

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

LUCAS ALEXANDRE PASTORE

ESTUDO DOS PARÂMETROS NO PROCESSO DE FURAÇÃO DE METAL DURO COM  
O USO DE FURADEIRA EROSIVA

JARAGUÁ DO SUL, AGOSTO 2017

LUCAS ALEXANDRE PASTORE

ESTUDO DOS PARÂMETROS NO PROCESSO DE FURAÇÃO DE METAL DURO COM  
O USO DE FURADEIRA EROSIVA

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso Superior de  
Tecnologia em Fabricação  
Mecânica, do Câmpus Jaraguá do  
Sul – Rau, do Instituto Federal de  
Santa Catarina, para a obtenção do  
título de Tecnólogo em Fabricação  
Mecânica.

Orientador: Professor Delcio Luís  
Demarchi

JARAGUÁ DO SUL, AGOSTO 2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Pastore, Lucas Alexandre

**Estudos dos parâmetros no processo de furação de metal  
duro com o uso de furadeira erosiva / Lucas Alexandre Pastore  
; orientação de Delcio Luís Demarchi; coorientação  
de Miriam Hennig. - Jaraguá do Sul, SC, 2017.**

43 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal  
de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -  
Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .  
Inclui Referências.**

**1. Metal Duro. 2. Parâmetros. 3. Eletroerosão. I.  
Demarchi, Delcio Luís. II. Hennig, Miriam. III. Instituto  
Federal de Santa Catarina. . IV. Título.**

LUCAS ALEXANDRE PASTORE

ESTUDO DOS PARÂMETROS NO PROCESSO DE FURAÇÃO DE METAL DURO COM  
O USO DE FURADEIRA EROSIVA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 01 de agosto de 2016.

**Banca Examinadora:**

  
\_\_\_\_\_  
Miriam Hennig, Me.

  
\_\_\_\_\_  
Delcio Luis Demarchi, Me.

  
\_\_\_\_\_  
Fernando Henrique Gruber Colaço, Me.

  
\_\_\_\_\_  
Gabriel Costa Sousa, Me.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde.

Aos meus pais, pelo suporte e incentivo.

A minha noiva Danielle Hable, pela paciência e motivação.

Aos meus colegas do IFSC, pelos momentos de estudo e companheirismo.

Aos colegas de trabalho, que se mostraram prontos a colaborar com a realização dos testes práticos.

Ao professor Gabriel Costa Sousa, Me., pelo apoio e suporte como orientador no início do trabalho.

Ao professor orientador Delcio Luís Demarchi, Me., pelo aprendizado e companheirismo.

Ao professor Gerson Ulbricht, Dr., pelo aprendizado fornecido como professor e apoio como coorientador deste trabalho.

À professora Miriam Hennig, Me., pela dedicação e pelas orientações para a realização deste trabalho.

À empresa WEG Equipamentos Elétricos S/A, pelo suporte fornecido na realização dos testes práticos.

Ao IFSC – Câmpus Jaraguá do Sul – Geraldo Werninghaus.

Aos professores do IFSC, pelo conhecimento passado no decorer do curso.

Muito obrigado a todos!

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de aperfeiçoamento de parâmetros de usinagem em furação de metal duro pelo processo de eletroerosão. Tem como objetivo verificar se existe alteração no desempenho de furação da máquina River 600, caso seus parâmetros sejam alterados, regularizar esses novos parâmetros, reduzindo o tempo de furação e o custo de produção das matrizes. A pesquisa bibliográfica revelou que os parâmetros  $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$  e IP poderiam reduzir o tempo de furação. O operador, por sua vez, sugeriu que o parâmetro Feed fosse alterado. Nos experimentos práticos verificou-se que os parâmetros  $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$  e IP se comportam de forma diferenciada, conforme Santos (2010). Como esses parâmetros de furação já estavam regulados, próximos do ideal, não provocaram grandes efeitos na redução do tempo de furação. Já o parâmetro Feed, citado pelo operador da máquina, gerou um bom desempenho na redução do tempo, sendo cerca de 20% do tempo de 18 minutos por furação realizado anteriormente. A maior contribuição deste estudo foi confirmar a forma como os parâmetros  $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$  e IP reagem a alterações, uma vez que foi encontrado um novo parâmetro de considerável relevância no processo de furação de metal duro. Para futuros trabalhos sugere-se um estudo mais aprofundado sobre o parâmetro Feed, de modo a melhor entendê-lo e, portanto, aprimorar os resultados.

Palavras-chave: Metal Duro. Parâmetros. Eletroerosão.

## ABSTRACT

This paper is a study of improvement in machining parameters in hardmetal drilling by the process of electroerosion. It aims to verify if there is a change in drilling performance of the River 600 machine. If the parameters were changed, it is necessary to regularize them, reducing the drilling time and the cost of the matrices production. The literature review showed that the  $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$  and IP parameters could reduce the drilling time. The operator, in turn, suggested that the Feed parameter be changed. The practical experiments allowed to verify that the parameters  $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$  and IP behave differently, according to Santos (2010). As these drilling parameters were already regulated, close to ideal, they did not cause relevant effects in reducing drilling time. The Feed parameter indicated by the machine operator generated good performance in time reduction representing about 20% of the drilling time previously performed. The best contribution of this study was to confirm how the  $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$  and IP parameters react to changes, since a new parameter of considerable relevance was found in hardmetal drilling process. For the next papers we suggest a more in-depth study of the Feed parameter, in order to better understand it, therefore improve the results.

Keywords: Hardmetal. Parameters. Eletroerosão. Electroerosion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais componentes de uma eletroerosão à penetração .....	16
Figura 2 – Sistema de gerador de pulsos máquina EDM. ....	17
Figura 3 – Representação do <i>gap</i> item 7. ....	19
Figura 4 – Microfuros EDM.....	19
Figura 5 – Corpo de prova.....	26
Figura 6 – Furadeira erosiva River 600.....	27
Figura 7 – Seleção e alinhamento da Placa .....	28
Figura 8 – Fixação de mandril e guia .....	29
Figura 9 – Gráfico de dados obtidos nos experimentos com variação do $T_{ON}$ .....	34
Figura 10 – Gráfico de dados obtidos nos experimentos com variação do $T_{OFF}$ .....	35
Figura 11 – Gráfico de dados obtidos nos experimentos com variação do Feed .....	37
Figura 12 – Gráfico de dados obtidos nos experimentos com variação do $T_{ON}$ .....	38
Figura 13 – Gráfico de dados obtidos nos experimentos com variação do $T_{OFF}$ .....	39
Figura 14 – Gráfico de dados obtidos nos experimentos com variação do IP.....	40



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos compósitos de metal duro.....	24
Tabela 2 – Propriedades de alguns metais duros .....	24
Tabela 3 – Parâmetros fixos .....	30
Tabela 4 – Experimento em função de $T_{ON}$ .....	30
Tabela 5 – 2° experimento em função de $T_{OFF}$ .....	31
Tabela 6 – 3° experimento variação em função de Feed.....	31
Tabela 7 – Experimento variação em função de IP .....	32
Tabela 8 – Dados obtidos nos experimentos com variação do $T_{ON}$ .....	33
Tabela 9 – Dados obtidos nos experimentos com variação do $T_{OFF}$ .....	35
Tabela 10 – Dados obtidos nos experimentos com variação do Feed.....	36
Tabela 11 – Dados obtidos nos experimentos com variação do $T_{ON}$ .....	37
Tabela 12 – Dados obtidos nos experimentos com variação do $T_{OFF}$ .....	38
Tabela 13 – Dados obtidos nos experimentos com variação do IP .....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Bar	Unidade de pressão
CFC	Cúbica de Face Centrada
CNC	Comando Numérico Computadorizado
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>
elet-ferr	Eletrodo ferramenta
elet-peça	Eletrodo peça
Fe	Ferro
Feed	Condição da alimentação de cargas elétricas
HV	Dureza Vickers
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IP	Corrente
Gap	Folga
g/cm <sup>3</sup>	Grama por centímetro cubico
mm	Milímetro
Nb	Nióbio
NbC	Carbeto de nióbio
M8	Rosca 8 milímetros
PH	Potencial Hidrogênio
Sfeed	Velocidade de rotação
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TiC	Carbeto de Titânio
TaC	Carbeto de tântalo
T <sub>OFF</sub>	Tempo de pausa
T <sub>ON</sub>	Tempo de pulso
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
WC	Carbeto de tungstênio
°C	Grau Celsius
µm	Micrômetro

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Problema de pesquisa.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>14</b>
1.3.1	Objetivo geral .....	14
1.3.2	Objetivos específicos.....	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Processo de eletroerosão por penetração.....</b>	<b>15</b>
2.1.1	Conjunto elétrico .....	16
2.1.2	Conjunto mecânico.....	17
2.1.3	Conjunto dielétrico .....	17
2.1.4	Sistema de alimentação da máquina.....	17
2.1.5	Remoção de material .....	18
2.1.6	Particularidades da eletroerosão .....	19
2.1.7	Parâmetros de usinagem.....	20
2.1.7.1	Polaridade.....	21
2.1.7.2	IP .....	21
2.1.7.3	T <sub>ON</sub> .....	21
2.1.7.4	T <sub>OFF</sub> .....	21
2.1.7.5	Desgaste do eletrodo e taxa de remoção de material .....	22
<b>2.2</b>	<b>Cobre .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3</b>	<b>Metal duro.....</b>	<b>22</b>
2.3.1	Propriedades dos componentes .....	23
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Corpo de prova .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>River 600 .....</b>	<b>27</b>
3.2.1	Resina Deionizadora e filtros do fluido.....	28
<b>3.3</b>	<b>Método de preparação .....</b>	<b>28</b>
<b>3.4</b>	<b>Experimentos práticos .....</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1</b>	<b>Análises de teste práticos .....</b>	<b>33</b>

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>41</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o mercado cada vez mais competitivo globalmente, as empresas sempre estão em busca de melhoria dos processos, com o objetivo de reduzir tempo e custo de produção sem perder a qualidade do produto acabado.

Nas últimas três décadas, na indústria brasileira, houve um crescimento na utilização de metal duro para a produção de punções e matrizes de estampo de alta produtividade devido a sua alta resistência ao desgaste, proporcionando um melhor desempenho. A propriedade de alta resistência ao desgaste do metal duro é um ponto positivo na vida útil de uma matriz, mas dificulta sua usinagem.

Em uma empresa metalúrgica de Jaraguá do Sul, o processo de fabricação de matrizes em metal duro enfrenta uma dificuldade no processo de furação. Nessa empresa as furações em metal duro até 2014 eram feitas com a furadeira erosiva Astec, sendo que cada furação levava em torno de 12 minutos para ser realizada em uma placa de 25 mm de espessura. Com a expansão da empresa essa máquina foi remanejada para um novo setor, sendo substituída por uma nova máquina, da marca Ocean sendo seu modelo River 600.

Essa furadeira, no entanto, não atendeu às expectativas de furação em metal duro. Inicialmente cada furação estava levando em torno de 25 minutos, mas com alguns ajustes nos parâmetros de usinagem conseguiu-se uma redução nesse tempo para 18 minutos. Todavia, se comparada ao tempo da Astec, a máquina nova ainda estaria trabalhando como o tempo 50% acima do que era realizado até 2014.

Segundo Neves e Souza (2013), obter, no processo de eletroerosão, redução de desgaste de eletrodo e tempo não é uma tarefa muito fácil, requer do operador de eletroerosão conhecimento do comportamento de cada parâmetro. Assim, faz-se necessário um estudo sobre esses parâmetros de eletroerosão em busca de um melhor entendimento do seu funcionamento.

Com os parâmetros  $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$  e IP em mãos deve-se ir a campo a fim de aplicá-los por meio de experimentos, de modo a verificar se o que foi pesquisado se confirma na prática. Em seguida, procura-se realizar uma junção dos parâmetros pesquisados ao parâmetro Feed sugerido pelo operador, que pode vir a surtir efeito no desempenho de furação em metal duro.

A revisão bibliográfica deste Trabalho apresentará uma breve introdução de como surgiu o processo de eletroerosão. Também serão relatados os componentes básicos de uma máquina de eletroerosão por penetração, quais as áreas de emprego do processo na atualidade, as definições básicas de como o processo de usinagem ocorre, estudos sobre parâmetros de usinagem e quais deles têm maior influência em furações de metal duro, bem como a forma

com que cada alteração desses parâmetros se comporta.

No capítulo MATERIAIS E MÉTODOS será apresentado o corpo de prova a ser utilizado, as características básicas da máquina usada nos experimentos práticos, os métodos de preparação da peça e quais parâmetros de usinagem serão constantes no processo. Abordar-se-á também a faixa de variação dos parâmetros  $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$ , Feed e IP, dos quais serão efetuados as análises de desempenho de furação e o comportamento de cada parâmetro alterado.

Os parâmetros de saída coletados serão o tempo de usinagem e o desgaste do eletrodo. Após os experimentos os dados serão analisados, para identificar a influência dos parâmetros de entrada nos parâmetros de saída.

Finalizados os experimentos e realizadas as análises de resultados obtidos, todos esses dados serão registrados e arquivados junto aos materiais de apoio da máquina, de forma que possam servir de base para estudos futuros no desenvolvimento de parâmetros de furação em metal duro.

## **1.1 Problema de pesquisa**

No setor de ferramentaria de uma empresa metalúrgica de Jaraguá do Sul efetuou-se a compra de uma nova furadeira erosiva River 600, já que a existente foi transferida para outra sede da empresa. Porém, a nova máquina apresenta um tempo muito elevado (aproximadamente 18 minutos) para realizar as furações em placas de metal duro usadas para matrizes de estampos, sendo 50% maior que o da antiga máquina Astec.

Devido a uma insatisfação de desempenho em furação de metal duro, percebeu-se a necessidade de estudar novos parâmetros de usinagem, já que com a antiga máquina realizava-se a mesma furação em 12 minutos.

A partir dessa situação surgiu a questão de pesquisa: de que maneira os parâmetros de furação em metal duro podem ser selecionados na nova furadeira erosiva, em busca de uma redução de tempo no processo?

## **1.2 Justificativa**

Nos últimos 20 anos, a cobrança em melhoria de método de usinagem está cada vez maior, e não poderia ser diferente no método de furação de metal duro por eletroerosão. Há uma constante busca para fazer mais com menos, uma vez que o tempo é um fator muito importante nesse processo.

Na antiga furadeira erosiva Astec, a furação em placas de metal duro de 25mm de espessura levava em torno de 12 minutos. Na nova máquina River 600, inicialmente, levava-se 25 minutos por furo. Alguns parâmetros já foram alterados por operadores da fábrica, e cada furação está sendo realizada em 18 minutos.

No entanto, é possível observar que em relação à máquina anterior ainda existe uma margem de tempo a ser trabalhada para a melhoria dos parâmetros de furação.

Para tal, justifica-se a seleção de novos parâmetros de usinagem com melhor desempenho, registrando-os em um arquivo físico, caso os parâmetros salvos venham a se perder por alguma pane.

### **1.3 Objetivos**

#### 1.3.1 Objetivo geral

Estabelecer novos parâmetros de usinagem para a máquina River 600 que tenham um tempo de furação condizente com o realizado pela furadeira Astec.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Efetuar estudos para identificar parâmetros de maior influência na furação de metal duro por eletroerosão;
- Definir os valores dos parâmetros;
- Definir os melhores parâmetros utilizados na River 600.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para atingir os objetivos deste trabalho, fez-se necessário um estudo em livros, TCCs, dissertações, artigos, manuais e outros, de forma a identificar qual a melhor maneira de proceder na alteração de cada parâmetro, verificando a sua influência no processo. Dentre os temas estudados destacam-se o processo de eletroerosão por penetração, princípio do processo de remoção de cavacos, parâmetros de entrada (polaridade, IP, T<sub>ON</sub>, T<sub>OFF</sub>), desgaste do eletrodo, taxa de remoção de material, material do eletrodo e material a ser usinado.

Para Ferraresi (2003), o processo de usinagem pode ser definido pela alteração que uma peça sofre em seu acabamento, formato e dimensão, ou até mesmo a alteração dos três itens simultaneamente, quanto há uma geração de cavaco. Isso pode ser definido como qualquer porção a ser retirada da peça pela ferramenta no processo de usinagem sem que o cavaco apresente uma geometria regular.

### 2.1 Processo de eletroerosão por penetração

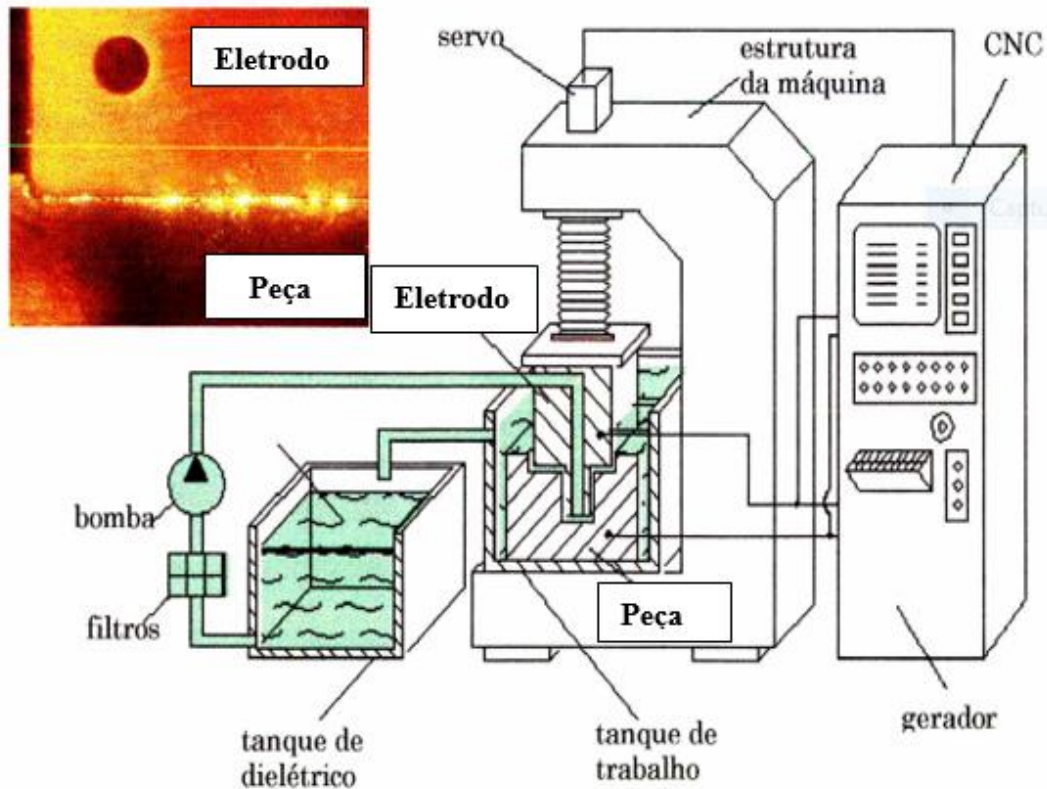
O processo de eletroerosão é um método de usinagem em que a remoção de material é realizada por um eletrodo através de descargas elétricas. Foi observado pela primeira vez em 1750 pelo cientista inglês Joseph Priestley, quando o método de eletroerosão foi aplicado em um laboratório. Todavia, esse método somente foi implantado em escala industrial na Segunda Guerra Mundial, devido aos experimentos de dois cientistas soviéticos, N.I. Lazarenko e B.R. Lazarenko (MEDEIROS, 1981).

O processo de eletroerosão é amplamente empregado na usinagem de peças de elevada dureza e de geometrias complexas, podendo ser aplicado na fabricação de matrizes e moldes, no setor automotivo, médico, de ferramentas, prototipagem e outros (SIMÃO et al., 2003).

Na Figura 1 pode-se observar os componentes básicos da máquina (AMORIM, 2002).



Figura 1 – Principais componentes de uma eletroerosão à penetração



Fonte: Adaptado de Amorim (2002, p. 25).

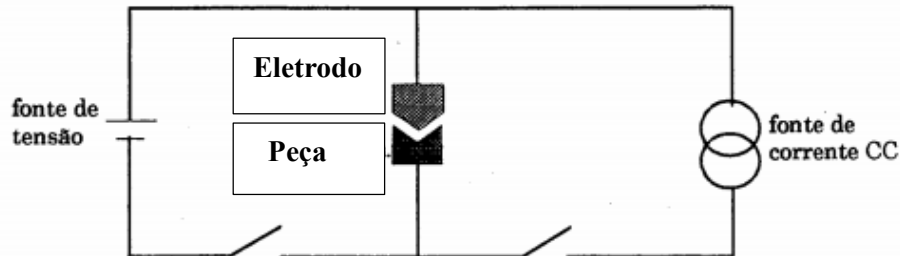
Como pode-se observar na Figura 1, uma máquina de eletroerosão à penetração é formada por gerador o painel CNC (Comandos Numéricos Computadorizados), onde são processadas as informações e comandos realizados pelo operador. A estrutura da máquina é constituída por uma base rígida que serve de estrutura para o servo que tem como função de fazer o controle de avanço e recuo do eletrodo, e serve de base para sustentar o tanque de trabalho onde são fixadas as peças. E a unidade hidráulica que é composta de um tanque dielétrico, filtros e bomba.

### 2.1.1 Conjunto elétrico

O conjunto elétrico é formado pelos seguintes componentes: gerador de pulsos, controlador de avanço e posicionamento relativo entre a peça e o eletrodo e cabos responsáveis pela alimentação elétrica da máquina. O gerador de pulsos, de maneira simplificada, pode ser dividido em três partes (AMORIM, 2002): fonte de tensão, sistema capacitor composto pelo eletrodo e a peça, fonte de corrente contínua.

Uma melhor compreensão de um gerador de pulsos pode ser alcançada verificando a Figura 2, onde são dispostos seus componentes básicos.

Figura 2 – Sistema de gerador de pulsos máquina EDM.



Fonte: Adaptado de Amorim (2002, p.26).

### 2.1.2 Conjunto mecânico

O conjunto mecânico tem como função a movimentação entre o eletrodo-ferramenta e a peça. Nas primeiras máquinas fabricadas o movimento dos eixos x, y é realizado manualmente pelo deslocamento da mesa de trabalho. Já nas máquinas atuais que possuem quatro eixos de movimentação, o cabeçote no qual é alojado o eletrodo fica responsável pelo movimento dos eixos x, y, z, c. O conjunto mecânico, além da mesa, também é composto por um servomecanismo que é responsável pelo avanço do eletrodo-ferramenta sobre a peça e o controle do ajuste da distância de trabalho entre ambos. Por fim, há também a estrutura da máquina rígida, de maneira a suportar peças de grande porte sem interferir na qualidade de usinagem (AMORIM, 2002).

### 2.1.3 Conjunto dielétrico

O conjunto dielétrico é composto por um tanque de armazenamento, cuba da área de trabalho, filtros e uma moto-bomba. Esse conjunto fica responsável pela limpeza e alimentação do fluido na área de trabalho (AMORIM, 2002).

### 2.1.4 Sistema de alimentação da máquina

Segundo Silvestre, Silva e Manzan (2013), a energia elétrica na rede chega em corrente alternada e, quando passa pela fonte de alimentação da máquina, é transformada em corrente

contínua, a fim de realizar as descargas elétricas pulsantes e controladas para produzir centelhas com a finalidade de remover as partículas do material a ser usinado.

### 2.1.5 Remoção de material

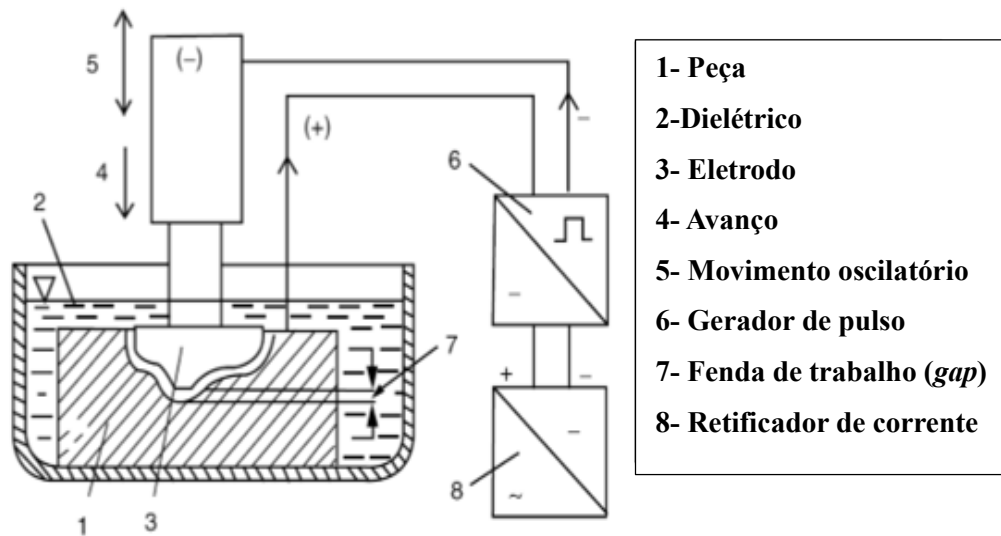
Segundo Lima (2008), nos processos convencionais de usinagem a remoção de material ocorre devido ao contato de uma parte cortante da ferramenta com a peça. Isso se dá porque a ferramenta tem uma dureza superior à peça a ser confeccionada. Já no processo de eletroerosão o eletrodo não precisa ser necessariamente mais duro que a peça a ser usinada, já que a ferramenta não entra em contato com a peça.

A descarga elétrica de alta frequência é responsável pela remoção das partículas de material. No processo de eletroerosão a ferramenta e a peça são submersas e separadas por um fluido dielétrico, sendo que a ferramenta é aproximada até que ocorra o rompimento da propriedade isolante do fluido. Então ocorre a descarga elétrica, assim removendo as partículas de material da peça.

A distância em que eletrodo fica da peça quando ocorre o rompimento do fluido dielétrico é nomeada de *gap* (do inglês *gap* - folga), gira em torno de 0,01 a 0,5 mm e pode ser observada no item 7 da Figura 3. Além de servir como material isolante, o fluido tem mais finalidades, como refrigerar a peça. A temperatura no local onde ocorre a descarga elétrica pode variar entre 8000 e 12000°C, sendo o fluido também responsável por retirar os resíduos gerados durante a usinagem.

De acordo com Jahan, Wong e Rahman (2012), atualmente, o processo de eletroerosão pode ser considerado um método versátil de usinagem dos materiais de alta dureza, como de aços temperados e metal duro. Na realização de microfuração em metal duro o eletrodo tem formato cilíndrico e, durante a usinagem, atua com uma rotação em torno dele mesmo. Os resultados obtidos em testes indicam que a máquina deve utilizar polaridade positiva no eletrodo. Sendo ele de cobre, deve-se aumentar a velocidade de rotação do eletrodo com a finalidade de minimizar a expansão do furo a ser realizado.

O processo de eletroerosão consiste basicamente de um eletrodo que se aproxima da peça com a polaridade inversa, sendo separados por um fluido dielétrico. Quando o eletrodo se aproxima a ponto de romper a camada isolante do fluido a descarga elétrica atua sobre a peça removendo material e dando a forma na peça de acordo com o seu formato. Normalmente essas descargas elétricas são de corrente contínua (SIMAO et al., 2003).

Figura 3 – Representação do *gap* item 7.

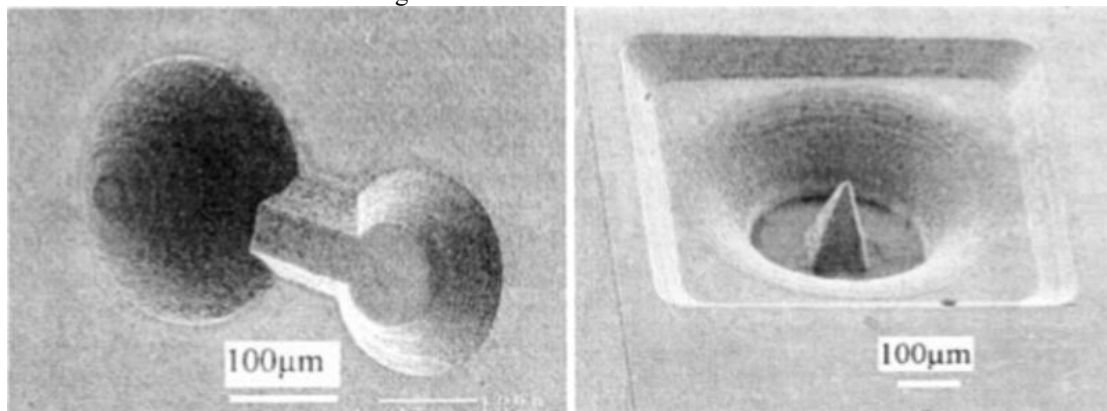
Fonte: Adaptado de Santos (2010, p. 25).

### 2.1.6 Particularidades da eletroerosão

Conforme Méroz e Cuendet (2004), a usinagem pelo processo de eletroerosão possibilita a execução de furos desde 0,02 mm em materiais de elevada dureza, como de metal duro e de aços temperados.

Já segundo Santos (2010) o processo de eletroerosão pode chegar a gerar microfuros na faixa de 0,1mm, que pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Microfuros eletroerosão



Fonte: Santos (2010, p. 23)

De acordo com Méroz e Cuendet (2004), o eletrodo e o material da peça devem ser condutores elétricos e os materiais mais indicados para eletrodos são latão, alumínio, cobre, cobre eletrolítico e cobre volfrâmico. A usinagem ocorre sem esforço mecânico devido ao

eletrodo não entrar em contato com a peça. Por isso, o eletrodo é fabricado com uma dimensão diferente da peça acabada, e a remoção do material é realizada por meio de várias descargas elétricas.

A aplicação do método da eletroerosão por penetração tem como principal finalidade a usinagem de cavidades que muitas vezes não são passantes. Ainda, consiste na fabricação de um eletrodo no formato negativo da peça, que a partir de descargas elétricas vai penetrando o material, dando a forma desejada (SANTOS, 2010).

Para Jahan, Wong e Rahman (2012), o processo de eletroerosão baseia-se na remoção de partículas de materiais eletricamente condutores por intermédio de uma série de descargas elétricas de alta frequência: o eletrodo carregado com potência elétrica e polaridade inversa da peça se aproxima até que ocorra o rompimento da propriedade isolante do fluido, gerando descargas elétricas, e por fim, removendo o material da peça a ser usinada e do eletrodo.

#### 2.1.7 Parâmetros de usinagem

Para Neves e Souza (2013), o estudo e a melhoria de parâmetros de usinagem no processo de eletroerosão podem reduzir o consumo de insumos ao mesmo tempo que reduzem o tempo de usinagem, diminuindo conseqüentemente o custo de produção de uma determinada peça.

Conseguir associar a diminuição do tempo à redução de desgaste do eletrodo não é uma prática muito fácil. Para isso, é necessário obter-se uma noção dos parâmetros que influenciam no desempenho da usinagem.

No processo de eletroerosão, a dureza não tem tanta influência como a condutividade elétrica do material, que está ligada diretamente ao processo. Outros fatores importantes são o ponto de fusão e a condutividade térmica do material, já que no ponto onde está sendo realizada a retirada de material há um aquecimento muito alto em razão da intensidade de descargas elétricas.

Pode-se citar como exemplos de parâmetros de entradas o material do eletrodo, o material da peça, IP,  $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$ , condições do fluido, frequência, área usinada, profundidade usinada e condições de lavagem. Nos processos de usinagem rápida existe uma exigência de melhoria contínua para manter-se competitivo no mercado (SANTOS, 2010).

Para uma melhor compressão dos parâmetros de entrada, será realizada uma breve descrição dos parâmetros que serão estudados nos experimentos práticos que são eles: polaridade, IP,  $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$ .

#### 2.1.7.1 Polaridade

O processo de eletroerosão pode ser efetuado em corrente alternada, mas não é muito utilizado por ter um baixo desempenho. Na usinagem, por meio de eletroerosão por penetração, normalmente utiliza-se polaridade positiva no eletrodo e negativa na peça a ser usinada, a fim de diminuir o desgaste do eletrodo-ferramenta, mas com a desvantagem da diminuição da remoção de material (SANTOS, 2010).

Já nos processos de eletroerosão de furo rápido, a polaridade do eletrodo é negativa e a peça positiva, tendo como vantagem uma alta taxa de remoção de material, mas como desvantagem um alto desgaste do eletrodo-ferramenta. Na usinagem de titânio e carbonetos, o único processo em que se obteve sucesso foi com a polaridade negativa no eletrodo e a positiva na peça (SANTOS, 2010).

#### 2.1.7.2 IP

O IP utilizado influencia diretamente no acabamento da superfície usinada. Quanto maior for o IP aplicado, maior será a taxa de remoção de material, mas conseqüentemente haverá um acabamento pior. O IP a ser utilizado tem suas limitações de acordo com a área a ser usinada e o material do eletrodo (SANTOS, 2010).

#### 2.1.7.3 $T_{ON}$

O  $T_{ON}$  é o tempo que dura um pulso de descarga elétrica efetiva. Assim como o IP, quanto maior o  $T_{ON}$ , maior é a taxa de remoção de material, e pior o acabamento superficial. Esse valor de  $T_{ON}$  é inserido diretamente no painel da máquina que é comum o tempo de cada pulso ser programado entre alguns microsegundo (SANTOS, 2010).

#### 2.1.7.4 $T_{OFF}$

O  $T_{OFF}$  é o tempo em que não há descarga elétrica. Esse tempo se faz necessário para que a área onde ocorreu a descarga elétrica se estabilize antes de um novo pulso. O  $T_{OFF}$  não tem influência direta no desgaste do eletrodo, mas tem influência no tempo de usinagem: quanto maior o tempo sem descarga, mais lento o processo fica (SANTOS, 2010).

### 2.1.7.5 Desgaste do eletrodo e taxa de remoção de material

O desgaste do eletrodo é um fator muito importante, principalmente em usinagem com alta precisão de ajuste. O desgaste do eletrodo deve ser acompanhado para se atingir o dimensionamento desejado na peça. Quanto menor o desgaste do eletrodo, melhor para o operador ajustar o dimensional.

No processo de eletroerosão de furo rápido em que o desgaste do eletrodo não é tão relevante, o principal objetivo é obter uma alta taxa de remoção de material, o que pode ocasionar um maior desgaste do eletrodo, mas com intuito de realizar uma furação em menor tempo (SANTOS, 2010).

A taxa de remoção de material pode ser definida como quantidade de material removida em um determinado tempo (SANTOS, 2010).

O controle de parâmetros de eletroerosão envolve fatores elétricos e não elétricos, atribuindo uma diversidade e dificuldade de serem estabelecidos. A busca de novos parâmetros ocorre de maneira experimental.

## 2.2 Cobre

O cobre tem um emprego considerável no comércio na sua forma pura, sem adição de outro metal liga. Tem boa condutividade elétrica, é resistente à corrosão e tem uma massa específica razoável ( $8,94 \text{ g/cm}^3$ ), propícia para aplicações em fios para eletrônica (NEWELL, 2010). Devido a sua boa condutividade elétrica o cobre tem um forte emprego como material do eletrodo de eletroerosão.

Segundo Shackelford (2010), o cobre também tem ótima condutividade térmica e uma boa resistência à corrosão. Sua estrutura CFC colabora com o processo de conformação.

Segundo Remy, Gay e Gonthier (2002), o cobre tem como ponto de fusão  $1083^\circ\text{C}$  e um coeficiente de dilatação de  $16,5 \times 10^{-6}$  por  $^\circ\text{C}$ .

## 2.3 Metal duro

No ano de 1923, na empresa OSRAM, foram produzidas as primeiras peças de carbeto metálicos. Os compostos carbeto de tungstênio (WC) e cobalto (Co) foram prensados e

sinterizados a temperaturas abaixo do ponto eutético, ocasionando a união dos compósitos, assim formando uma única peça. Os experimentos realizados por Karl Schroeter são considerados referência para os processos de formação de carbetos metálicos (FRANCISCO, 2006).

Inicialmente, a produção de carbetos metálicos foi destinada principalmente à produção de fio de tungstênio para utilização em filamentos de lâmpadas incandescentes. Mas, com o passar do tempo, foram aperfeiçoados, e a eles foram adicionados novos carbetos além do WC, como por exemplo, TiC, TaC, NbC e outros. Também foram adicionados outros materiais de ligas além do Co, como o Ni, Cr, Fe, Fe-Ni, e esses metais começaram a ter emprego em outras áreas, como na usinagem e corte de madeira, vidro e até outros metais (FRANCISCO, 2006).

Segundo Torres (2009), o metal duro, devido à sua composição, é um material de grande relevância, por conseguir aliar boa resistência ao desgaste, ter boa tenacidade e alta dureza.

De acordo com Ferraresi (2003), Diniz (2013) e Francisco (2006), o metal duro é constituído de dois tipos de lementos. O primeiro é o elemento que lhe proporciona elevada resistência ao desgaste e trabalho em temperaturas elevadas, sendo ele o carboneto de tungstênio e pode-se ser combinado a outros carbonetos como titânio, tântalo e nióbio, o carboneto de tungstênio e suas combinações são dispostos em forma de pequenas partículas.

Já o segundo trata-se de um elemento que lhe proporciona uma boa tenacidade, que serve como aglomerante. Comumente é utilizado o cobalto como ligante das partículas dos carbonetos.

### 2.3.1 Propriedades dos componentes

Segundo Torres (2009), como todos os materiais criados pelo homem, as propriedades obtidas dependem diretamente dos materiais de base utilizados na sua composição. Para compreender melhor as propriedades do metal duro serão apresentadas algumas propriedades de seus componentes

Os carbetos têm como pontos fortes elevada dureza e alto ponto de fusão, e os ligantes têm função de fornecer uma maior tenacidade ao metal duro, já que os carbetos são muito frágeis.

Na Tabela 1 pode-se verificar, por exemplo, que o Co e o Ni têm uma dureza e ponto de fusão inferior aos demais elementos. Eles têm função de ligantes na composição do metal duro.



Tabela 1 – Propriedades dos compósitos de metal duro

Material	Dureza (HV)	Estrutura Cristalina	Temperatura	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de Young (GPa)	Coeficiente de Expansão Térmica (μm/m·K)
			de Fusão (°C)			
WC	2200	HC	2800	15,63	696	5,2
TiC	3000	CFC	3100	4,94	451	7,7
VC	2900	CFC	2700	5,71	422	7,2
HfC	2600	CFC	3900	12,76	352	6,6
ZrC	2700	CFC	3400	6,56	348	6,7
NbC	2000	CFC	3600	7,80	338	6,7
TaC	1800	CFC	3800	14,5	285	6,3
Co	<100	CFC/HC	1495	8,9	207	16,0
Ni	<100	CFC	1455	8,5	207	15,0

Fonte: Torres (2009, p. 5).

Uma das formações mais clássicas de metal duro é a de WC-Co, quando o WC tem como função fornecer elevada resistência ao desgaste e dureza e o Co entra como material de liga com a função de melhorar a tenacidade (TORRES, 2009).

Atualmente já existe uma variedade maior de metais duros, com outras combinações além do WC e Co. Na Tabela 2 pode-se observar um ganho na tenacidade, fratura, e resistência à compressão, mas como desvantagem a diminuição da dureza do material.

Tabela 2 – Propriedades de alguns metais duros

Composição	Dureza (HV)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Ruptura Transversal (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Tenacidade à Fratura (MPa·m <sup>1/2</sup> )	Coeficiente de Expansão Térmica (W/m·K)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
WC-3Co	1900	7100	1600	673	8,5	5,0	15,25
WC-10Co	1625	6000	2280	580	10,8	5,5	14,50
WC-20Co	1050	3100	2850	490	14,5	6,4	13,55
WC-10Co-22(Ti, Ta, Nb, Mo)C	1500	5900	2000	510	9,0	6,1	11,40

Fonte: Torres (2009, p. 4).

A fundamentação teórica foi realizada com intuito de compreender melhor o processo de eletroerosão, buscar novas informações de quais parâmetros poderiam surtir melhor efeito na redução do tempo de furação em metal duro e como se comportam quando alterados.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

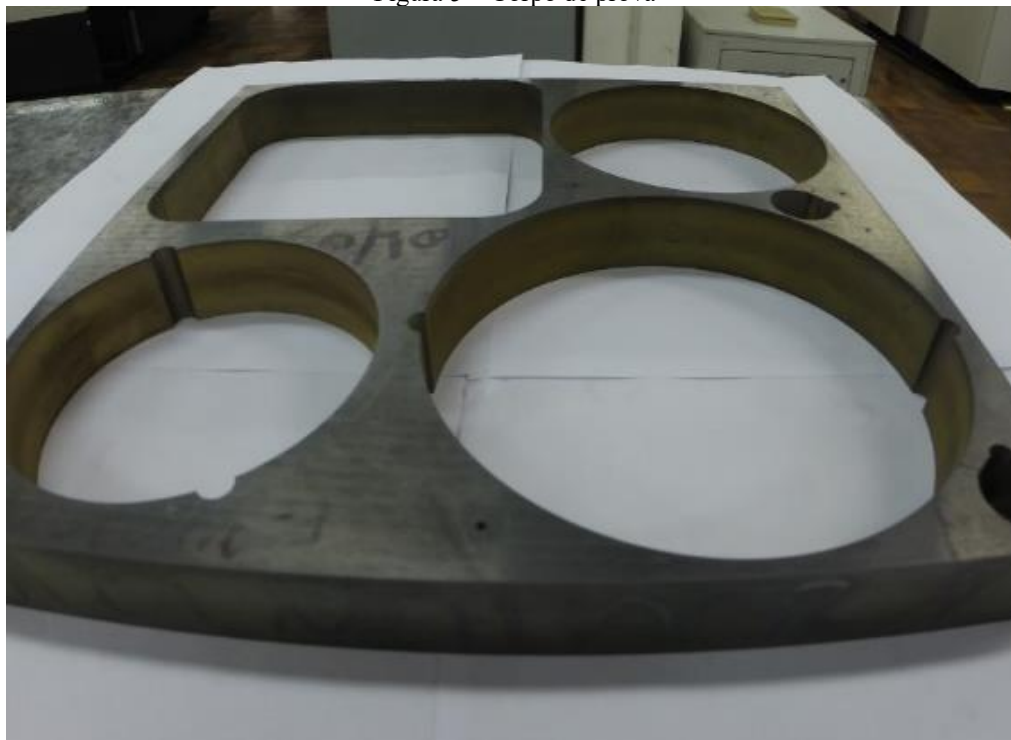
Neste capítulo serão feitas as descrições do corpo de prova, da máquina River 600, das ferramentas e do método utilizado para realizar os experimentos práticos.

#### 3.1 Corpo de prova

Como corpo de prova serão utilizados retalhos de placas de metal duro com espessura de 25 mm, mantendo-se o padrão de teste realizado na máquina Astec. Assim, será possível obter um parâmetro de comparação confiável, avaliar o desgaste do eletrodo e verificar se o tempo de usinagem se aproxima de 12 minutos.

Esse retalho de placa de metal duro tem como característica uma dureza de 1253 HV e densidade de 14,05 g/cm<sup>3</sup>. Sua estrutura é composta por WC-15Co (LABORATÓRIO WEG, 2016).

Figura 5 – Corpo de prova



Fonte: o autor (2016)

### 3.2 River 600

A furadeira erosiva River 600 tem como suas principais características as seguintes definições: quatro eixos de movimentação (x, y, z e w) com um recurso de três velocidades de movimentos dos eixos. As trocas do guia e do eletrodo podem ser efetuadas manualmente ou automaticamente.

As funções de zeramento de peças contêm quatro opções: entre faces, centro dois pontos, centro círculo e de canto. A máquina também pode ser configurada com duas unidades de medidas: polegadas ou milímetros.

No que tange a programação, a River 600 comporta programas com até 10.000 linhas que podem ser transferidas através de uma entrada USB.

Na questão polaridade, a máquina vem configurada de fábrica com polaridade positiva.

Figura 6 – Furadeira erosiva River 600



Fonte: o autor (2016)

### 3.2.1 Resina Deionizadora e filtros do fluido

Como fluido para máquina River 600 é recomendada a utilização de água deionizada, a qual deve passar por um cilindro que contém resina deionizadora. Esse processo se faz necessário para regular o PH da água. Caso ele esteja muito ácido, a furação não terá um bom desempenho. O fluido que perpassa pelo interior dos canais do eletrodo-ferramenta deve passar por um processo de filtração, de modo que não ocorra um entupimento dos canais de lavagem do eletrodo e seja possível eliminar impurezas que poderiam prejudicar a usinagem.

### 3.3 Método de preparação

A placa é apoiada sobre os calços. Seu alinhamento é realizado com o auxílio de um relógio apalpador Mitutoyo com graduação 0,01 mm.

Figura 7 – Seleção e alinhamento da Placa



Fonte: o autor (2016)

Após o alinhamento, a peça é fixada com presilhas e parafusos M8. Como eletrodo-ferramenta optou-se por utilizar o mesmo eletrodo da máquina Astec, para que se possa fazer uma análise comparativa de tempo e desgaste com a nova furadeira erosiva River 600 e também por gerar uma furação com diâmetro que se adequasse ao maior volume de matrizes produzidas no setor de ferramentaria da empresa do ramo metal mecânica de Jaraguá do Sul.

O eletrodo-ferramenta utilizado para os testes foi o de cobre. Suas dimensões são 300 mm de comprimento e diâmetro de 1,2 mm, provido de multicanais para passagem de fluido

dieletrico. A medição do diâmetro foi realizada por meio de um paquímetro digital, marca Mitutoyo, capacidade de medição 0 – 150 mm com resolução de 0,01 mm.

O eletrodo é fixado em um mandril. Insere-se uma bucha de borracha na extremidade superior do eletrodo para que o fluido não vaze entre eletrodo e mandril. O mandril pode ser inserido tanto no magazine da máquina o diretamente no cabeçote da mesma.

Para que a furação fique perpendicular à face da peça e garanta o posicionamento de coordenadas, faz-se necessário o uso de uma guia com diâmetro aproximado do eletrodo, que também pode ser inserida no magazine da máquina ou diretamente no cabeçote.

Figura 8 – Fixação de mandril e guia



Fonte: o autor (2016)

No painel da máquina a rotação do eletrodo é representada pelo parâmetro SFeed. Nos experimentos realizados foi selecionado o nível 15, que é o nível máximo de rotação da máquina. Com o auxílio de um tacômetro foi identificado que o nível 15 representa uma velocidade de 1560 rpm.

### 3.4 Experimentos práticos

De acordo com as pesquisas realizadas na fundamentação teórica, optou-se pela variação de três parâmetros de usinagem:  $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$  e IP e, como sugestão do operador da máquina, o parâmetro Feed. Os experimentos práticos foram realizados para verificar quais parâmetros melhor combinam em relação ao desgaste de eletrodo e tempo de usinagem.

Para realização dos experimentos práticos, optou-se em efetuar a variação de um único parâmetro de cada vez e manter os demais. Após finalizar o primeiro experimento, buscou-se

analisar como o parâmetro modificado se comportou, bem como avaliar em qual valor o parâmetro teve melhor desempenho de furação, para assim utilizá-lo no experimento seguinte. Caso fosse obtido um ganho significativo com algum parâmetro o teste seria repetido, com parâmetros anteriores, para ver se os resultados se comportam da mesma maneira com a alteração do novo parâmetro.

Em todos os experimentos foram mantidos fixos os seguintes parâmetros da Tabela 3: Sendo o Sfeed a velocidade de rotação do eletrodo e o parâmetro de pressão representa a pressão de alimentação do fluido dielétrico.

Tabela 3 – Parâmetros fixos

Sfeed (rpm)	Pressão (bar)
1560	50

Fonte: o autor (2016)

No primeiro experimento prático foram mantidos constantes os parâmetros  $T_{OFF}$ , Feed e IP. Já o parâmetro  $T_{ON}$  sofreu uma variação entre  $28\mu s$  e  $42\mu s$ .

Tabela 4 – Experimento em função de  $T_{ON}$

$T_{ON}$ ( $\mu s$ )	$T_{OFF}$ ( $\mu s$ )	Feed (%)	IP (nível)
28	20	10	22
29	20	10	22
30	20	10	22
31	20	10	22
32	20	10	22
33	20	10	22
34	20	10	22
35	20	10	22
36	20	10	22
37	20	10	22
38	20	10	22
39	20	10	22
40	20	10	22
41	20	10	22
42	20	10	22

Fonte: o autor (2016)

Nos experimentos em função de  $T_{OFF}$  serão mantidos constantes o parâmetro Feed e IP. Para  $T_{ON}$  será utilizado o valor do parâmetro que teve melhor desempenho no primeiro

experimento, já  $T_{OFF}$  terá uma variação entre  $15\mu s$  e  $40\mu s$ .

Tabela 5 – 2º experimento em função de  $T_{OFF}$

$T_{ON}$ ( $\mu s$ )	$T_{OFF}$ ( $\mu s$ )	Feed (%)	IP (nível)
Melhor desempenho do experimento anterior	15	10	22
	17	10	22
	20	10	22
	22	10	22
	25	10	22
	27	10	22
	29	10	22
	31	10	22
	33	10	22
	35	10	22
	37	10	22
40	10	22	

Fonte: o autor (2016)

Caso o experimento em função de  $T_{OFF}$  obtiver um ganho considerável no tempo de furação, o novo parâmetro encontrado deverá ser considerado para refazer os experimentos em função de  $T_{ON}$  e ser reavaliado. Se o experimento em função de  $T_{OFF}$  não obtiver um desempenho muito expressivo deve se dar continuidade nos demais experimentos em função de Feed e IP.

Nos experimentos em função de Feed deverão ser utilizados os parâmetros de melhor desempenho de  $T_{ON}$  e  $T_{OFF}$  obtidos nos experimentos anteriores. Já IP será mantido constante e Feed terá uma variação de 1 a 10.

Tabela 6 – 3º experimento variação em função de Feed

$T_{ON}$ ( $\mu s$ )	$T_{OFF}$ ( $\mu s$ )	Feed (%)	IP (nível)
Melhor desempenho do experimento anterior	Melhor desempenho do experimento anterior	10	22
		9	22
		8	22
		7	22
		6	22
		5	22
		4	22
		3	22
		2	22
		1	22

Fonte: o autor (2016)

Caso o experimento em função de Feed obtenha um ganho expressivo na redução do tempo de furação, os experimentos anteriores devem ser refeitos utilizando o novo parâmetro



obtido em função de Feed. Se os experimentos em função de Feed não apresentarem um ganho muito expressivo será prosseguido para realizar os experimentos em função de IP.

Para os experimentos em função de IP deverão ser utilizados os parâmetros de melhor desempenho de  $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$  e Feed. Já IP terá uma variação de 19 a 26.

Tabela 7 – Experimento variação em função de IP

$T_{ON}$ ( $\mu s$ )	$T_{OFF}$ ( $\mu s$ )	Feed (%)	IP (nível)
			19
Melhor	Melhor	Melhor	20
desempenho	desempenho	desempenho	21
do	do	do	22
experimento	experimento	experimento	23
anterior	anterior	anterior	24
			25
			26

Fonte: o autor (2016)

Caso os experimentos em função de IP obtiverem um ganho considerável na redução do tempo de furação, os experimentos anteriores deverão ser refeitos utilizando o novo parâmetro encontrado em função de IP. Se não obtiver nenhum ganho expressivo na redução do tempo de furação e desgaste do eletrodo os experimentos serão finalizados.

Os experimentos práticos foram realizados em busca de verificar se é possível encontrar uma combinação de parâmetros que consiga conciliar a redução do tempo de usinagem e manter desgaste de eletrodo próximo da espessura da peça a ser furada, sendo uma placa de 25mm.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Análises de teste práticos

No primeiro experimento foram mantidos constantes os seguintes parâmetros, Sfeed 1560rpm, Pressão 50bar,  $T_{OFF}$  20 $\mu$ s, Feed 10% e IP 22, e  $T_{ON}$  teve uma variação na faixa de 28 $\mu$ s a 42 $\mu$ s.

Tabela 8 – Dados obtidos nos experimentos com variação do  $T_{ON}$

$T_{ON}$ ( $\mu$ s)	Tempo (min)	Desgaste (mm)
28	23,50	19,2
29	21,75	22,8
30	20,58	25,2
31	19,25	25,5
32	19,50	23,8
33	18,20	26,5
34	18,02	27,5
35	17,75	23,8
36	17,52	26,9
37	17,42	26,1
38	17,33	25,8
39	17,42	31,2
40	18,02	28,5
41	19,92	30,1
42	20,58	28,1

Fonte: o autor (2016)

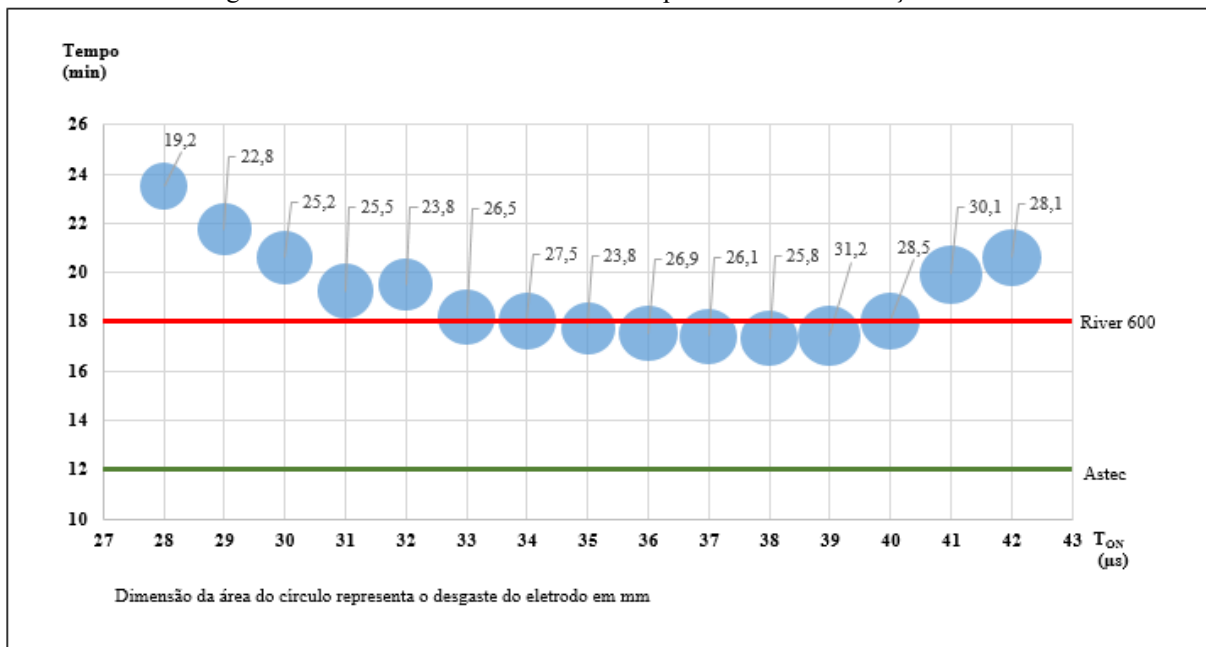
Entre os valores de  $T_{ON}$  28 $\mu$ s e 39 $\mu$ s constatou-se que, conforme o valor do parâmetro era elevado, a velocidade com que o eletrodo se deslocava o sentido de furação também aumentava. De acordo com Santos (2010), quanto maior  $T_{ON}$ , maior será a velocidade de deslocamento de furação do eletrodo. Já quando o parâmetro ultrapassou a faixa de  $T_{ON}$  39 $\mu$ s, o eletrodo entrou em contato com a peça. Isso foi causado pelo aumento do tempo de onda ligado, o que pôde ser constatado visualmente, haja vista que o eletrodo flexionava quando entrava em contato com a peça. Assim, pôde-se observar que a usinagem não se comportava de forma estável, o que ocasionou uma elevação no tempo de furação e um maior desgaste do eletrodo.

Como parâmetro para os experimentos seguintes foi definido o  $T_{ON}$  38 $\mu$ s, que teve o

menor tempo de usinagem, sendo 17,33 minutos, e um desgaste de eletrodo de 25,8 mm, mesmo o parâmetro de T-ON obtendo um desgaste de 2mm a menos ele não é viável devido ao tempo ser 0,42 minutos mais lento, levando em consideração que cada 1mm de eletrodo custe em torno de 5centavos, e cada minuto ganho gere 1real e 33 centavos de economia.

O gráfico da Figura 9 permite melhor entendimento de como os experimentos em função da variação de  $T_{ON}$  se comportaram. O eixo vertical representa o tempo de furação, o eixo horizontal representa a variação do  $T_{ON}$ , a área da bolha mostra o desgaste do eletrodo, a linha vermelha representa o tempo de furação da máquina River 600 antes dos experimentos, e a linha verde apresenta o tempo de furação realizado pela máquina anterior, Astec.

Figura 9 – Gráfico de dados obtidos nos experimentos com variação do  $T_{ON}$



Fonte: o autor (2016)

Na Figura 9 pode-se perceber que o menor tempo de usinagem não sofreu grande variação em relação aos resultados já alcançados com a River 600. Isto é, os experimentos realizados estão muito próximos da linha representada pela River 600. Há, ainda, uma margem muito grande a ser trabalhada para obter um tempo que se aproxime da linha representada pela Astec, que representa o tempo de furação atingido pela máquina Astec.

No segundo experimento foram mantidos constantes os seguintes parâmetros, Sfeed 1560rpm, Pressão 50bar,  $T_{ON}$  38 $\mu s$ , Feed 10% e IP 22, e  $T_{OFF}$  teve uma variação na faixa de 15 $\mu s$  a 40 $\mu s$ .

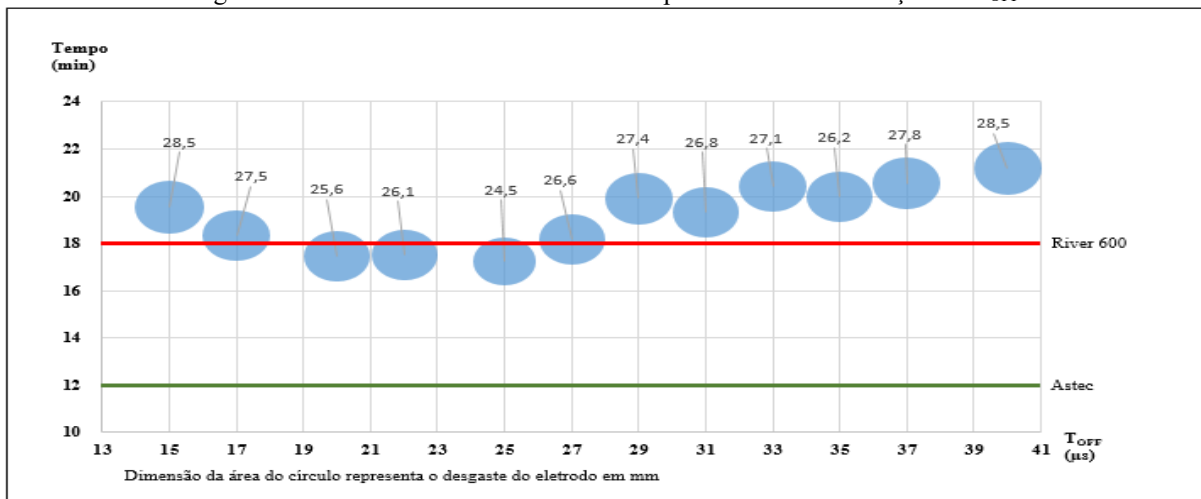
Tabela 9 – Dados obtidos nos experimentos com variação do  $T_{OFF}$ 

$T_{OFF}$ ( $\mu$ s)	Tempo (min)	Desgaste (mm)
15	19,53	28,5
17	18,33	27,5
20	17,47	25,6
22	17,50	26,1
25	17,25	24,5
27	18,17	26,6
29	19,90	27,4
31	19,33	26,8
33	20,42	27,1
35	19,97	26,2
37	20,53	27,8
40	21,18	28,5

Fonte: o autor (2016)

Pode se perceber que não houve uma grande variação no desgaste do eletrodo que ficou na faixa de 24,5 mm a 28,5 mm. Com o valor de  $T_{OFF}$  entre 15 $\mu$ s e 17 $\mu$ s não se obteve uma furação estável, devido à área afetada pela última descarga elétrica não estar preparada para uma nova descarga, já com  $T_{OFF}$  entre 20 $\mu$ s e 25 $\mu$ s percebe-se uma estabilidade na furação e um tempo similar. A partir de  $T_{OFF}$  25 $\mu$ s a furação se manteve estável, porém houve um aumento do tempo de usinagem. Isso confirma a afirmação de Santos (2010) de que o tempo se faz necessário para estabilização da usinagem, não havendo relação direta com desgaste do eletrodo. Assim, quanto maior o tempo sem descarga, mais lento o processo fica.

A Figura 10 representa graficamente os dados coletados em função da variação do  $T_{ON}$  15 $\mu$ s a 40 $\mu$ s.

Figura 10 – Gráfico de dados obtidos nos experimentos com variação do  $T_{OFF}$ 

Fonte: o autor (2016)

Para realização de novos experimentos o parâmetro a ser utilizado será de  $T_{OFF}$  25 $\mu$ s, para o qual se obteve o menor tempo e desgaste, sendo 17,25 minutos e 24,5 mm, respectivamente.

As informações bibliográficas auxiliaram o entendimento de como  $T_{ON}$  e  $T_{OFF}$  reagem a cada alteração, todavia no quesito redução de tempo de usinagem não surtiu efeito considerável. Antes de realizar o último experimento em IP, optou-se em seguir uma nova informação: o operador da máquina sugeriu que a redução do parâmetro Feed poderia baixar tempo de usinagem e gerar melhores resultados.

Na furação de aços o valor de Feed, que varia em uma escala entre 1% e 100%, tem melhor desempenho em proporções maiores que 40%. Até o momento o valor utilizado em metal duro era de Feed 10%.

No terceiro experimento foram mantidos constantes os seguintes parâmetros, Sfeed 1560rpm, Pressão 50bar,  $T_{ON}$  38 $\mu$ s,  $T_{OFF}$  25 $\mu$ s, IP 22, e Feed teve uma variação na faixa de 10% a 3%

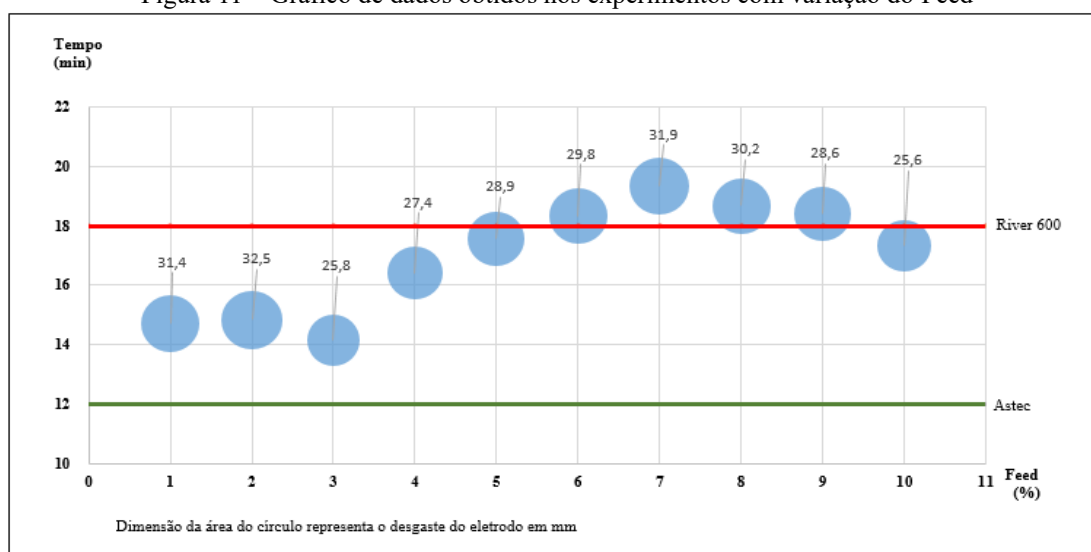
Tabela 10 – Dados obtidos nos experimentos com variação do Feed

Feed (%)	Tempo (min)	Desgaste (mm)
10	17,33	25,6
9	18,42	28,6
8	18,67	30,2
7	19,33	31,9
6	18,33	29,8
5	17,58	28,9
4	16,42	27,4
3	14,15	25,8
2	14,83	32,5
1	14,72	31,4

Fonte: o autor (2016)

De acordo com a tabela 10 pode se perceber que, na medida em que o Feed foi reduzido de 10% para 7%, o tempo de usinagem aumentava. Contudo, a partir de Feed 6% percebe-se um efeito positivo na redução do tempo, sendo a melhor condição encontrada com Feed 3%, com um tempo de 14,15 minutos e com um desgaste de eletrodo de 25,8mm.

Figura 11 – Gráfico de dados obtidos nos experimentos com variação do Feed



Fonte: o autor (2016)

Como pode-se constatar na Figura 20, o tempo encontrado com Feed 3% já se aproxima mais do tempo realizado pela máquina Astec.

Com este novo parâmetro encontrado optou-se por realizar novamente os experimentos em  $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$  e IP, de modo a observar se os parâmetros continuam a se confirmar.

Para realizar novos experimentos em  $T_{ON}$  foi mantido, Sfeed 1560rpm, Pressão 50bar  $T_{OFF}$  25 $\mu$ s, Feed 3%, IP 22, e o  $T_{ON}$  com uma variação de 30 $\mu$ s a 50 $\mu$ s.

Tabela 11 – Dados obtidos nos experimentos com variação do  $T_{ON}$ 

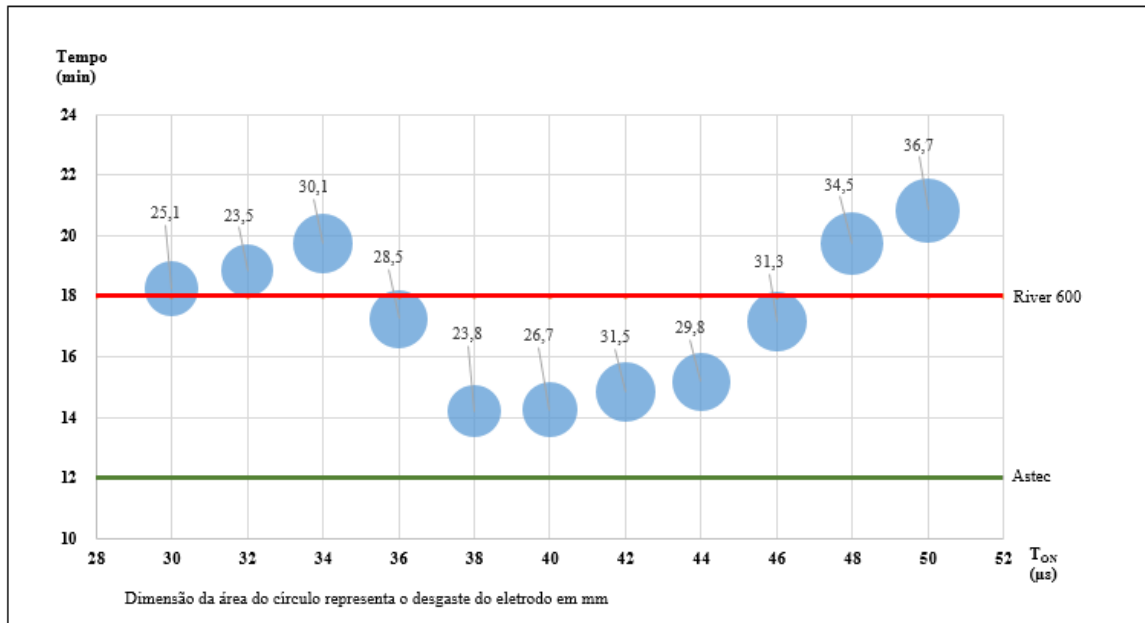
$T_{ON}$ ( $\mu$ s)	Tempo (min)	Desgaste (mm)
30	18,25	25,1
32	18,83	23,5
34	19,75	30,1
36	17,25	28,5
38	14,20	23,8
40	14,25	26,7
42	14,83	31,5
44	15,17	29,8
46	17,17	31,3
48	19,75	34,5
50	20,83	36,7

Fonte: o autor (2016)

Os novos experimentos realizados em função da variação do  $T_{ON}$  confirmaram que a melhor condição foi obtida com parâmetro  $T_{ON}$  38 $\mu$ s, com um tempo de 14,20 minutos e com

um desgaste do eletrodo de 23,8 mm.

Figura 12 – Gráfico de dados obtidos nos experimentos com variação do  $T_{ON}$



Fonte: o autor (2016)

Na Figura 12 pode-se constatar que o melhor desempenho foi encontrado com  $T_{ON}$  38 $\mu s$ , bem como que o tempo de furação já vem apresentando um desempenho melhor que no primeiro experimento.

Para realização dos experimentos em função de  $T_{OFF}$ , foi selecionado Sfeed 1560rpm, Pressão 50bar,  $T_{ON}$  38 $\mu s$ , Feed 3%, IP 22, e  $T_{OFF}$  variando de 15 $\mu s$  a 40 $\mu s$ .

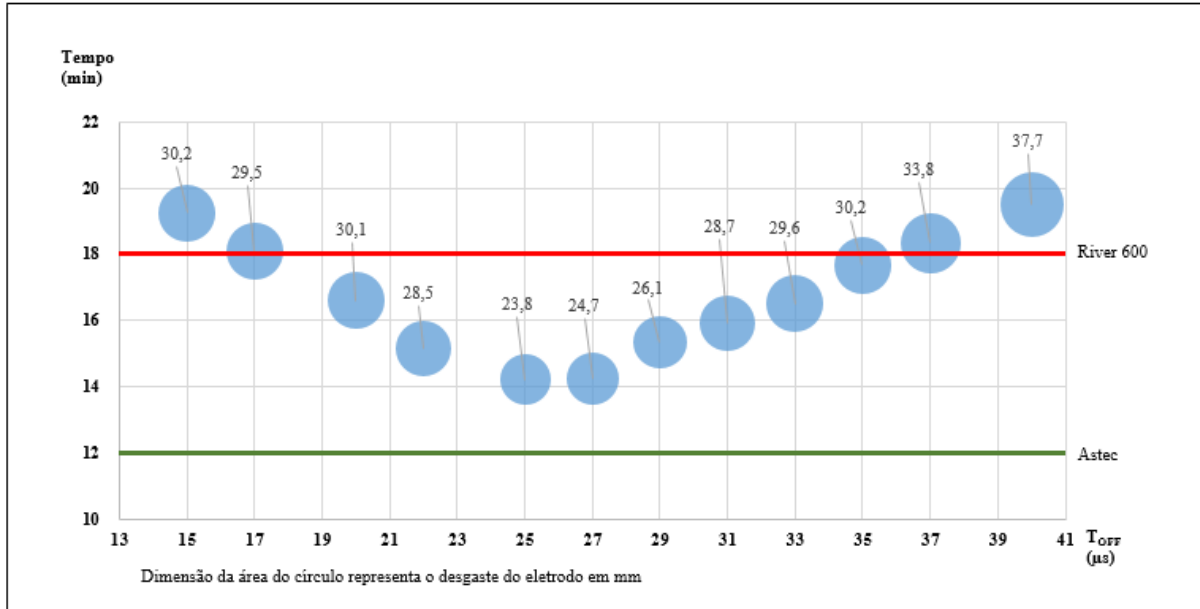
Tabela 12 – Dados obtidos nos experimentos com variação do  $T_{OFF}$

$T_{OFF}$ ( $\mu s$ )	Tempo (min)	Desgaste (mm)
15	19,25	30,2
17	18,08	29,5
20	16,58	30,1
22	15,17	28,5
25	14,20	23,8
27	14,25	24,7
29	15,33	26,1
31	15,92	28,7
33	16,50	29,6
35	17,67	30,2
37	18,33	33,8
40	19,50	37,7

Fonte: o autor (2016)

Experimentos realizados em função da variação de  $T_{OFF}$  também mostram que o melhor desempenho obtido foi com  $T_{OFF}$  25 $\mu$ s, com tempo de 14,20 minutos e com um desgaste do eletrodo de 23,8 mm.

Figura 13 – Gráfico de dados obtidos nos experimentos com variação do  $T_{OFF}$



Fonte: o autor (2016)

Na Figura 13 é possível observar que o melhor desempenho encontrado em função de  $T_{OFF}$  foi com 25 $\mu$ s.

Para realizar os experimentos em função de IP foram selecionados, Sfeed 1560rpm, Pressão 50bar,  $T_{ON}$  38 $\mu$ s,  $T_{OFF}$  25 $\mu$ s, Feed 3% e o IP variando do nível 19 ao 26.

Tabela 13 – Dados obtidos nos experimentos com variação do IP

IP (nível)	Tempo (min)	Desgaste (mm)
19	21,58	35,6
20	17,83	30,3
21	15,67	28,9
22	14,33	24,8
23	15,25	27,3
24	16,83	29,7
25	19,33	35,8
26	20,75	42,1

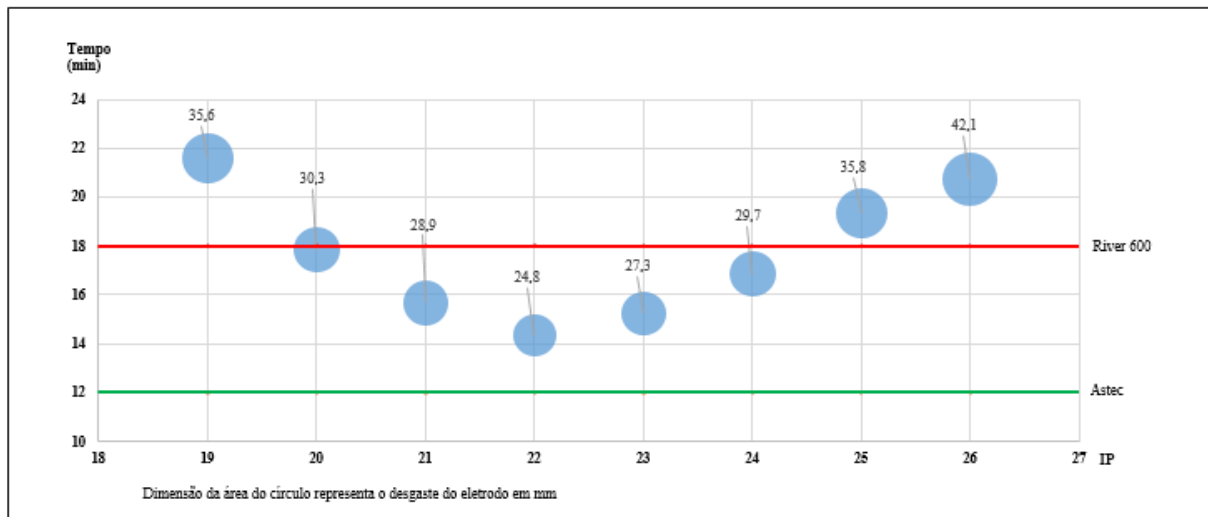
Fonte: o autor (2016)



Experimentos realizados em função da variação do IP verificaram que o parâmetro de IP 22 utilizado até o momento foi a melhor condição encontrada, com um tempo de 14,33 minutos, desgaste de eletrodo de 24,8 mm e variação de IP entre 19 e 26.

Segundo Santos (2010) quanto maior a corrente utilizada, maior a taxa de remoção do material. Porém, a corrente tem suas limitações, de acordo com a área usinada e o material do eletrodo. Nos experimentos realizados pode-se constatar que entre 19 e 22, conforme a corrente era aumentada ocorria também um aumento na taxa de remoção. Após ultrapassar o nível de corrente 22 houve um aumento considerável no desgaste do eletrodo e um aumento no tempo de usinagem.

Figura 14 – Gráfico de dados obtidos nos experimentos com variação do IP



Fonte: o autor (2016)

Na Figura 14 é possível observar que o melhor desempenho encontrado em função de IP foi no nível 22, já utilizado nos experimentos anteriores.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho pretendeu-se estabelecer novos parâmetros de usinagem, com intuito de reduzir o tempo de furação em matrizes de metal duro realizadas na máquina River 600. O tempo de furação da River 600 estava aproximadamente 50% acima do tempo da máquina Astec, na qual as furações eram realizadas em torno de 12 minutos em uma placa matriz de metal duro com 25 mm de espessura.

Nos experimentos práticos em função dos parâmetros  $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$  e IP, pode-se constatar que os parâmetros se comportavam de acordo com Santos (2010). Mas, como os parâmetros de usinagem nestes itens já se aproximavam do parâmetro mais adequado, não se atingiu uma redução considerável no tempo de furação.

Utilizando-se o parâmetro Feed, sugerido pelo operador da máquina, foi possível observar que o valor de Feed não se comportou de maneira uniforme. Na medida em que o valor do percentual era reduzido na faixa de 10% a 7%, o tempo de usinagem teve um aumento, mas quando se reduziu o percentual do Feed entre 7% e 3%, obteve-se um tempo de furação menor, sendo de 14,15 minutos com um desgaste linear do eletrodo de 25,8mm.

Antes da realização dos estudos e testes práticos, a máquina River 600 realizava uma furação em placas de 25mm de metal duro em aproximadamente 18 minutos. A máquina anterior, Astec, realizava o mesmo procedimento em torno de 12 minutos.

Ao final dos experimentos constatou-se que o parâmetro Feed foi o parâmetro que teve maior influência na redução do tempo, sendo assim o parâmetro com melhor desempenho obtidos foram os seguintes, T-ON 38 $\mu$ s, T-OFF 25 $\mu$ s, Feed 3% e IP 22, obtendo como parâmetros de saída um desgaste de eletrodo em torno de 25mm que é aceitável, e um tempo de furação em torno de 14,3 minutos atingindo assim o objetivos traçado que era obter um tempo de furação mais condizente como o que era realidade pela furadeira Astec e isso foi alcançado.

Alguns parâmetros foram especificados apenas em níveis ou percentuais, não sendo possível encontrar valores reais. Todavia a lógica de alterações de valor foi condizente com a lógica citada na fundamentação teórica, confirmando o que outros autores já haviam escrito sobre esses parâmetros.

Sugere-se, para trabalho futuros, um estudo mais aprofundado em função do parâmetro Feed, já que foi o parâmetro em que se obteve-se os melhores resultados e o uso de uma ferramenta com DOE para ter um campo de abrangência mais confiável.

## REFERÊNCIAS

- AMORIM, F. L. **Tecnologia de eletroerosão por penetração de liga de alumínio AMP 800 e da liga de cobre CuBe para ferramentas de moldagem de matérias plásticas**. 2002. 156 f. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artlibert, 2013. 270p.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2003. 751 p.
- FRANCISCO, A. C. M. **Produção e caracterização de pós compósitos nanoestruturados do metal duro WC-10CO por moagem de alta energia**. 2006. (Dissertação de Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2006.
- JAHAN, M. P.; WONG, Y. S.; RAHMAN, M. **Experimental investigations into the influence of major operating parameters during micro-electro discharge drilling of cemented carbide**. Taylor & Francis Group. Fayetteville, p. 131-156. 2012.
- LIMA, R. M. **Utilização de fluidos dielétricos à base de óleos vegetais na usinagem por descargas elétricas por penetração**. 2008. (Dissertação de Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2008.
- MEDEIROS, J. T. N.; **Análise de Alguns Parâmetros Tecnológicos da Usinagem de Aço Carbono por Eletroerosão**. Dissertação de Mestrado EESC-USP, São Carlos, 1981.
- MÉROZ, R.; CUENDET, M. **As Estampas: A Eletroerosão e os Moldes**. Hemus, 2004. 300p.
- NEVES, H. P.; SOUZA, G. O. **Influência da variação dos parâmetros do processo de eletroerosão por petração no desgaste do eletrodo e na produtividade no desbaste do aço inoxidável 304 e do inconel 718**. In: 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2013. Itatiaia, Salvador-BA. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2013.
- NEWELL, J. **Fundamentos da Moderna Engenharia e Ciência dos Materiais**. LTC 2010. 288 p.
- REMY, A.; GAY, M.; GONTHIER, R; **Materiais**. 2. ed. Hemus, 2002. 391 p.
- SANTOS, I. **Análise dos parâmetros de entrada na eletroerosão de penetração da liga de titânio Ti-6Al-4V**. 2010. (Dissertação de Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2010.
- SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. 6. ed. Pearson, 2010. 556 p.
- SILVESTRE, A. J.; SILVA, L. F. F.; MANZAN JÚNIOR, S.; e ALCÂNTARA, W. **Eletroerosão convencional, a fio e por abrasão**. Goiânia, 2013.

SIMAO, J.; LEE, H.G.; ASPINWALL, D. K.; DEWES, R. C.; ASPINWALL, E. M. Workpiece surface modification using electrical discharge machining. *International Journal of Machine. Tools & Manufacture*, n. 43, p. 212-228. 2003.

TORRES, C. S. **Estudos da moagem de alta energia e sinterização de metal duro WC-Ni.** 2009. (Dissertação de Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2009.