. Uma vez que é criado o canal de plasma, ainda que a polaridade da peça seja negativa e os elétrons devam fluir do eletrodo, há aquecimento também da superfície do catodo, o que implica na remoção de material deste. Ao analisar o desgaste atingido operando com o primeiro conjunto de parâmetros acima citado (linha 2 da Tabela 2), verificou-se um desgaste de 0,038 mm na peça após a fabricação da primeira face, o que representa aproximadamente 40 % do desgaste do eletrodo. No segundo (linha 3 da Tabela 2) e no terceiro (linha 4 da Tabela 2), os valores de desgaste da peça obtidos foram, respectivamente, 0,045 mm e 0,014 mm, representando 55 % e 15 %.

Os desgastes obtidos correspondem ao comportamento esperado, uma vez que no terceiro conjunto de parâmetros o T_{off} é maior que nos anteriores. Assim, nessas condições, espera-se menor desgaste do catodo.

Apesar de comum ao processo de eletroerosão, no caso específico desse trabalho, o desgaste representa um problema ainda maior, uma vez que altera a referência definida para a largura do desgaste de cada face do mesmo eletrodo, provocando a descentralização e assimetria das arestas. Adicionalmente, deseja-se estudar a influência dos parâmetros elétricos com interferência mínima de efeitos mecânicos. Dessa forma buscou-se aperfeiçoar o processo a fim de compensar o efeito do desgaste da peça incrementando o deslocamento do eletrodo ao longo da peça a cada face e garantindo que todas as faces sejam desgastadas em uma parte da peça onde ainda não houve nenhum desgaste. Da mesma forma, a cada novo eletrodo produzido, desloca-se a posição inicial para uma região da peça que não tenha sido utilizada.

Repetindo o teste com o conjunto de parâmetros definido na linha 5 da Tabela 2, os resultados

obtidos demonstram que a compensação foi eficiente, como indica a Figura 11.

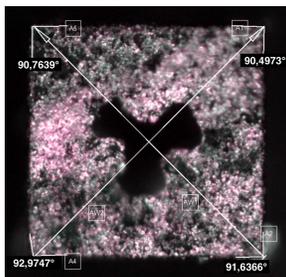


Figura 11: Seção de um microeletrodo produzido na janela de parâmetros definida nos pré-testes.

3.1.2 Projeto de Experimentos do Processo de Fabricação dos Eletrodos

A metodologia do projeto de experimentos destina-se a otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento. Seu uso permite a estruturação de uma seqüência de ensaios de forma a traduzir os objetivos preestabelecidos pelo pesquisador. A metodologia de projeto de experimentos é utilizada na otimização de um sistema. Define-se como sistema, qualquer produto, processo ou serviço. Um sistema é avaliado por indicadores de desempenho, ou seja, características de qualidade resultantes da operação do mesmo (Ribeiro, 2011).

Dentre as estruturas de projetos de experimentos é muito usual a utilização de experimentos fatoriais do tipo 2^k onde cada parâmetro de entrada é variado em dois níveis. O número total de experimentos (N) para um projeto fatorial completo é dado por $N = 2^k$, onde k representa o número de fatores variados. Em certas aplicações, devido a limitações de custo e tempo, deseja-se reduzir o número de experimentos, para isso são definidas estruturas de projeto de experimentos fracionados. A forma dessa estrutura é dada por 2^{k-p} , onde p representa o número de geradores independentes. A escolha de p deve ser muito cuidadosa para que não ocorra a combinação de fatores relevantes (D.C., 1997).

Na execução deste trabalho utilizou-se Projeto de Experimentos para avaliar as influências dos parâmetros elétricos do processo. Entre os diferentes tipos de projeto de experimentos, optou-se por um projeto de experimentos fatorial de dois níveis com um quarto de fração, ou seja, um projeto 2^{k-p} . Os parâmetros de entrada considerados são U_s , I_s , T_{off} , T_{on} e $M_{descarga}$, logo $k = 5$. O fracionamento do projeto de experimentos permite reduzir o número de combinações testadas de 32 para 8, o que é interessante nessa aplicação uma vez que os custos de um experimento são relevantes. Por outro lado, ao fracionar um experimento os efeitos dos parâmetros acabam por confundir-se com os efeitos de interações.

Os níveis inferiores e superiores de U_s , I_s , T_{on} e T_{off} foram definidos com base nos pré-testes realizados, resultando nos conjuntos de parâmetros de processo apresentados na Tabela 3, com cada condição de fabricação repetida 4 vezes. Os parâmetros de saída analisados foram o ângulo dos cantos e a taxa de remoção de material do eletrodo.

Tabela 3: Parâmetros do projeto de experimentos do processo de fabricação dos eletrodos

Experimento	$M_{descarga}$	T_{on} [μs]	T_{off} [μs]	I_s [A]	U_s [V]
1	21	2,4	5,6	3,2	80
2	22	2,4	5,6	1,4	60
3	21	5,6	5,6	1,4	80
4	22	5,6	5,6	3,2	60
5	21	2,4	10	3,2	60
6	22	2,4	10	1,4	80
7	21	5,6	10	1,4	60
8	22	5,6	10	3,2	80

3.2 Resultados do Processo de Fabricação dos Eletrodos

A Figura 12 apresenta os eletrodos fabricados com os parâmetros de processo definidos no projeto de experimentos. Nessa figura cada eletrodo representa um conjunto de parâmetros da Tabela 3. Observa-se que, em comparação com os eletrodos obtidos nos testes preliminares, os obtidos a partir do projeto de experimentos possuem as arestas simétricas em relação ao canal interno e os cantos estão mais próximos de 90° . Observa-se que o eletrodo de número 7 apresenta, diferentemente dos demais, canal interno circular. Como no processo de fabricação não foi utilizado fluxo de dielétrico através do canal interno do eletrodo, o formato diferente do canal não influencia em nada nos resultados avaliados, ou seja, não afeta o ângulo dos cantos e a remoção de material lateral.

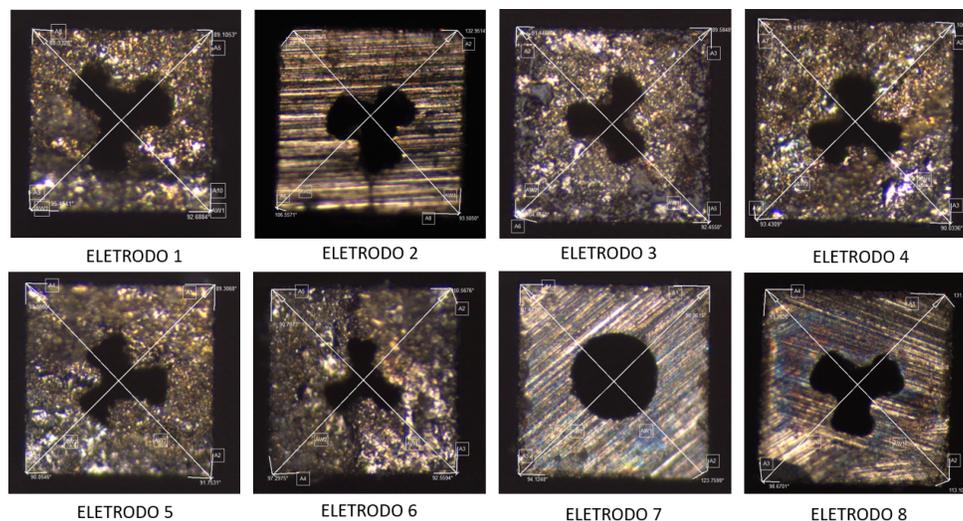


Figura 12: Eletrodos fabricados a partir do projeto de experimentos

As variáveis de saída avaliadas no projeto de experimentos do processo de fabricação dos eletrodos foram os quatro ângulos dos cantos do eletrodo e a remoção de material lateral do eletrodo. Inicialmente são apresentados os resultados referentes ao ângulo dos cantos. Para a avaliação dos ângulos medidos na análise de variância, considerou-se o desvio angular, a diferença entre os ângulos obtidos e 90° .

A tabela 4 apresenta o valor da média e do desvio padrão dos ângulos das arestas. Ao avaliar-se os valores dos ângulos medidos para os cantos quanto ao erro máximo de $0,1^\circ$ desejado, observa-se que os eletrodos provenientes dos conjuntos de parâmetros 3, 5 e 8 atingiram o resultado desejado. Adicionalmente o eletrodo proveniente do parâmetro 3 apresentou o melhor resultado e portanto é o escolhido para realizar a etapa posterior de usinagem dos furos quadrados, apresentada no próximo capítulo desse trabalho.

Tabela 4: Ângulo dos cantos

Experimento	Média dos Ângulos [$^\circ$]	Variância [$^\circ$]
1	89,511	0,883
2	89,718	0,566
3	90,023	0,155
4	89,892	0,440
5	89,915	0,114
6	89,425	0,379
7	89,790	0,367
8	90,055	0,284

Através da análise de variância, verificou-se que, para um intervalo de confiança de 0,1, T_{on} e o efeito combinado de $M_{descarga}$ e I_s têm influência significativa sobre o desvio dos ângulos dos cantos em relação ao valor desejado de 90° . Adicionalmente, vale ressaltar que o tipo de projeto de experimentos escolhido, fatorial 2^{k-p} com um quarto de fração, implicou na confusão do parâmetro T_{on} com o efeito associado de $M_{descarga}$ com I_s , dificultando a interpretação dos efeitos reais de cada um. A Figura 13 apresenta o efeito isolado de T_{on} e o efeito combinado de $M_{descarga}$ com a I_s sobre os ângulos dos cantos.

Observa-se na Figura 13a que os ângulos dos cantos apresentam-se mais distantes do valor desejado de 90° quando utilizado um T_{on} menor e mais próximos de 90° quando utilizada um T_{on} maior. Uma explicação possível é que menores tempos de onda ligada permitam menor remoção de material, resultando em maior arredondamento (ângulos maiores que 90°). O uso do projeto fatorial fracionado fez com que o efeito de T_{on} fosse confundido com o efeito da interação entre $M_{descarga}$ e I_s , Figura 13b, que também aparece como significativo na ANOVA.

Além disso, apesar de não evidenciados como fatores significativos pela análise da ANOVA no intervalo de confiança definido, os efeitos associados da I_s com o T_{off} (Figura 14a) e do T_{on} com a U_s (Figura 14b) apresentaram-se elevados.

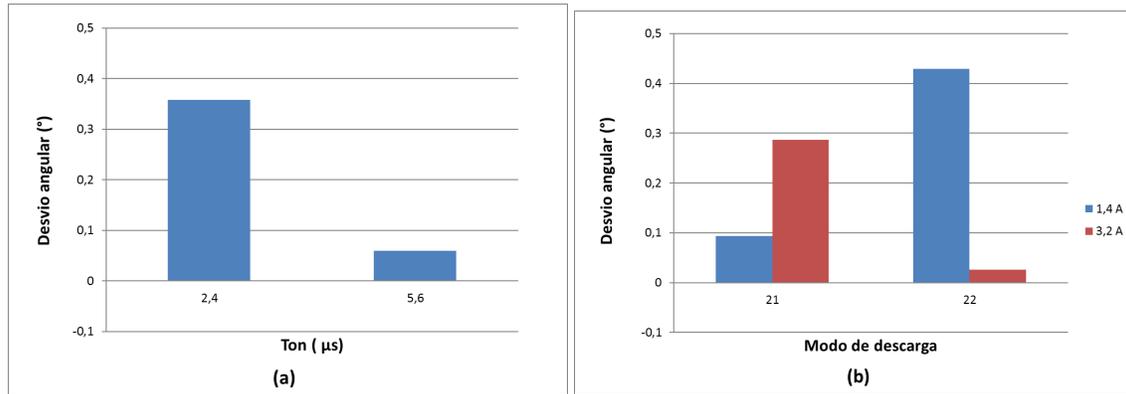


Figura 13: Efeito dos parâmetros avaliados sobre o ângulo dos cantos: (a) T_{on} ; (b) interação $M_{descarga}$ e I_s

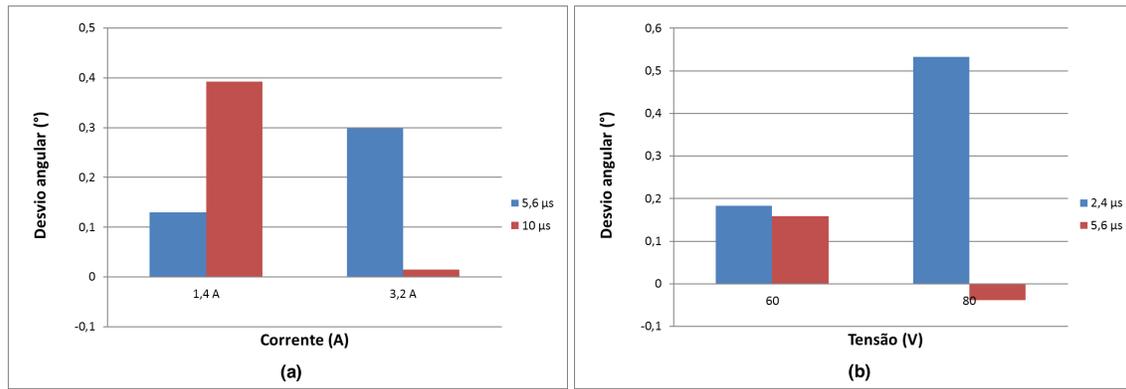


Figura 14: Efeito dos parâmetros avaliados sobre o ângulo dos cantos: (a) interação I_s e T_{off} e (b) interação T_{on} e U_s

No gráfico do efeito associado de I_s com T_{off} (Figura 14a) verifica-se que para baixas correntes o aumento do tempo de onda desligado, ou seja, de pausa, implica em erros maiores no ângulo enquanto para correntes mais altas, o T_{off} maior implica em um erro menor. Esse comportamento pode estar associado ao fato de que ao aplicar-se correntes mais altas um tempo maior para equilibrar a área de trabalho entre o eletrodo e a peça é necessário. Desse modo, o uso de um T_{off} mais logo implica em uma menor taxa de remoção de material.

No gráfico do efeito associado de T_{on} com U_s (Figura 14b) verifica-se que para uma U_s alta e um T_{on} alto o desvio angular é negativo, ou seja, os ângulos dos cantos para essa condição são maiores que 90° . Ainda assim o módulo nessa condição é menor que o módulo do desvio angular para a condição de U_s alta e T_{on} baixo, ou seja, o erro é menor para U_s e T_{on} altos.

Em um segundo momento foi avaliada a remoção de material lateral do eletrodo. A tabela 5 apresenta os valores medidos de remoção de material durante o processo de fabricação.

Tabela 5: Remoção de material

Experimento	Lateral 1 [mm]	Lateral 2 [mm]	Lateral 3 [mm]	Lateral 4 [mm]
1	0,08	0,096	0,097	0,084
2	0,11	0,100	0,090	0,090
3	0,079	0,072	0,073	0,084
4	0,059	0,072	0,077	0,063
5	0,098	0,095	0,09	0,082
6	0,091	0,09	0,09	0,085
7	0,094	0,083	0,082	0,093
8	0,082	0,094	0,085	0,079

A análise de variância indica que, para um intervalo de confiança de 0,05, T_{on} e T_{off} têm efeito significativo sobre a remoção de material da lateral do eletrodo. A Figura 15 apresenta os efeitos de T_{on} (a) e de T_{off} (b) sobre a remoção de material. Estes resultados não estão de acordo com o esperado, o que pode se dever à influência das interações confundidas.

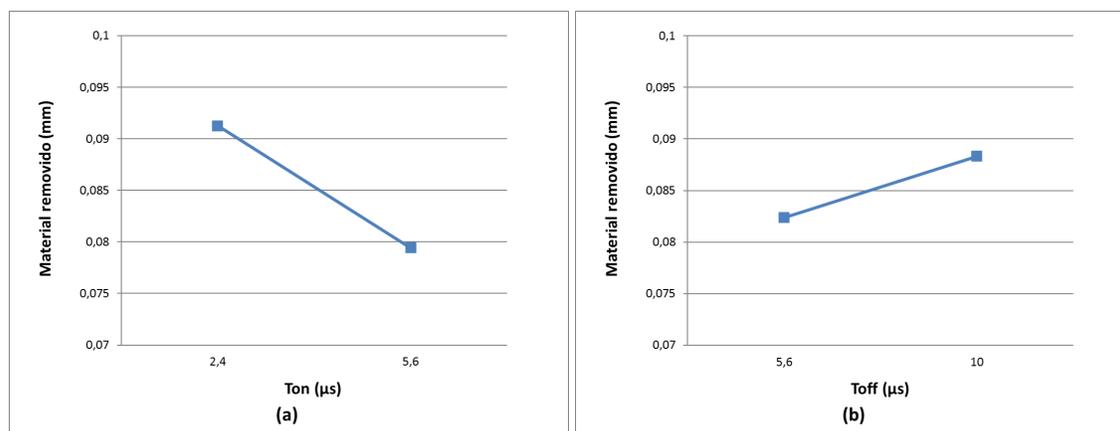


Figura 15: Efeito dos parâmetros avaliados sobre a remoção de material lateral: (a) T_{on} ; (b) T_{off}

Através dos gráficos de T_{on} e de T_{off} verifica-se que a quantidade de material removido de cada lateral diminui com o aumento de T_{on} e aumenta com o aumento de T_{off} .

A Figura 16 apresenta os efeitos associados do modo de descarga (associado à capacitância) com a corrente (a) e com a tensão (b). Através do gráfico (a) verifica-se que para um modo de descarga menor (capacitância menor) a corrente maior remove mais material enquanto para um modo de descarga maior (capacitância maior) a corrente menor remove mais material. Através do gráfico (b) verifica-se que para um modo de descarga menor (capacitância menor) a tensão mais baixa remove mais material, enquanto para um modo de descarga maior (capacitância maior) a tensão mais elevada resulta em maior remoção de material.

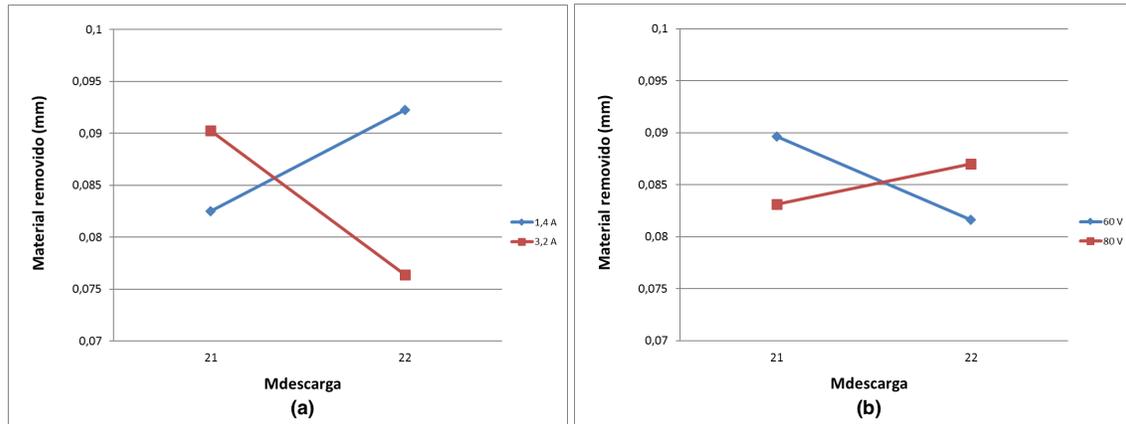


Figura 16: Efeito dos parâmetros avaliados sobre a remoção de material lateral: (a) interação $M_{descarga}$ e I_s e (b) interação $M_{descarga}$ e U_s

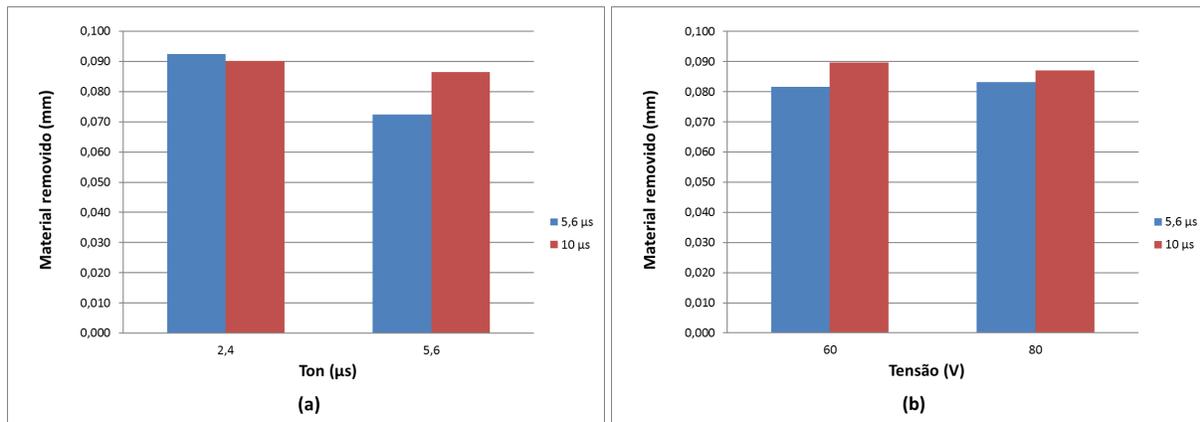


Figura 17: Efeito dos parâmetros avaliados sobre a remoção de material lateral: (a) interação T_{on} e T_{off} e (b) interação U_s e T_{off}

A Figura 17 apresenta os efeitos associados do tempo de onda ligado com o de onda desligado e o efeito da tensão associado com o tempo de onda desligado. No gráfico (a) verifica-se que para um intervalo de T_{on} menor a influência do T_{off} não é influente enquanto para intervalos maiores de T_{on} o uso de um T_{off} mais longo aumenta a taxa de remoção de material. No gráfico (b) nota-se que o efeito de T_{off} apresenta pouca variação em função das duas tensões testadas.

4 Usinagem dos Furos de Seção Quadrada

4.1 Metodologia do Processo de Usinagem dos Furos de Seção Quadrada

Finalizada a etapa de investigação sobre o efeito dos parâmetros de processo na fabricação dos eletrodos, seguiu-se com o processo de usinagem dos furos de seção quadrada. Nesse processo investigou-se sobre o efeitos dos parâmetros de processo na geometria dos furos obtidos. Esse furos foram usinados utilizando como ferramenta o eletrodo proveniente do melhor conjunto de parâmetros da etapa anterior.

Na usinagem de furos quadrados deseja-se obter cantos o mais próximo de 90° quanto possível, assim como arestas retilíneas e mesmas dimensões para os furos da base e do topo. Adicionalmente tem-se interesse na redução do desgaste do eletrodo uma vez que este compromete o formato dos furos obtidos. Para a análise da perpendicularidade dos cantos dos furos de seção quadrada foi analisado nessa etapa o raio de quina do furos, onde um raio menor representa um resultado melhor.

Dessa forma, o processo aqui abordado se preocupará essencialmente com o estudos das influências dos parâmetros do processo: tensão de circuito aberto (U_s), corrente (I_s), tempo de onda ligado (T_{on}), tempo de onda desligado (T_{off}), modo de descarga ($M_{descarga}$) e polaridade. A saídas observadas serão: raio dos cantos dos furos quadrados, desgaste do eletrodo e tempo de processo.

O material dos eletrodos e da peça, onde serão usinados os furos, é metal duro *CTS20L*. A peça trata-se de uma placa de 1 mm de espessura, que foi fixada perpendicularmente ao eletrodo que, por sua vez, foi fixado no pinole no eixo axial Z .

4.1.1 Testes Preliminares do Processo de Usinagem dos Furos de Seção Quadrada

Analogamente ao processo de fabricação dos eletrodos, realizou-se em um primeiro momento um pré-ensaio com o objetivo de encontrar uma janela de parâmetros adequados.

O processo de usinagem dos furos quadrados, assim como na fabricação dos eletrodos, requer o emprego de baixa quantidade de energia, uma vez que a finalidade é obter uma boa qualidade superficial e também reduzir o desgaste do eletrodo. Dessa forma iniciou-se com o emprego de de uma baixa tensão de circuito aberto ($U_s = 60V$), baixa corrente ($I_s = 1,4A$), baixa capacitância ($C = 33nF$), curto tempo de onda ligado $T_{on} = 3,2s$ e longo tempo de onda desligado $T_{off} = 7,5s$.

Diferentemente do processo de fabricação dos eletrodos, na obtenção de furos deseja-se remover material da peça e evitar o desgaste do material do eletrodo. Portanto, nesse caso, a polaridade direta é utilizada, ou seja, o eletrodo tem polaridade negativa e a peça polaridade positiva.

O processo se inicia com o alinhamento entre eletrodo e peça, a fim de garantir o perpendicularismo entre ambos. Na sequência a posição inicial (X, Y, Z) do eletrodo é definida. Durante o

processo o eletrodo se desloca na direção Z negativa e, ao retirar material da peça, produz o furo quadrado. A distância que o eletrodo se desloca verticalmente é relevante: uma vez que se deseja a obtenção de furos passantes, é necessário considerar a espessura da peça e também o desgaste estimado para o eletrodo. Considerando os corpos de prova utilizados, com espessura de $1mm$, optou-se por um deslocamento total de $-1cm$.

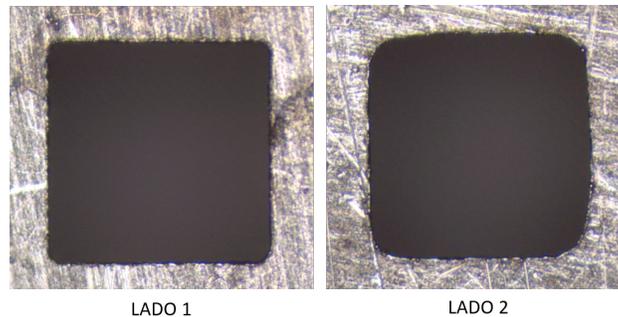


Figura 18: Superfícies superior e inferior de um furo de seção quadrada obtido com um eletrodo produzido segundo os parâmetros definidos.

A Figura 18 apresenta as superfícies superior (lado 1) e inferior (lado 2) da seção de um furo produzido com os eletrodos desenvolvidos. É possível observar que os ângulos ainda são levemente arredondados. Além disso a seção inferior do furo é menor que a superior. Desse modo, optou-se pela utilização de parâmetros mais brandos, ou seja, menos energia, e aumentar o deslocamento vertical em Z .

4.1.2 Projeto de Experimentos do Processo de Usinagem dos Furos de Seção Quadrada

De forma análoga ao processo de fabricação dos eletrodos, aqui também utilizou-se um projeto de experimentos fatorial de dois níveis com um quarto de fração, ou seja, um projeto definido por $N = 2^{k-p}$. Os parâmetros de entrada considerados serão: tensão de circuito-aberto (U_s), corrente (I_s), tempo de onda ligado (T_{on}), tempo de onda desligado (T_{off}) e modo de descarga ($M_{descarga}$), logo $k = 5$. Cada parâmetro foi variado em dois níveis. Para cada conjunto de parâmetros foram avaliados os quatro raios de quina da seção superior, o desgaste da ferramenta e o tempo de processo.

Os intervalos de U_s , I_s , T_{on} e T_{off} foram definidos com base nos pré-ensaios realizados e considerando que deve-se trabalhar com menos energia. Para cada conjunto de parâmetros do projeto de experimentos foi utilizado um eletrodo novo. A Tabela 6 descreve os parâmetros utilizados.

Tabela 6: Parâmetros do projeto de experimentos na usinagem dos eletrodos fabricados

Experimento	$M_{descarga}$	T_{on} [μs]	T_{off} [μs]	I_s [A]	U_s [V]
1	21	3,2	7,5	3,2	80
2	22	3,2	7,5	1,4	60
3	21	5,6	7,5	1,4	80
4	22	5,6	7,5	3,2	60
5	21	3,2	10	3,2	60
6	22	3,2	10	1,4	80
7	21	5,6	10	1,4	60
8	22	5,6	10	3,2	80

4.2 Resultados do Processo de Usinagem dos Furos Quadrados

A Figura 19 apresenta respectivamente as seções superior (à esquerda) e inferior (à direita) dos furos obtidos através do processo de eletroerosão. Nesse processo utilizou-se como ferramenta o eletrodo proveniente do melhor conjunto de parâmetros da etapa anterior, o conjunto número 3.

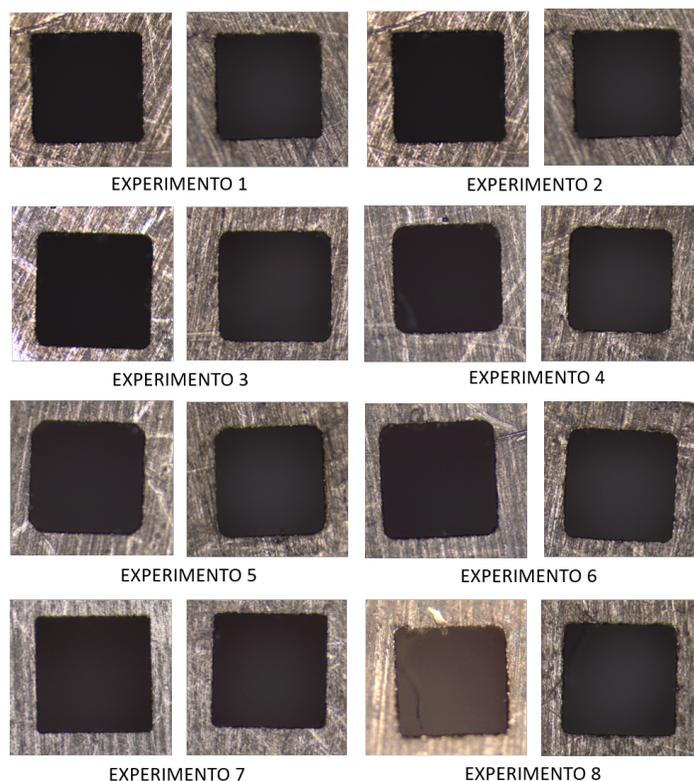


Figura 19: Furos usinados com parâmetros do Projeto de Experimentos

Os resultados medidos para os raios dos cantos na seção superior, o desgaste do eletrodo e o tempo de processo são apresentados na Tabela 7. Através da análise de variância, verificou-se que a tensão (U_s), o efeito combinado de $M_{descarga}$ com T_{off} , o efeito combinado de T_{on} e T_{off} e o efeito combinado de I_s com U_s têm influência significativa na magnitude dos raios dos cantos dos furos de seção quadrada. Como esperado, a condição que permitiu a execução dos furos em menor tempo foi a que resultou no maior desgaste do eletrodo. Através da análise dos raios verificou-se que o conjunto de parâmetros com melhor desempenho foi o número 7.

Tabela 7: Resultados do projeto de experimentos na usinagem dos eletrodos

Experimento	Tempo [min]	Desgaste [μm]	r_1 [μm]	r_2 [μm]	r_3 [μm]	r_4 [μm]
1	10	0,275	41,6031	33,2199	22,8141	34,2663
2	13	0,381	43,6581	41,5819	50,7383	25,7748
3	12	0,400	37,754	39,409	34,0536	30,2486
4	10	0,309	86,495	93,7744	71,1767	70,4225
5	22	0,302	52,183	70,1255	55,6002	75,1023
6	9	0,338	55,9378	67,2459	43,199	58,504
7	27	0,401	32,1871	36,4417	37,2366	34,5221
8	6	0,419	32,2575	35,2533	44,7378	39,2591

A Figura 20 apresenta as influências dos parâmetros de processo sobre o raio de quina dos furos de seção quadrada.

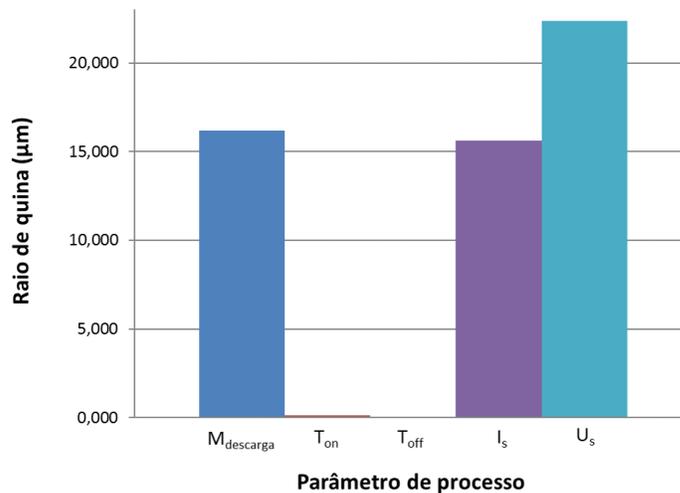


Figura 20: Comparação entre os efeitos dos parâmetros do processo avaliados sobre o raio de quina dos furos usinados

Nota-se através do gráfico apresentado na Figura 20 que, em oposição aos resultados obtidos na fabricação dos eletrodos, na usinagem dos furos de seção quadrada, T_{on} e T_{off} não apresentaram influência significativa. No processo de usinagem, a U_s afetou de forma mais intensa o raio de quina dos furos de seção quadrada.

A Figura 21 apresenta gráficos de dois fatores para o raio dos furos de seção quadrada. A Figura 21a ilustra a interação entre $M_{descarga}$ e T_{on} . Observa-se que, para um modo de descarga associado a uma menor capacitância, T_{on} mais baixo resulta em maiores raios, enquanto para um valor mais elevado de $M_{descarga}$, T_{on} mais elevado resulta em maiores raios de quina. A relação entre o modo de descarga e a corrente é apresentada na Figura 21b, onde a utilização de uma corrente maior, assim como um modo de descarga maior (maior capacitância) implica em maiores raios de quina dos furos.

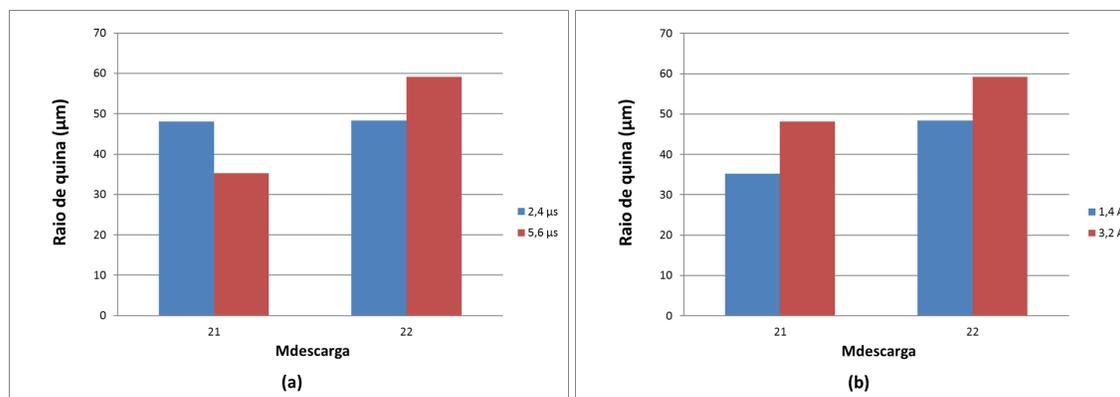


Figura 21: Efeito dos parâmetros avaliados sobre o raio de quina dos furos usinados: (a) interação T_{on} e $M_{descarga}$ e (b) interação I_s e $M_{descarga}$

5 Conclusão

Através da metodologia proposta foi possível a usinagem de furos de seção quadrada dentro das especificações desejadas, desvio angular inferior a $0,1^\circ$, bem como a definição de parâmetros de processo para sua utilização.

Com relação à análise dos parâmetros estudados ao longo desse trabalho verificou-se que o tempo de onda ligado foi o parâmetro que apresentou maior influência sobre o ângulo de quina dos eletrodos produzidos. No entanto, uma análise mais profunda é dificultada devido à confusão desse parâmetro, no projeto de experimentos reduzido, com a interação entre o modo de descarga e a corrente.

Na remoção de material durante o processo de fabricação dos eletrodos de seção quadrada, o tempo de onda ligado e o tempo de onda desligado apresentaram influência significativa. O uso de um T_{on} maior implica em menor remoção de material e um maior T_{off} implica em maior remoção de material. Esse comportamento não é esperado na eletroerosão e pode ser justificado devido ao fato de haver efeitos de interações confundidas com os efeitos dos parâmetros. Uma outra possível explicação seria que durante o tempo de onda ligado a descargas não foram efetivas na remoção de material, devido à possível permanência de material erodido na fenda de trabalho. Isso poderia ser melhorado com a aplicação de outras formas de limpeza como fluxos de fluido dielétrico para remover essas partículas.

Em oposição ao processo de fabricação dos eletrodos, os parâmetros de maior influência sobre os raios de quina dos furos produzidos foram a tensão, o modo de descarga e a corrente. Os tempos de onda desligado e ligado não demonstraram influência relevante. Adicionalmente comprovou-se nesse caso que um processo com duração menor, mais rápido, implica em um maior desgaste do eletrodo ferramenta.

6 Referências

- Amorim, F., 2002. Tecnologia de eletroerosão por penetração da liga de alumínio amp 8000 e da liga de cobre para ferramentas de moldagem de materiais plásticos. Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica.
- D.C., M., 1997. Design and analysis of experiments. Arizona State University 5.
- Fleischer, J.; Masuzawa, T. S. J. K. M., 2004. New applications for micro-edm. Journal of Materials Processing Technology 149.
- Jameson, E. C., 2001. Electrical discharge machining. Society of Manufacturing Engineers 1.
- Jha, B.; Ram, K. R. M., 2011. An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining. Journal of Engineering Science and Technology Review 4 2.
- K.H.Ho, S., 2003. State of the art electrical discharge machining (edm). International Journal of Machine Tools Manufacture 43.
- KÖNIG, W.; KLOCKE, F., 1997. Fertigungsverfahren - 3: abtragen und generieren. Berlin: Springer 3.
- Mahendran, S.; Devarajan, R. N. T. . M. A., 2010. A review of micro-edm. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2.
- Ribeiro, J.L.D.; Schwengber, C., 2011. Série monográfica qualidade projeto de experimentos. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção UFRGS.
- Singh, S., . B. A., 2011. Review to edm by using water and powder-mixed dielectric fluid. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering 10.
- Tomadi, S.H.; Hassan, M. H. Z. D. R. K. A., 2009. Analysis of the influence of edm parameters on surface quality, material removal rate and electrode wear of tungsten carbide. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2.