

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**KARLONY STERPOONY PLEM**

**A INFLUÊNCIA DA RETRAÇÃO DA FERRAMENTA NA TAXA DE  
REMOÇÃO DE MATERIAL NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO  
UTILIZANDO ELETRODOS DE COBRE ELETROLÍTICO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA - PR**

**2018**

**KARLONY STERPOONY PLEM**

**A INFLUÊNCIA DA RETRAÇÃO DA FERRAMENTA NA TAXA DE  
REMOÇÃO DE MATERIAL NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO  
UTILIZANDO ELETRODOS DE COBRE ELETROLÍTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica, do Departamento  
Acadêmico de Mecânica, da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Ms. Irapuan Santos

**PONTA GROSSA**

**2018**



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**A INFLUÊNCIA DA RETRAÇÃO DA FERRAMENTA NA TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO UTILIZANDO ELETRODOS DE COBRE ELETROLÍTICO**

por

**KARLONY STERPOONY PLEM**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 27 de junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Me.Irapuan Santos  
Orientador

Prof. Dr.Marcelo Vasconcelos de Carvalho  
Membro Titular

Prof. Me.Péricles Secco Cancian  
Membro Titular

Prof.Dr. Marcos Eduardo Soares  
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de  
Carvalho  
Coordenador do Curso

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos os professores que de alguma forma me auxiliaram no andamento deste trabalho, especialmente ao meu orientador Prof. Ms. Irapuan Santos, que não mediu esforços em se fazer presente durante o desenvolvimento do trabalho, à minha colega de curso Jéssica de Oliveira e ao técnico laboratorista, Eriel Biagini Sabino, do laboratório de usinagem, onde os experimentos foram realizados, que gentilmente auxiliaram na execução dos ensaios.

Agradeço, também, aos meus pais e minha namorada por todo o apoio nos momentos de dificuldade, e pela compreensão nas diversas ocasiões em que me ausentei para dar conclusão a esta etapa.

## RESUMO

PLEM, Karlony S.. **A Influência da retração da ferramenta na taxa de remoção de material no processo de eletroerosão utilizando eletrodos de cobre eletrolítico.** 2018. 41. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

Este trabalho pretende correlacionar o comportamento da taxa de remoção de material quando há variação dos parâmetros de retração da ferramenta mantendo-se constantes todos os demais parâmetros de entrada no processo de eletroerosão por penetração utilizando eletrodos de cobre eletrolítico e amostras de aço ABNT 1045. Verifica-se maior sensibilidade da taxa de remoção em relação ao tempo entre retrações do que para o valor da retração. Para o tempo entre retrações a taxa de remoção apresenta decrescimento dentro do intervalo ensaiado e para os valores de retração permanece constante para os valores maiores que 0,3 mm.

**Palavras-chave:** Eletroerosão por penetração. Retração da ferramenta. Taxa de remoção do material. Variação de parâmetros.

## ABSTRACT

PLEM, Karlony S.. **The influence of the tool retraction on the material removal rate in EDM process using electrolytic copper electrodes**. 2018. 41. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

This work intend to demonstrate the influence of retraction parameters on the material removal rate in EDM machining using electrolytic copper electrodes and ABNT 1045 steel samples. Was verified the decrease on material rate removal for the time span retraction and constancy for the retraction tool for values greater than 0,3 mm within the range tested.

**Palavras-chave:** Electrical Discharge Machining. Tool retraction. Material removal rate. Parameters variation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Componentes de um sistema de usinagem por eletroerosão .....	9
Figura 2 - Representação esquemática das etapas de descarga .....	10
Figura 3 - Métodos de transporte de dielétrico .....	14
Figura 4 - Dimensões do eletrodo .....	20
Figura 5 - Dimensões do corpo de prova .....	21
Fotografia 1 - Medição de massa utilizando balança analítica com calço de papel para não danificar o sistema de pesagem.....	25
Fotografia 2 – Fixação do corpo de prova e do eletrodo .....	26
Gráfico 1 - Comportamento da taxa de remoção em função do tempo usinando entre retrações .....	32
Gráfico 2 - Comportamento da taxa de remoção em função da retração.....	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - algumas propriedades físicas do cobre eletrolítico e do grafite.....	18
Tabela 2 - Composição química do Aço ABNT 1045 .....	19
Tabela 3 - Parâmetros constantes do procedimento.....	22
Tabela 4 - Quantidade de ensaios para cada combinação de parâmetros .....	23
Tabela 5 - Sequência de execução dos ensaios .....	23
Tabela 6 - Valores obtidos das taxas de remoção associados às respectivas medições de massa e cronometragem .....	30
Tabela 7 - Quantidades de incerteza associadas à cada grupo de parâmetros e suas respetivas médias e desvios padrão das taxas de remoção .....	31



## LISTA DE ABREVIATURAS

$h$	Retração da ferramenta (mm)
$m_f$	Massa final do corpo de prova (g)
$m_i$	Massa inicial do corpo de prova (g)
$m_r$	Massa do material removido (g)
$N$	Amostragem
$RC$	Resistivo capacitivo
$S$	Desvio padrão amostral
$T$	Tempo entre retrações (s)
$t$	Tempo total da operação (min)
$t_c$	Coefficiente de Student
$T_{ON}$	Tempo de onda ligada ( $\mu s$ )
$T_{OFF}$	Tempo de onda desligada ( $\mu s$ )
$T_S$	Número de transistores ligados
$V$	Volume usinado do material ( $mm^3$ )
$V_W$	Taxa de remoção ( $mm^3/min$ )
$x$	Série de retrações

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EDM	Electrical Discharge Machining
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WEDM	Wire Electrical Discharge Machining

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>4</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1 A ELETROEROSÃO .....	6
2.2 O FENÔMENO FÍSICO DA ELETROEROSÃO .....	8
2.3 PARÂMETROS INFLUENTES.....	12
2.3.1 Polaridade do Eletrodo .....	12
2.3.2 A Influência do Dielétrico e a Condição de Limpeza.....	12
2.3.3 Retração do Eletrodo .....	14
2.3.4 Tempos de Onda Ligada ( $T_{ON}$ ) e Desligada ( $T_{OFF}$ ) e o <i>Duty Cycle</i> .....	15
2.3.4.1 Tempo de onda ligada ( $T_{ON}$ ) .....	15
2.3.4.2 Tempo de onda desligada ( $T_{OFF}$ ) .....	16
2.3.5 A Corrente .....	16
2.3.6 A Frequência.....	17
2.3.7 O Material do Eletrodo Ferramenta.....	17
2.3.8 O Material da Peça .....	18
2.4 O AÇO SAE 1045 .....	19
<b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>20</b>
3.1 INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS .....	21
3.2 PARÂMETROS .....	21
3.3 ORDEM DE EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS .....	23
3.4 MEDIÇÕES DAS MASSAS INICIAIS E FINAIS.....	24
3.5 FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	26
3.6 SEQUÊNCIA DOS ENSAIOS .....	26
3.7 CÁLCULO DA TAXA DE REMOÇÃO .....	27
3.8 TRATAMENTO DOS DADOS.....	28
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>30</b>
4.1 ANÁLISE DOS DADOS PARA O TEMPO ENTRE RETRAÇÕES DA FERRAMENTA.....	31
4.2 ANÁLISE DOS DADOS PARA A RETRAÇÃO DA FERRAMENTA.....	33
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>34</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>35</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>36</b>
<b>APÊNDICE A - Parâmetros de usinagem fornecidos pelo fabricante do equipamento</b>	<b>38</b>
<b>APÊNDICE B - Valores dos percentis da distribuição t de Student com v graus de liberdade</b>	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em um cenário industrial competitivo, onde as metas de eficiência e produtividade são cada vez mais apertadas para um produto ou uma marca sustentar-se no mercado, a utilização da usinagem por eletroerosão é uma alternativa atraente no processamento de materiais de difícil usinabilidade.

A grosso modo, a retirada de material no processo de eletroerosão acontece concentrando uma elevada, porém rápida e pontual descarga elétrica, ou também chamada faísca, na superfície a ser usinada, fazendo com que a pequena quantidade atingida do material alcance altos níveis de temperatura, sendo vaporizada, e instantaneamente removida. Ao contrário dos processos convencionais de usinagem (torneamento, fresamento, retificação, brunimento, etc.) na eletroerosão a remoção de material não se dá pela aplicação de forças de corte, logo, a dureza do material não é uma propriedade determinante para a execução da usinagem. Por outro lado, devido à necessidade de passagem de corrente, a condutividade elétrica se torna um dos principais parâmetros de usinagem a serem considerados, viabilizando a usinagem de materiais extremamente duros, desde que bons condutores elétricos (LEE e LI, 2001).

Apesar de apresentar vantagens significativas quanto a aplicabilidade em relação aos processos convencionais de usinagem, o processo de eletroerosão tem como sua principal desvantagem o tempo de usinagem, que é consideravelmente maior que o dos demais processos, essa característica se dá em decorrência da baixa taxa de remoção de material o que o torna um processo oneroso. Portanto, esta é o ponto onde se concentram as principais oportunidades de melhoria (BENEDICT, 1987), fazendo-se necessário aprofundar os conhecimentos sobre a dependência da taxa de remoção com os parâmetros do processo.

Um dos parâmetros da usinagem por eletroerosão é a retração da ferramenta, que pode influenciar diretamente a taxa de remoção de material, apesar de não se encontrar estudos que abordem a forma com que ocorre essa dependência. Segundo Amorim e Weingaertner (2007) o tempo de retração é definido como o tempo que o eletrodo retrocede, portanto, não disparando faíscas. A taxa de remoção de material é calculada dividindo a variação de volume da peça erodida pelo tempo total de erosão.

O cavaco gerado durante a execução da usinagem, na maioria das vezes, se acumula no pequeno espaço existente entre a ferramenta e a peça (também chamado de gap), reduzindo a efetividade da remoção de material causada pela descarga elétrica. Em termos práticos, o tempo de retração é o tempo em que a ferramenta se distancia da peça para que a superfície usinada possa se “auto-limpar”. Devido à pouca literatura disponível a respeito desse parâmetro, é impossível afirmar se o tempo total de erosão aumenta com o aumento dos parâmetros de retração, ou se os efeitos do acúmulo de cavacos no gap interferem na taxa de remoção, a ponto de compensar o incremento de tempo causado pela retração.

O estudo acerca da influência da retração da ferramenta na taxa de remoção de material virá a corroborar com o crescimento e a eficiência do processo de usinagem por eletroerosão de uma forma geral, pois a partir deste, será possível selecionar parâmetros de usinagem mais assertivos a depender de cada aplicação.

Este trabalho tem o objetivo de investigar a dependência entre a taxa de remoção de material e os parâmetros de retração da ferramenta a partir da análise dos ensaios realizados, utilizando amostras de aço ABNT 1045 e eletrodos de cobre eletrolítico.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Kalpakjian e Schmid (2010, p. 554) os processos de usinagem são classificados como:

- Corte (do inglês “cutting”), cujas ferramentas utilizadas possuem forma e dimensão claramente definidas;
- Processos abrasivos, onde as ferramentas possuem formas e dimensões irregulares;
- Processos avançados de usinagem, empregados quando os citados anteriormente se tornam inviáveis devido à qualquer particularidade de aplicação, podendo ser econômica, limitações do material ou complexidade da peça.

Outra classificação muito similar à de Kalpakjian e Schmid (2010, p. 554), dos processos de usinagem, é utilizada por Weingaertner (199-?), citado por Santos (2010, p. 21), dividindo-os em processos de usinagem com ferramentas de geometria definida, processos de usinagem com ferramentas de geometria não definida e processos especiais de usinagem.

Processos especiais, ou também conhecidos como processos não convencionais de usinagem, começaram a ser desenvolvidos a partir da década de 1940, para suprir as demandas de processamento das novas tecnologias e materiais sofisticados surgidos na época. Tais demandas envolvem o aumento de produtividade pela redução da quantidade de operações em um processo, e o desperdício de matéria prima, ou ainda possibilitar o processamento de materiais de difícil usinabilidade devido às suas propriedades mecânicas (BENEDICT, 1987, p. 2). Os principais processos não convencionais utilizados são a usinagem por eletroerosão, usinagem com jato d’água, usinagem a laser e usinagem química.

### 2.1 A ELETROEROSÃO

Guitrau (1997) define o processo de eletroerosão como:

O processo de remoção elétrica de material de qualquer peça condutora. Sendo ativado pela aplicação de pulsos de corrente alternada ou corrente contínua de alta frequência para a peça através do eletrodo ou arame, a qual funde e vaporiza o material da peça.

Segundo Cruz Junior (2015) o estudo sobre a remoção de materiais a partir de faíscas não estacionárias foi iniciado por Lazarenko na Universidade de Moscou,

em 1943. Utilizando um sistema resistivo capacitivo (RC) como fonte de energia, Lazarenko vaporizou pequenas quantidades da superfície de materiais de difícil usinabilidade. Em paralelo, na mesma época, o processo era utilizado nos Estados Unidos para remover brocas e machos quebrados em válvulas hidráulicas, o que corroborou para desenvolver a máquina de eletroerosão por tubo de vácuo.

Entretanto, foi a partir da década de 1980 que houve os maiores avanços nos equipamentos de eletroerosão, utilizando-se do advento do comando numérico computadorizado para suprir o desafio de posicionamento do eletrodo em relação à peça e tornar o processo controlado e seguro (GUITRAU, 1997, p. 19 e CRUZ JUNIOR, 2015, p. 14).

Devido à ausência de forças de corte a usinagem por eletroerosão, ou também conhecida como EDM (do inglês Electrical Discharge Machining), é capaz de usinar materiais endurecidos sem causar distorções superficiais, o que favorece a sua utilização em indústrias que enfrentam desafios relacionados a materiais de difícil processamento e superfícies complexas (BENEDICT, 1987). Segundo Santos (2010) o processo possui grande aplicação na fabricação de moldes e matrizes, bem como nos setores automotivo, aeroespacial, médico, ótico, de joalheria, dental, de ferramentas, de prototipagem e de componentes cirúrgicos. De acordo com a pesquisa realizada por Peterson (1984), citada por Benedict (1987), a divisão aproximada para o uso de equipamentos de EDM por várias indústrias é: ferramentarias, 50%; equipamentos de fabricação de precisão, 30%; aeroespacial, 10%; indústrias automotivas, 5%; e outras, 5%.

O processo de eletroerosão tem duas principais subdivisões no que tange a operacionalidade e efetiva aplicabilidade. Sendo a eletroerosão de profundidade a precursora e mais utilizada configuração do processo, e a eletroerosão à fio, ou também conhecida por WEDM (do inglês Wire Electrical Discharge Machining) (WEINGAERTNER, 199-?).

A eletroerosão de profundidade imprime a forma (podendo ser complexa ou não) do eletrodo na peça a cada faísca disparada (BENEDICT, 1987). Esta variação do processo é utilizada para produzir cavidades com fundo, ou também chamadas de cavidades “cegas” (SANTOS, 2010).

A eletroerosão a fio utiliza de um arame, alimentado por um carretel, como eletrodo para vaporizar pequenas porções de material, atravessando completamente a peça, e então, se deslocando por comando numérico computadorizado, imprimir o

“corte” desejado na peça, logo, é utilizada para produzir apenas cavidades passantes, ou também chamadas de cavidades “vazadas”. (GUITRAU, 1997).

Além das duas principais variações do processo, existem outras configurações de operação sendo desenvolvidas por pesquisadores com o intuito de otimizar e tornar o processo mais eficiente ou solucionar desafios intrínsecos em cada aplicação. Os estudos se concentram em processos híbridos de usinagem associando a eletroerosão à usinagem de alta velocidade, retificação, usinagem à laser e usinagem ultrassônica (HO e NEWMAN, 2003).

## 2.2 O FENÔMENO FÍSICO DA ELETROEROSÃO

Weingaertner (199-?, p. 2) descreve a remoção de material no processo de usinagem por eletroerosão como “remoção térmica por descarga elétrica gasosa”. O fenômeno ocorre com a transmissão de corrente entre o eletrodo peça e eletrodo ferramenta, sendo que tal descarga elétrica pode ocorrer na forma de arco (descarga elétrica estacionária) ou de faísca (descarga elétrica não estacionária) (WEINGAERTNER, 199-?). A descarga elétrica utilizada nesse trabalho é a em forma de faísca.

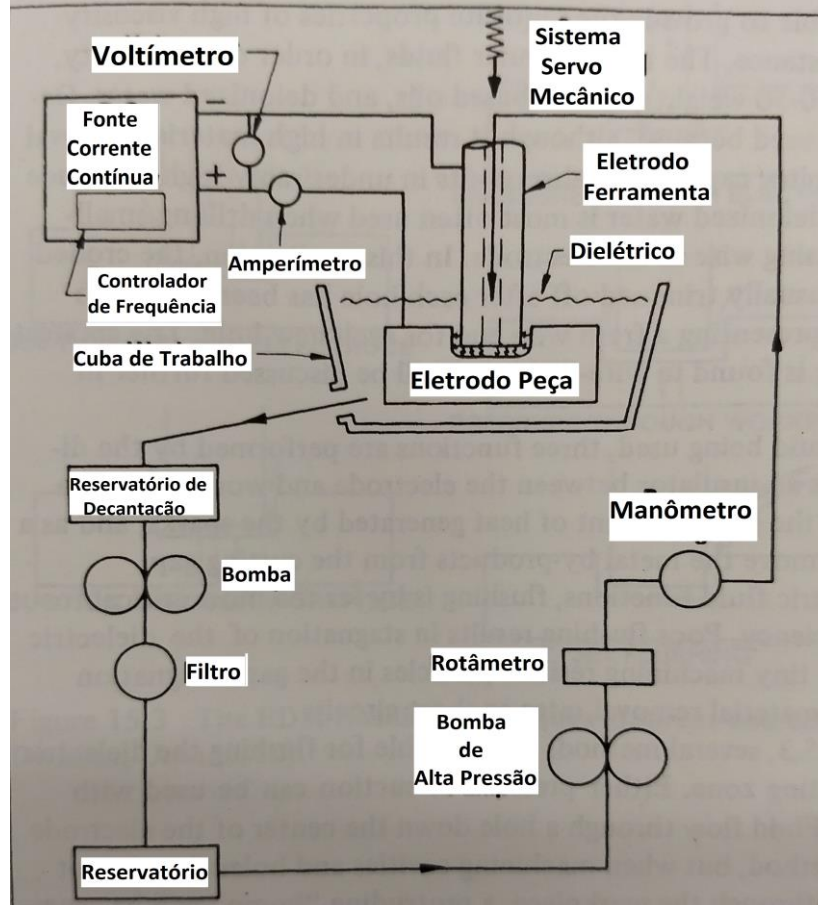
As duas peças de material eletro-condutor envolvidas no processo devem estar carregadas eletricamente, e aproximadas de forma gradual até atingir uma distância mínima, também chamada de “*gap*”, entre as superfícies, suficientemente pequena para romper a resistência elétrica existente entre os eletrodos e ocorrer a ignição da faísca. O *gap* na maioria dos casos é imerso em um fluido dielétrico (normalmente chamado apenas de “dielétrico”) que possui função isolante, e conseqüentemente aumenta a tensão de descarga entre os eletrodos (BENEDICT, 1987; GUITRAU, 1997; WEINGAERTNER, 199-?). O dielétrico pode ser querosene, um óleo de base parafínica ou água deionizada (para a eletroerosão a fio) (GUITRAU, 1997).

Os principais elementos que compõem uma máquina de usinagem por eletroerosão de topo são basicamente: uma fonte de corrente de corrente contínua, o eletrodo ferramenta, o eletrodo peça, o dielétrico, um sistema servo mecânico controlado por comando numérico, onde o eletrodo ferramenta é fixado, uma cuba para imersão onde o eletrodo peça é fixado, um reservatório de armazenamento do



dielétrico, uma bomba hidráulica, sistemas de limpeza de dielétrico, como filtros e decantadores de partículas sólidas e, por fim, instrumentos de controle como amperímetros, voltmíetros, manômetros, rotômetros e sensores de nível. A Figura 1 (BENEDICT, 1987) ilustra, de forma esquemática, o funcionamento do equipamento de usinagem por eletroerosão de profundidade.

Figura 1 – Componentes de um sistema de usinagem por eletroerosão



Fonte: Traduzido de BENEDICT, 1987 – “Nontraditional Manufacturing Processes”.

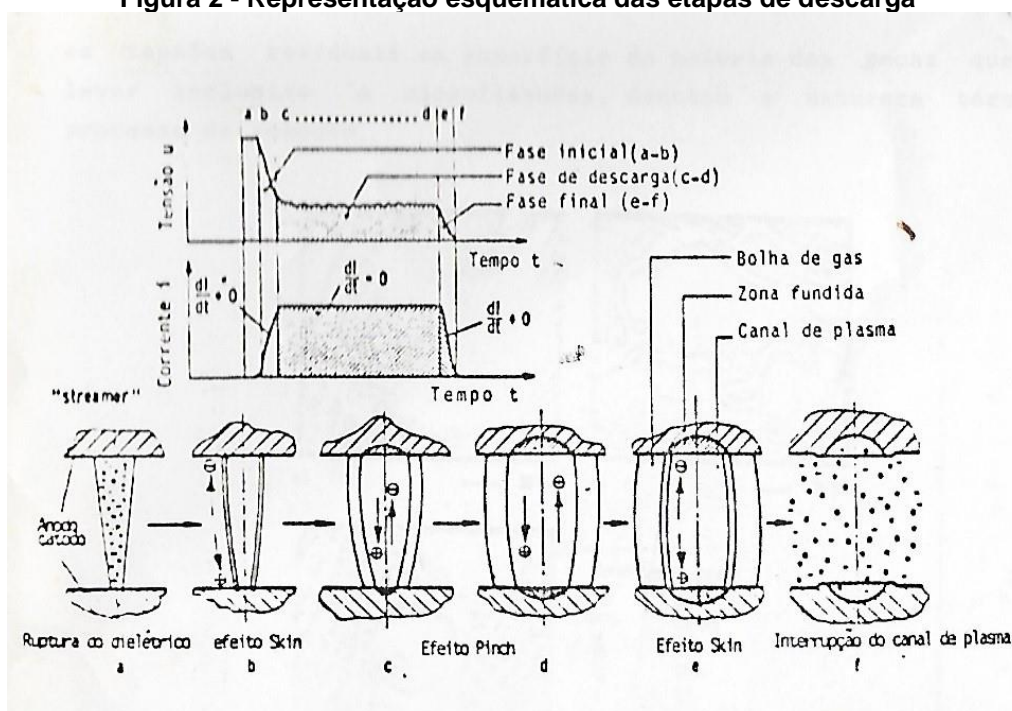
A fonte de alimentação é conectada no eletrodo ferramenta e na peça a ser usinada com a polaridade desejada (seja eletrodo positivo ou negativo). A bomba hidráulica succiona o dielétrico, armazenado no reservatório, transportando-o através do sistema de limpeza até a cuba de imersão, fazendo com que peça e eletrodo estejam completamente submersos. O sistema servo mecânico aproxima o eletrodo da peça até atingir o *gap* e, finalmente a primeira descarga ocorrer, iniciando o processo (BENEDICT, 1987 p. 210-212).

Apesar de o tempo de disparo de uma faísca ser extremamente reduzido o fenômeno é dividido por etapas desde o atingimento do *gap* até a geração do cavaco (GUITRAU, 1997; WEINGAERTNER, 199-?; BENEICT, 1987). Segundo Amorim (2002) citado por Santos (2010) estas etapas são divididas em:

1. Fase de ignição da faísca;
2. Formação do canal de plasma;
3. Fusão e evaporação de parcelas do material da peça e eletrodo;
4. Ejeção do material fundido.

A Figura 2 ilustra as etapas do fenômeno.

**Figura 2 - Representação esquemática das etapas de descarga**



Fonte: WEINGAERTNER, 199-? – “. Tecnologia de fabricação”.

A fase de ignição da faísca ocorre pelo mecanismo de ruptura do dielétrico após ser atingido a distância do *gap* pela ação do fenômeno de a ionização por impacto. Devido ao aumento do campo elétrico, os elétrons liberados do cátodo aceleram-se e colidem com moléculas do dielétrico, o que acaba por liberar mais elétrons que serão acelerados pelo campo em uma reação em cadeia (SANTOS, 2010; WEINGAERTNER, 199-?).

O fluxo intenso de elétrons causado pela ionização por impacto aquece as moléculas do dielétrico presentes no *gap* por efeito *joule*. As moléculas, por sua vez, vaporizam-se diminuindo a resistência do dielétrico, favorecendo o aumento de

corrente e a diminuição da tensão. Desse modo, ocorre a formação do canal de plasma (SANTOS, 2010; GUITRAU, 1997). Essa etapa é chamada de efeito *skin* devido à concentração dos elétrons na superfície cilíndrica do canal de descarga (WEINGAERTNER, 199-?).

Após a formação do canal de plasma, a passagem de elétrons concentra-se no interior canal, formando o chamado efeito *pinch*. A concentração de energia elétrica que já era elevada, devido ao efeito *pinch*, aumenta ainda mais, o que favorece a formação da faísca, e acaba por vaporizar todas as moléculas que estiverem em contato. Sejam elas do eletrodo da peça ou do dielétrico, atingindo temperaturas entre 8000°C e 12000°C (BENEDICT, 1987; SANTOS, 2010; GUITRAU).

Com a evaporação das moléculas e o crescimento da temperatura, forma-se uma bolha de gases que cresce rapidamente de volume, dispersando a energia do canal para a superfície, formando novamente o efeito “*skin*”. Nesta etapa, o fornecimento de energia elétrica é interrompido e, conseqüentemente, os valores de corrente e tensão caem a zero. Instantaneamente, a bolha de gases entra em colapso, expulsando as partículas do seu interior para fora. Essas, por sua vez entram em contato com o dielétrico da vizinhança que não estava aquecido, e rapidamente solidificam-se, tornando-se micropartículas de cavaco (BENEDICT, 1987; WEINGAERTNER, 199-?; SANTOS, 2010).

Após o colapso da bolha, na região onde antes havia se formado o canal de plasma, restam crateras uniformes nas superfícies da peça e do eletrodo. Para minimizar o desgaste do eletrodo devem ser considerados os efeitos da polaridade da peça e da ferramenta (BENEDICT, 1987). A relação entre os efeitos da polaridade e o desgaste do eletrodo será abordada nas seções seguintes.

Após a formação de cavaco, o eletrodo aproxima-se novamente da superfície da peça, até que a menor distância entre ambos seja alcançada (*gap*) e, por sua vez, o ciclo seja reestabelecido (BENEDICT, 1987). É válido ressaltar que a sequência de disparo da faísca aqui descrita acontece em um tempo de 10 a 100  $\mu$ s e a quantidade de material retirado é de  $10^{-6}$  a  $10^{-4}$  mm<sup>3</sup> (HO e NEWMAN, 2003).

## 2.3 PARÂMETROS INFLUENTES

Nesta seção serão citados alguns parâmetros do processo de eletroerosão que devem ser considerados a fim de se obter os resultados esperados a depender da aplicação. Tais parâmetros são: a polaridade do eletrodo ferramenta, o material da peça, o material do eletrodo, tipo de dielétrico, condição de limpeza, corrente utilizada, frequência, tempo de onda ligada ( $T_{ON}$ ), tempo de onda desligada ( $T_{OFF}$ ), *Duty cycle* e a retração do eletrodo.

### 2.3.1 Polaridade do Eletrodo

A polaridade do eletrodo influencia no acabamento superficial, no desgaste do eletrodo, na taxa de remoção e na estabilidade do processo. Nos casos de execução com eletrodo metálico utiliza-se a polaridade positiva com o objetivo de reduzir o desgaste do mesmo, ainda que essa configuração implique em menores taxas de remoção. Visto que na eletroerosão de penetração o formato do eletrodo pode ser um complicador do processo, a depender da complexidade superficial e da tecnologia disponível para fabricá-lo (GUITRAU, 1997).

Polaridades negativas são empregadas em duas situações excepcionais: na usinagem de materiais especiais como titânio, carbetos e metais refratários utilizando-se eletrodos metálicos, e na usinagem com eletrodos de grafite. No primeiro caso, a polaridade negativa reduz a taxa de remoção, entretanto é obrigatoriamente utilizada devido a nenhum outro método obter êxito. Na segunda situação, escolhe-se o eletrodo catódico para aumentar drasticamente a velocidade do processo (estima-se aumentos de 50% ou mais), apesar de acabar aumentando também o desgaste do eletrodo, estimado entre 30% a 40% a mais do que em execuções com polaridade positiva (GUITRAU, 1997).

### 2.3.2A Influência do Dielétrico e a Condição de Limpeza

O dielétrico é o fluido cuja função principal, no processo de usinagem por eletroerosão, é aumentar a resistência elétrica entre a peça a ser usinada e o

eletrodo ferramenta (BENEDICT, 1987). Logo, conclui-se que o dielétrico deve ter propriedades isolantes.

Os materiais mais utilizados para a execução do processo são o querosene, óleos hidrocarbonetos e óleos à base de silício para a eletroerosão de penetração e água deionizada para eletroerosão a fio (GUITRAU, 1997; BENEDICT, 1987). A água deionizada possui quatro vantagens sobre os óleos dielétricos convencionais: baixa viscosidade, alta taxa de resfriamento, alta taxa de remoção de material e nenhum risco de incêndio. Entretanto, seu uso é limitado devido à uma particularidade em relação aos demais materiais. A água deionizada aumenta consideravelmente o desgaste do eletrodo, o que justifica sua utilização no processo de eletroerosão a fio, onde essa particularidade não configura uma preocupação determinante na execução da usinagem (BENEDICT; 1987).

Além de oferecer resistência elétrica durante a eletroerosão, o fluido dielétrico possui outras duas importantes atribuições: dissipar a pontual geração de calor ocasionada pela faísca e limpar o pequeno canal entre a peça e o eletrodo, arrastando para longe as micropartículas de cavaco produzidas pela remoção. Essa última função citada caracteriza-se a atribuição de maior criticidade para o dielétrico. Pois se não executada de forma efetiva, as partículas se acumulam no *gap* podendo causar baixas taxas de remoção ou ainda curtos circuitos (BENEDICT, 1987).

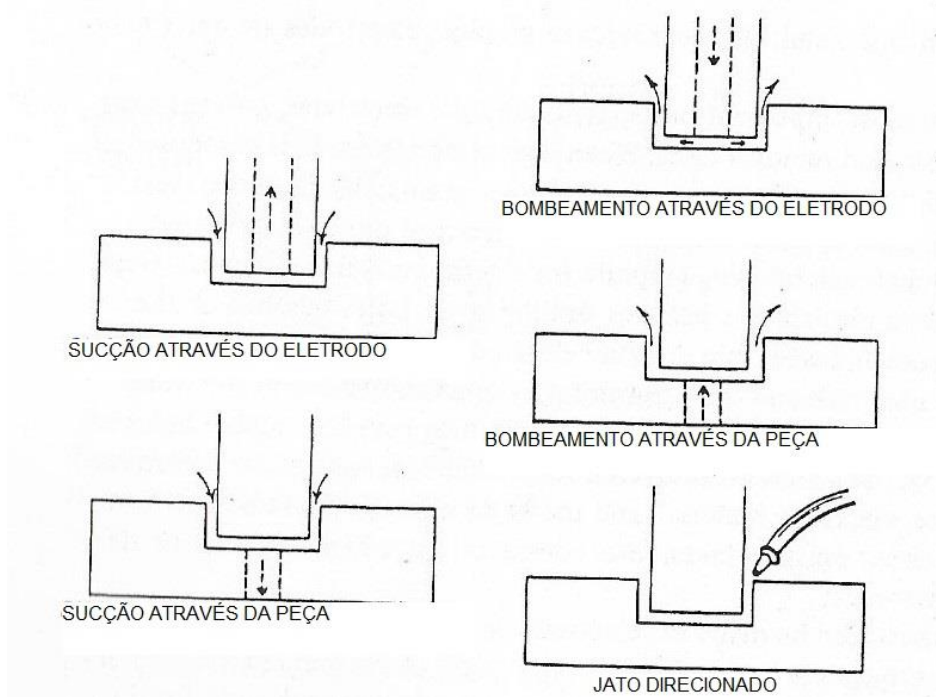
Relacionada à função de limpar o *gap*, atribuída ao dielétrico, outro parâmetro do processo deve ser considerado. Este é a condição de limpeza. Segundo Santos (2010, p. 29):

As condições de limpeza influenciam profundamente o processo. Porém, a quantidade de possibilidades geométricas tanto de disposição dos bicos de limpeza e da cavidade executada, pressão e vazão utilizadas e as possibilidades de utilização de limpeza interna ao eletrodo fazem com que o estudo das condições ideais seja tanto de difícil solução e controle, como muito específica a cada caso.

Conforme ilustrado na Figura 3, existem diversos métodos para arrastar os produtos do processo ao longo da fenda de trabalho. Esses métodos diferenciam-se entre si no que tange ao canal utilizado, podendo ser através do eletrodo, da peça ou de um bocal externo, e à forma de transporte podendo ser bombeado, succionado ou ainda esguichado. Entretanto, a utilização do jato direcionado pelo

bocal deve ser evitada, devido à baixa efetividade de arraste quando comparado às outras opções (BENEDICT, 1987).

**Figura 3 - Métodos de transporte de dielétrico**



Fonte: Traduzido de BENEDICT, 1987 – “Nontraditional Manufacturing Processes”

### 2.3.3 Retração do Eletrodo

A retração do eletrodo é um parâmetro da usinagem desconsiderado pela maioria dos autores. Amorim e Weingaertner (2007) citam a retração como o tempo em que o eletrodo retrocede, portanto, não disparando faíscas. O escasso material encontrado na bibliografia, referente ao parâmetro em questão, afirma que a sua utilização favorece a limpeza da fenda de trabalho, permitindo um fluxo maior do óleo dielétrico e, dessa forma, arrastando as micropartículas de cavaco para fora do gap (WEINGAERTNER, 199-?). Entretanto, não se sabe ainda a que ponto o seu emprego interfere no processo de maneira a aumentar a taxa de remoção. Pois se utilizado, empenha-se um adicional de tempo sem executar efetivamente a usinagem, por outro lado, a sua não utilização pode resultar na aglomeração dos resíduos da usinagem no *gap*, diminuindo a eficiência do processo e, por consequência, a taxa de remoção.

### 2.3.4 Tempos de Onda Ligada ( $T_{ON}$ ) e Desligada ( $T_{OFF}$ ) e o *Duty Cycle*

Como visto anteriormente na seção 2.2 o ciclo de disparo de uma faísca é composto por eventos onde hora utiliza-se de eletricidade e hora não. Logo, o processo é conduzido com pulsos de energia controlados pelo sistema de comando do equipamento. Relacionado à tais pulsos de energia o tempo de onda ligado, (ou também chamado de  $T_{ON}$ ) é a parcela do ciclo de disparo da faísca onde existe eletricidade sendo utilizada, portanto, está relacionado com o tempo efetivo de remoção de material. De forma contrária, o tempo de onda desligada (ou também chamado de  $T_{OFF}$ ) é a parcela do ciclo onde não existe eletricidade sendo utilizada (GUITRAU, 1997). Esses parâmetros são selecionados na máquina de usinagem de eletroerosão de acordo com as particularidades da execução em questão.

Os tempos de onda ligada e desligada são utilizados para medir a eficiência do processo, a partir de um indicador, chamado *Duty Cycle* (do inglês "ocupação do ciclo"). O *Duty Cycle* é descrito pela Equação (1) (GUITRAU, 1997):

$$Duty\ Cycle = \left( \frac{T_{ON}}{T_{OFF} + T_{ON}} \right) * 100 \quad (1)$$

Analisando a Equação 1 pode-se concluir que o *Duty Cycle* é nada mais que a porcentagem do tempo de onda ligada em relação ao tempo total do ciclo.

Como estratégia para aumentar o *Duty Cycle* é desejável que se reduza o quanto possível o tempo de onda desligada. Contudo, devido a algumas variáveis do processo como condição de limpeza, materiais do eletrodo e da peça e o tipo do dielétrico, podem afetar a estabilidade da corrente (GUITRAU, 1997)

#### 2.3.4.1 Tempo de onda ligada ( $T_{ON}$ )

O tempo de onda ligada está relacionado diretamente com a taxa de remoção. Portanto, quanto maior  $T_{ON}$ , maior a taxa de remoção. Pois, como já explanado anteriormente, é durante essa parcela do ciclo que ocorre a remoção do efetiva do material (BENEDICT, 1987).

O acabamento de superfície também é afetado por  $T_{ON}$ . Pois, logicamente, aumentando-se o tempo efetivo de remoção de material, aumenta-se a cratera

deixada na superfície da peça, que, por consequência aumenta a rugosidade (BENEDICT,1987).

Por último, outro efeito do tempo de onda ligada é o desgaste do eletrodo. Para operações com a ferramenta carregada positivamente a faísca sai do eletrodo e atinge a peça, causando maior dano na peça. Porém, durante certas operações de desbaste usando longos tempos de onda ligada, ocorre um fenômeno chamado “*plating*”, onde, ao sair do eletrodo, a faísca leva consigo uma microscópica partícula de material, causando o desgaste do eletrodo (GUITRAU, 1997).

#### 2.3.4.2 Tempo de onda desligada ( $T_{OFF}$ )

O tempo de onda desligada, assim como  $T_{ON}$ , influencia em alguns resultados da usinagem. Tais resultados são: a velocidade de usinagem, associada à taxa de remoção e a estabilidade do processo.

Como a remoção de material ocorre pela ação da faísca, e esta, se desenvolve apenas durante o  $T_{ON}$ , o  $T_{OFF}$  causa uma diminuição da taxa de remoção, que, por sua vez, implica no aumento do tempo da operação. (WEINGAERTNER, 199-?).

Apesar de ser um incremento de tempo gasto sem se usar efetivamente a superfície, o  $T_{OFF}$  é essencial para que o canal de descarga seja deionizado. A deionização permite que a fenda de trabalho permaneça com baixa condutividade elétrica. Para valores muito baixos de  $T_{OFF}$ , a quantidade de impurezas no *gap* aumenta, o que, por consequência, aumenta a sua condutividade, tornando o processo instável, com ciclos irregulares (WEINGAERTNER, 199-?).

#### 2.3.5 A Corrente

Segundo Guitrau (1997) a corrente é a quantidade de energia útil no processo medida em amperes. De acordo com Weingaertner (199-?) o aumento da corrente de descarga implica no aumento da taxa de remoção, entretanto, por consequência, aumenta também o desgaste da ferramenta.

Santos (2010) atribui ainda à corrente a característica de influenciar no acabamento superficial da peça “para maiores níveis de corrente utilizada, maior a



taxa de remoção e piora da qualidade superficial e subsuperficial”. Tal relação ocorre porque conforme os valores de corrente crescem, cada faísca remove mais material da superfície da peça. Por consequência disso, a cratera deixada por cada faísca, se torna maior e mais larga, podendo até omitir pequenos detalhes da superfície do eletrodo (GUITRAU, 1997). A informação da corrente a ser utilizada na execução da usinagem é fornecida para a interface da máquina na forma de um outro parâmetro, conhecido por  $T_s$ , que indica a quantidade de transistores ativos fornecendo corrente para o processo. O valor da corrente transmitida por cada transistor é igual a 3A.

### 2.3.6 A Frequência

A frequência não é nada mais que o número de vezes em que o pulso de corrente se alterna entre ligada e desligada. Para operações de desbaste deve-se usar baixos valores de frequência, ou seja, deve-se executar poucos ciclos de descarga por segundo, fazendo com que cada ciclo retire mais material da peça, estendendo-se  $T_{ON}$ , portanto. De forma contrária, para operações de acabamento deve-se utilizar altos valores de frequência, para que sejam executados muitos ciclos de descarga por segundo, e dessa forma, cada faísca retire menos material da peça, imprimindo na superfície cavidades pequenas (BENEDICT, 1987)

### 2.3.7 O Material do Eletrodo Ferramenta

Para ser utilizado na fabricação de um eletrodo para EDM, o material deve ser obrigatoriamente condutor elétrico (SANTOS, 2010). Entretanto algumas outras características do material são analisadas para facilitar a execução da usinagem, estas são: ter alto ponto de fusão, disponibilidade, ter boa usinabilidade, apresentar baixo desgaste e executar bons acabamentos superficiais na peça (SANTOS, 2010; BENEDICT, 1987).

Guitrau (1997) cita o cobre e o grafite como os dois materiais mais populares na fabricação de eletrodos para EDM. Para elucidar uma melhor comparação entre os citados materiais, a Tabela 1 evidencia algumas propriedades a serem consideradas na seleção.

**Tabela 1 - algumas propriedades físicas do cobre eletrolítico e do grafite**

<b>Propriedades Físicas</b>	<b>Grafite</b>	<b>Cobre</b>
Resistividade Elétrica ( $\mu\Omega/\text{cm}$ )	0,12	1,96
Condutividade Elétrica comparado com Prata (%)	0,11	92
Condutividade Térmica (W/mK)	160	380,7
Ponto de Sublimação e Fusão ( $^{\circ}\text{C}$ )	3500	1083
Calor Específico (cal/g $^{\circ}\text{C}$ )	0,17-0,2	0,092
Peso Específico a 20 $^{\circ}\text{C}$ (g/cm $^3$ )	1,75	8,9
Coefficiente de Expansão Térmica ( $\cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	7,8	6,6

**Fonte: SANTOS (2010) – “Análise dos parâmetros de entrada na eletroerosão de penetração da liga de titânio TI-6AL-4V”**

O valor comercial do quilograma do grafite é expressivamente maior que o do cobre eletrolítico (Santos, 2010). Entretanto, analisando a Tabela 1 observa-se que o peso específico do grafite é expressivamente menor que o do cobre, o que acaba em média equivalendo seus custos.

Analisando uma vez mais a Tabela 1 pode-se concluir que o grafite possui maior ponto de sublimação e fusão comparado ao cobre, característica que compete ao grafite maior resistência ao dano causado na eletroerosão, muito embora, o cobre tenha maior condutividade térmica (SANTOS, 2010). Em compensação, o grafite possui demasiada fragilidade em relação ao cobre, o que pode inviabilizar sua utilização, a depender da operação a ser executada, como pequenos furos (BENEDICT, 1987).

### 2.3.8 O Material da Peça

A influência do material da peça no processo está relacionada à sua erodibilidade (termo utilizado por Weingaertner (199-?) para se referir à capacidade de um material de ser erodido por EDM). Tal característica não depende das propriedades mecânicas do material, mas sim, da sua composição química e algumas propriedades físicas e térmicas, como temperatura de ebulição, calor específico e a condutividade térmica (WEINGAERTNER, 199-?).

## 2.4 O AÇO SAE 1045

O Aço ABNT 1045 pertence à classe dos aços-carbono segundo a norma ABNT NM 87 (2000, p.4). Sua composição química admite as faixas de concentração dos elementos descritos na Tabela 2 (ABNT, 2000)

**Tabela 2 - Composição química do Aço ABNT 1045**

Elemento	Concentração (%)
Carbono (C)	0,43 – 0,50
Manganês (Mn)	0,60 – 0,90
Fósforo (P)	≤ 0,040
Enxofre (S)	≤ 0,050

**Fonte: ABNT NBR NM 87 (2000) – “Aços carbono e ligados para construção mecânica – designação e composição química”**

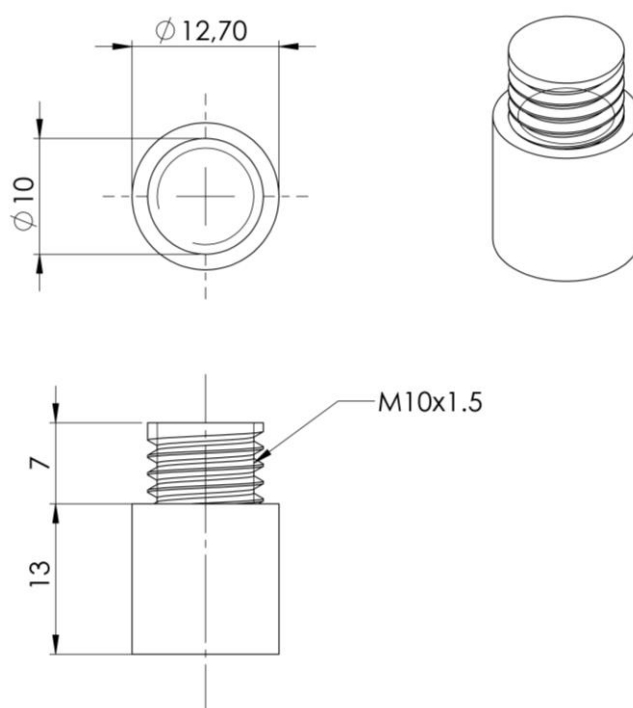
Souza (1989, p.14), atribui aos aços carbono com concentração de carbono entre 0,30 e 0,50% o termo “aço meio duro” e, ainda, as características de serem geralmente temperados e revenidos para peças estruturais de alta sollicitação mecânica.

Segundo Coutinho (1992, p.323) “os aços de médio teor de carbono, usados em peças forjadas, carcaças de caldeiras e ferramentas agrícolas, contém até cerca de 0,5%C, o que os torna capazes de uma resposta satisfatória a tratamento térmico para aumento de resistência mecânica”.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

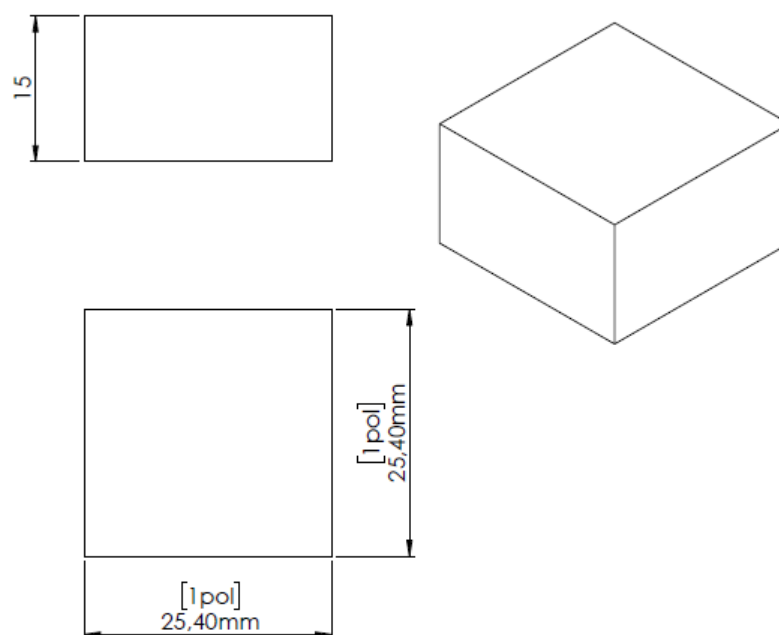
Para obter os dados utilizados na posterior análise de resultados fez-se necessário a realização de ensaios experimentais. Para tal, foram confeccionados 21 eletrodos de cobre eletrolítico, de seção transversal cilíndrica com diâmetro igual a 0,5" (12,7mm), e comprimento igual a 20 mm, contendo um comprimento roscado de 7 mm M10X1,5 mm, conforme ilustrado na Figura 4. O material utilizado para a confecção dos eletrodos foi o cobre eletrolítico.

Figura 4 - Dimensões do eletrodo



Fonte: Autoria própria

Além dos eletrodos foram confeccionados 21 corpos de prova, de aço ABNT 1045, de seção transversal quadrada com lado igual a 25,4 mm, e espessura igual 15 mm, conforme ilustrado na Figura 5. Os corpos de prova foram produzidos no próprio laboratório de usinagem da UTFPR campus Ponta Grossa.

**Figura 5 - Dimensões do corpo de prova**

**Fonte: Autoria própria**

### 3.1 INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS

Os instrumentos e equipamentos utilizados foram:

- Máquina de usinagem por eletroerosão marca ENGEMAQ Máquinas, modelo NC40A
- Balança analítica de precisão, modelo 2204B, marca Even, com incremento de escala 0,0001 g e capacidade máxima de 220 g.
- Cronômetro Windows 10 Professional.
- Paquímetro Mitutoyo, com incremento de escala de 0,05 mm.

### 3.2 PARÂMETROS

Para analisar a variação da taxa de remoção em relação unicamente à retração do eletrodo deve-se executar os procedimentos experimentais variando os valores de retração na máquina, enquanto mantem-se fixos todos os demais.

Os parâmetros que irão manter-se fixos durante a execução do procedimento, cujas condições estão apresentadas na Tabela 3, são os seguintes: polaridade, corrente,  $T_{ON}$ , *Duty Cycle*, profundidade de usinagem e a condição de limpeza em cada ensaio. Os parâmetros foram selecionados, primeiramente buscando um alto valor de  $T_{ON}$ , e os demais parâmetros,  $T_S$  e *Duty Cycle*, compatíveis com o valor de  $T_{ON}$  escolhido, de acordo com a tabela de parâmetros fornecida pelo fabricante da máquina, disponível para consulta no Apêndice A, sem preocupações a respeito da rugosidade final da cavidade erodida.

O jato dielétrico foi mantido desligado durante a usinagem, em consideração à relação direta entre a retração da ferramenta e a condição de limpeza no *gap*, pretendendo, assim, analisar o comportamento da taxa de remoção em função da retração da ferramenta sem quaisquer interferências nos resultados.

**Tabela 3 - Parâmetros constantes do procedimento**

Parâmetro	Valor
Polaridade	Positiva
Corrente (A)	21
$T_{ON}$	200 $\mu$ s
<i>Duty Cycle</i>	92%
Profundidade	5 mm
Condição de limpeza	Jato dielétrico desligado

**Fonte: A autoria própria**

A retração do eletrodo é definida, no equipamento, por três parâmetros. Primeiramente o operador deve informar o intervalo de tempo (T), em segundos, desejado entre uma retração e outra. Este é o tempo usinando entre retrações. Outro parâmetro é valor da retração (h), fornecido em milímetros. Relacionado ao primeiro, informa quanto a ferramenta deve recuar em cada retração. Por fim, deve-se selecionar, caso necessário, a série de retrações que o eletrodo irá executar antes da saída completa da cavidade (x).

Ilustrando a seleção dos parâmetros de retração, considere o exemplo: para uma determinada operação os valores selecionados para a retração são  $T = 0,5$  s,  $h = 1$  mm e  $x = 5$ . O eletrodo irá recuar 1 mm a cada 0,5 segundo e recuará completamente da cavidade usinada à cada 5 retrações.

Para este trabalho foram analisadas as variações de retração medida em unidade de comprimento e em unidade de tempo, executando-se três ensaios para cada combinação de parâmetros, sendo uma dessas combinações a usinagem sem

qualquer valor de retração. Os valores pretendidos para os tempos entre retrações são: 0,0; 0,5 e 1,0s. Já, os valores pretendidos para a retração medida em milímetros são: 0,0; 0,3; 0,5 e 1,0mm.

A Tabela 4 informa a quantidade de ensaios para cada combinação de parâmetros.

**Tabela 4 - Quantidade de ensaios para cada combinação de parâmetros**

Retração (mm)	Tempo Entre Retrações (s)		
	0,0	0,5	1,0
0,0	3	-	-
0,3	-	3	3
0,5	-	3	3
1,0	-	3	3

Fonte: Autoria própria

Conforme apresentado na Tabela 4, foram executados um total de 21 ensaios, divididos em 7 combinações de parâmetros, sendo uma delas a usinagem sem retração do eletrodo.

### 3.3 ORDEM DE EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Para evitar que os três ensaios de uma mesma combinação de parâmetros fossem executados no mesmo dia, e assim influenciados por fatores temporais, a sequência dos experimentos foi sorteada com a ajuda do software Sorteio® disponível para download em <https://sourceforge.net/projects/sorteio/>,

Por fim, a sequência dos experimentos se deu de acordo como apresentado na Tabela 5, conforme indicado na primeira coluna, relativa aos grupos de parâmetros. Na segunda coluna, “h” refere-se à retração do eletrodo medida em milímetros e “T” é o tempo usinando entre retrações, medido em segundos.

**Tabela 5 - Sequência de execução dos ensaios**

(Continua)

Nº do Ensaio	Parâmetros
1	h = 1,0mm e T = 1,0s
2	h = 0,3mm e T = 0,5s
3	h = 0,5mm e T = 0,5s

Tabela 5 - Sequência de execução dos ensaios

Nº do Ensaio	Parâmetros	(Conclusão)
4	h = 1,0mm e T = 0,5s	
5	h = 0,3mm e T = 1,0s	
6	h = 0,5mm e T = 1,0s	
7	h = 0,3mm e T = 0,5s	
8	h = 0,5mm e T = 1,0s	
9	h = 0,3mm e T = 0,5s	
10	h = 0,0mm e T = 0,0s	
11	h = 0,5mm e T = 0,5s	
12	h = 1,0mm e T = 1,0s	
13	h = 0,0mm e T = 0,0s	
14	h = 1,0mm e T = 1,0s	
15	h = 0,5mm e T = 1,0s	
16	h = 1,0mm e T = 0,5s	
17	h = 0,5mm e T = 0,5s	
18	h = 1,0mm e T = 0,5s	
19	h = 0,3mm e T = 1,0s	
20	h = 0,3mm e T = 1,0s	
21	h = 0,0mm e T = 0,0s	

Fonte: Autoria própria

### 3.4 MEDIÇÕES DAS MASSAS INICIAIS E FINAIS

As massas dos corpos de prova foram medidas antes e depois de erodidas seguindo o mesmo procedimento. Utilizando-se de uma balança analítica de precisão modelo 2204B, marca Even, com incremento de escala de 0,0001g e capacidade máxima de 220g, pertencente ao laboratório de fermentação do departamento de alimentos da UTFPR campus Ponta Grossa.

Devido à balança analítica ser um instrumento altamente sensível a choques mecânicos utilizou-se uma folha de papel toalha como calço entre a peça medida e a superfície do prato de pesagem, conforme apresentado na Fotografia , evitando, assim, que as duas superfícies entrassem em contato de maneira abrupta.

O procedimento utilizado para as medições de massa foi realizado conforme a seguinte sequência de passos:

- Inserção do papel toalha na câmara de medição sobre o prato de pesagem;
- Espera até o sinal de estabilização no visor da balança;



- Zeragem do visor;
- Retirada da etiqueta de identificação da amostra (apenas para as medições de massa final);
- Limpeza da amostra com algodão umedecido com álcool;
- Inserção da amostra na câmara de medição sobre o calço de papel;
- Espera do sinal de estabilização no visor da balança;
- Anotação do valor medido;
- Retirada da amostra da câmara de medição;
- Etiquetagem da amostra mantendo-se o mesmo número de identificação;
- Acondicionamento da amostra em uma caixa plástica.

**Fotografia 1 - Medição de massa utilizando balança analítica com calço de papel para não danificar o sistema de pesagem**



**Fonte: Autoria própria**

O procedimento descrito acima foi executado para as massas finais e iniciais das amostras, diferenciando-se apenas na etapa de etiquetagem conforme indicado, já que para as medições de massa inicial as amostras ainda não estavam etiquetadas. Os resultados das medições das massas iniciais e finais encontram-se disponíveis na Tabela 6 contida na seção de resultados.

### 3.5 FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS

Os corpos de prova foram fixados com a utilização de uma morsa. Já para a fixação do eletrodo no cabeçote de erosão utilizou-se unicamente a união por rosca M10 contida no próprio eletrodo (rosca externa) e na ponteira do cabeçote (rosca interna) conforme ilustrado na Fotografia 2 a fixação do conjunto.

**Fotografia 2 – Fixação do corpo de prova e do eletrodo**



Fonte: Autoria própria

### 3.6 SEQUÊNCIA DOS ENSAIOS

Após a definição dos parâmetros e da ordem cronológica de realização dos ensaios, o trabalho se deu sempre seguindo a sequência dos passos apresentada:

- Retirada da etiqueta de identificação do corpo de prova;
- Limpeza do corpo de prova para eliminar resíduos de cola oriundos da fita adesiva;
- Fixação do corpo de prova na morsa;
- Fixação do eletrodo no cabeçote da máquina;
- Alinhamento entre centros do eletrodo e corpo de prova;
- Inserção dos parâmetros de usinagem referentes ao ensaio;
- Zeragem dos indicadores de tempo de usinagem da máquina;

- Enchimento da cuba;
  - Início da usinagem e da cronometragem.
  - Término da usinagem e da cronometragem.
  - Esvaziamento da cuba;
  - Retirada de eletrodo e corpo de prova;
  - Limpeza do eletrodo e do corpo de prova com papel toalha;
  - Etiquetagem do eletrodo e do corpo de prova mantendo-se o número de identificação correspondente ao número do ensaio;
  - Acondicionamento de eletrodos e corpos de prova em caixas plásticas.
- Os valores de tempo obtidos em cada ensaio estão disponíveis na Tabela 6 contida na seção de resultados.

### 3.7 CÁLCULO DA TAXA DE REMOÇÃO

A taxa de remoção de material é obtida pela Equação 2:

$$V_w = \frac{V}{t} \quad (2)$$

Onde:

- $V_w$  = Taxa de remoção ( $\text{mm}^3/\text{min}$ );
- $V$  = Volume usinado do material ( $\text{mm}^3$ );
- $t$  = Tempo total da operação (min).

O volume usinado do material, que nada mais é que o volume da cavidade deixada na peça, poderia ser calculado considerando o *gap*, as dimensões do eletrodo e a profundidade da usinagem. Entretanto, para a obtenção de valores mais precisos, escolheu-se o método de determinação do volume usinado pela medição da massa do material removido da peça, dividida pela densidade do aço ABNT 1045, conforme descrito na Equação 3.

$$V = \frac{m_r * 10^{-3}}{\rho} \quad (3)$$

Onde:

- $V$  = volume usinado do material ( $\text{mm}^3$ );
- $m_r$  = Massa do material removido (g);
- $\rho$  = Densidade do aço ABNT 1045 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );
- $10^{-3}$  = Fator de conversão  $\text{cm}^3$  para  $\text{mm}^3$ .

A determinação da massa total do material removido em cada experimento é dada pela Equação (4).

$$m_r = m_i - m_f \quad (4)$$

Onde:

- $m_r$  = Massa do material removido (g);
- $m_i$  = Massa inicial do corpo de prova (g).
- $m_f$  = Massa final do corpo de prova (g);

Permitindo-se representar a taxa de remoção ( $V_w$ ), de forma alternativa como apresentado na equação (5)

$$V_w = \frac{(m_i - m_f)10^{-3}}{t * \rho} \quad (5)$$

De acordo com Callister (2002, p. 537) o valor da densidade para o aço e suas ligas é de  $7,85\text{g}/\text{cm}^3$ . Portanto, este foi o dado utilizado para o cálculo da taxa de remoção de material.

O tempo total da operação foi medido para cada ensaio realizado com a utilização do cronômetro do Microsoft Windows 10 Professional®.

### 3.8 TRATAMENTO DOS DADOS

Com os valores obtidos das medições das massas e dos tempos de cada ensaio, e a partir da Equação (5), pôde-se determinar a taxa de remoção de material para cada um dos grupos de parâmetros.

Segundo Spiegel (1993 p. 106 e 107) o intervalo de confiança para uma distribuição amostral de dados é obtido a partir da Equação (6):

$$IC = \bar{X} \pm t_c * \frac{S}{\sqrt{N - 1}} \quad (6)$$

Onde:

- $\bar{X}$  = Média aritmética dos valores de Vw
- $t_c$  = Coeficiente de Student para N-1 graus de liberdade.
- S = Desvio padrão amostral.
- N = Amostragem.

Entretanto, segundo Albertazzi (2002, p. 52) a repetitividade (segundo termo da Equação (6)) não deve ser dividida pela raiz quadrada de “N-1”, devido ao mensurando ser uma grandeza variável e “a indicação referente a um ponto extremo do mensurando provavelmente será medida apenas uma única vez e, conseqüentemente, estará exposta aos níveis de variação associados uma medição” (Albertazzi. 2002). Logo, o intervalo de confiança foi obtido a partir da Equação (7) com um coeficiente t-student para 95% de confiança e N-1 graus de liberdade de 4,30. A tabela utilizada para a obtenção do coeficiente t-student encontra-se disponível no Apêndice B.

$$IC = \bar{X} \pm t_c * S \quad (7)$$

O desvio padrão S amostral foi obtido pela Equação (8) (SPIEGEL, 1993):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}} \quad (8)$$

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das taxas de remoção de material obtidos para cada ensaio, associados aos seus respectivos valores de tempo, massa inicial e massa final encontram-se na Tabela 6.

**Tabela 6 - Valores obtidos das taxas de remoção associados às respectivas medições de massa e cronometragem**

Grupo de Parâmetros	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Tempos de Erosão (min)	Taxa de Remoção (mm <sup>3</sup> /min)
h = 0,0 mm e T = 0,0 s	74,4388	55,9538	31,97	59,766
h = 0,0 mm e T = 0,0 s	73,6560	54,5952	43,13	56,151
h = 0,0 mm e T = 0,0 s	74,0694	55,4131	29,77	55,800
h = 0,3 mm e T = 0,5 s	73,1163	55,0770	20,55	111,541
h = 0,3 mm e T = 0,5 s	73,8997	56,2424	23,75	94,468
h = 0,3 mm e T = 0,5 s	73,9336	55,7356	20,50	112,796
h = 0,3 mm e T = 1,0 s	73,1853	54,9265	30,57	75,901
h = 0,3 mm e T = 1,0 s	73,8759	55,6955	21,50	78,308
h = 0,3 mm e T = 1,0 s	75,3368	56,4322	29,50	75,143
h = 0,5 mm e T = 0,5 s	73,8534	55,3875	29,12	113,625
h = 0,5 mm e T = 0,5 s	73,3427	54,8518	22,63	103,824
h = 0,5 mm e T = 0,5 s	72,3947	54,5903	20,71	110,898
h = 0,5 mm e T = 1,0 s	75,1524	56,2869	32,85	72,972
h = 0,5 mm e T = 1,0 s	74,3424	55,7009	30,28	77,491
h = 0,5 mm e T = 1,0 s	73,9590	55,3099	30,58	77,482
h = 1,0 mm e T = 0,5 s	73,4779	55,2786	21,77	106,238
h = 1,0 mm e T = 0,5 s	74,1860	56,1444	30,57	110,657
h = 1,0 mm e T = 0,5 s	75,5910	57,0410	20,40	109,630
h = 1,0 mm e T = 1,0 s	74,4890	55,9152	34,27	68,873
h = 1,0 mm e T = 1,0 s	73,4107	54,8563	42,48	77,853
h = 1,0 mm e T = 1,0 s	75,4224	56,7581	29,77	79,671

**Fonte: Autoria própria**

Os valores das incertezas obtidas para cada grupo de parâmetros são apresentados na Tabela 7 associados às suas respectivas médias e desvios padrão.

Analisando a Tabela 7 percebe-se altos valores de incerteza, especialmente as associadas aos grupos de parâmetros com  $h = 0,3$  mm,  $T = 0,5$  s e  $h = 1,0$  mm,  $T = 1,0$  s. Tais resultados devem-se às variações de tempo total de usinagem, cujos valores foram obtidos da cronometragem dos experimentos

**Tabela 7 - Quantidades de incerteza associadas à cada grupo de parâmetros e suas respectivas médias e desvios padrão das taxas de remoção**

Ensaio	Taxa de Remoção (mm <sup>3</sup> /min)	Média da Taxa de Remoção (mm <sup>3</sup> /min)	Desvio Padrão	Incerteza (mm <sup>3</sup> /min)
h = 0,0 mm e T = 0,0 s	59,766			
h = 0,0 mm e T = 0,0 s	56,151	57,24	2,195	9,44
h = 0,0 mm e T = 0,0 s	55,800			
h = 0,3 mm e T = 0,5 s	111,541			
h = 0,3 mm e T = 0,5 s	94,468	106,27	10,239	44,03
h = 0,3 mm e T = 0,5 s	112,796			
h = 0,3 mm e T = 1,0 s	75,901			
h = 0,3 mm e T = 1,0 s	78,308	76,45	1,653	7,11
h = 0,3 mm e T = 1,0 s	75,143			
h = 0,5 mm e T = 0,5 s	113,625			
h = 0,5 mm e T = 0,5 s	103,824	109,45	5,059	21,75
h = 0,5 mm e T = 0,5 s	110,898			
h = 0,5 mm e T = 1,0 s	72,972			
h = 0,5 mm e T = 1,0 s	77,491	75,98	2,606	11,208
h = 0,5 mm e T = 1,0 s	77,482			
h = 1,0 mm e T = 0,5 s	106,238			
h = 1,0 mm e T = 0,5 s	110,657	108,84	2,313	9,94
h = 1,0 mm e T = 0,5 s	109,630			
h = 1,0 mm e T = 1,0 s	68,873			
h = 1,0 mm e T = 1,0 s	77,853	75,47	5,781	24,86
h = 1,0 mm e T = 1,0 s	79,671			

**Fonte: Autoria própria**

Os resultados foram analisados em função da variação dos valores de retração e dos tempos entre retrações da ferramenta.

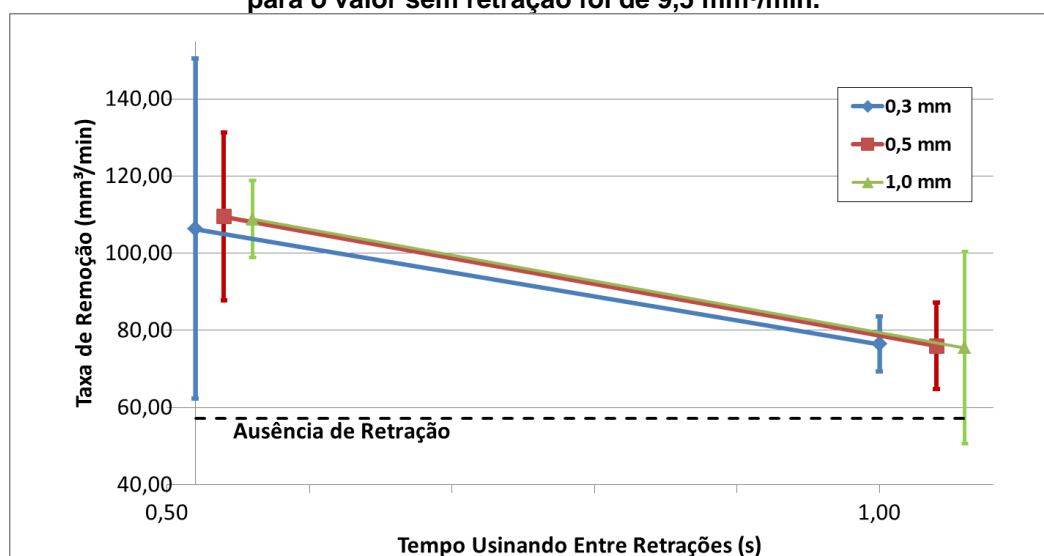
#### 4.1 ANÁLISE DOS DADOS PARA O TEMPO ENTRE RETRAÇÕES DA FERRAMENTA

Para possibilitar a análise da dependência entre taxa de remoção e tempo entre retrações da ferramenta os dados foram organizados em três séries situadas entre 0,5 e 1,0s com 0,3 0,5 e 1,0 mm de retração, conforme ilustrado no Gráfico 1.

À parte das séries de dados foi apresentado o valor obtido da taxa de remoção de material para os experimentos sem utilização de retração da ferramenta.

Analisando o comportamento da taxa de remoção, percebe-se que os menores resultados estão associados aos experimentos executados sem qualquer retração. Observa-se, também um decréscimo de seus valores no intervalo de 0,5 a 1,0s para as três séries de dados, logo as maiores taxas de remoção de material obtidas estão associadas aos valores de 0,5s de tempo usinando entre retrações. A partir de tais análises pode-se afirmar que a taxa de remoção de material diminui com o aumento da retração da ferramenta. Todavia, a ausência de retração no processo prejudica a sua eficiência. Logo, pode-se levantar a hipótese de que os maiores valores da taxa de remoção são obtidos para os menores valores de tempo usinando entre retrações para o intervalo de 0,5 a 1,0 s.

**Gráfico 1 - Comportamento da taxa de remoção em função do tempo usinando entre retrações. A linha tracejada representa o valor obtido para a usinagem sem retração. A incerteza obtida para o valor sem retração foi de 9,5 mm<sup>3</sup>/min.**



Fonte: Autoria própria

Devido a tal proximidade entre os resultados apresentados no Gráfico 1, as linhas representantes de cada série de dados foram sutilmente movimentadas no eixo horizontal para beneficiar a visualização de suas respectivas incertezas.



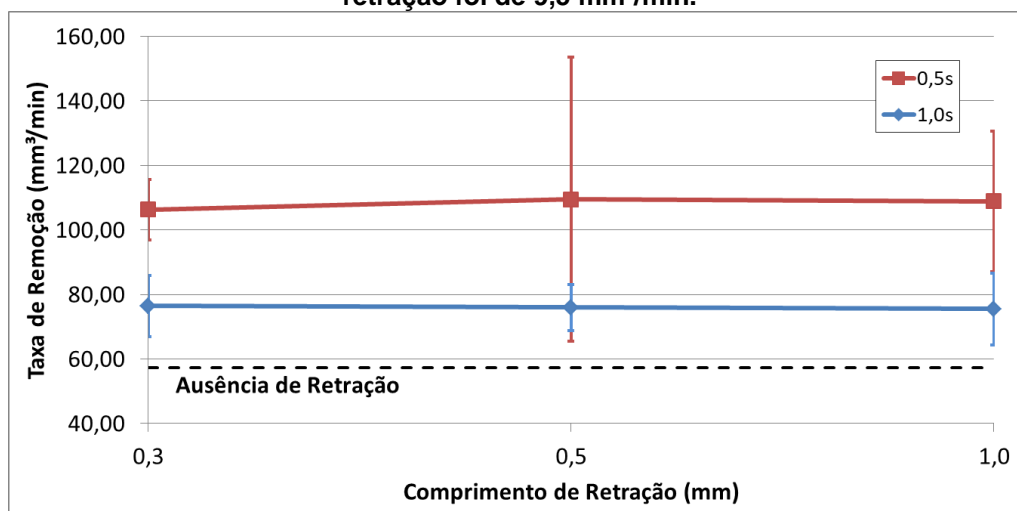
## 4.2 ANÁLISE DOS DADOS PARA A RETRAÇÃO DA FERRAMENTA

Para analisar o comportamento da taxa de remoção em função do valor da retração, os dados foram reorganizados em duas séries de acordo com os tempos entre retrações utilizados (0,5 e 1,0s), conforme mostra a Gráfico 2.

O Gráfico 2 mostra o comportamento da taxa de remoção em função da retração para os dois tempos entre retrações utilizados.

Observando os resultados para ambas as séries, percebe-se que a taxa de remoção apresenta pouca ou quase nenhuma variação para os valores de retração acima de 0,3 mm, permitindo-se concluir que a taxa de remoção mantém-se constante, sem interferência dos valores de retração em seu comportamento, para o intervalo de 0,3 a 1,0 mm.

**Gráfico 2 - Comportamento da taxa de remoção em função da retração. A linha tracejada representa o valor obtido para a usinagem sem retração. A incerteza obtida para o valor sem retração foi de 9,5 mm<sup>3</sup>/min.**



Fonte: Autoria própria

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados evidenciam que a utilização da retração da ferramenta melhora consideravelmente a eficiência do processo. Entretanto, a propriedade estudada apresentou uma relação mais sensível às variações dos do tempo usinando entre retrações do que ao outro parâmetro estudado, o valor de retração.

A relação da taxa de remoção com a retração para os valores ensaiados mantém-se constante a partir de retrações de 0,3 mm até 1,0 mm.

Diferentemente, para a variação do tempo entre retrações, a taxa de remoção de material para 0,5s é em média 89,00% maior que as taxas de remoção para execuções sem retração da ferramenta. Da mesma forma, para o tempo entre retrações de 1,0s a taxa de remoção é 32,7% maior do que as taxas sem utilização de retração da ferramenta. Comparando os resultados obtidos para 0,5 e 1,0s, entre si, as taxa de remoção do primeiro são 42,4% maiores em relação às do segundo.

A partir da análise dos dados observa-se que o comportamento da taxa de remoção é decrescente em função do aumento do tempo entre retrações da ferramenta, entre 0,5 e 1,0s. Logo, sugere-se a hipótese de que as maiores taxas de remoção são obtidas a medida que se diminui os tempos usinando entre retrações.

Por fim, conclui-se que os efeitos da retração da ferramenta na taxa de remoção de material e, por consequência, na eficiência geral do processo de usinagem por eletroerosão de topo é uma grande área a ser explorada, e que futuros trabalhos, inclinados ao aprofundamento do conhecimento das relações entre o referido parâmetro estudado e a eficiência do processo, viabilizarão, conseqüentemente, o emprego da eletroerosão nas mais diversas aplicações.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Propõem-se os seguintes tópicos como sugestão para trabalhos futuros:

- A influência da retração na taxa de remoção de material dentro do intervalo de 0,0 a 0,3mm de retração;
- A influência do tempo entre retrações na taxa de remoção de material para valores menores que 0,5 s.
- A influência do uso de retração da ferramenta na taxa de remoção de material utilizando jato dielétrico direcionado à fenda de trabalho
- A influência do uso de retração da ferramenta na taxa de remoção de material, utilizando eletrodos de grafite.

## REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM87: aços carbono e ligados para construção mecânica - designação e composição**. Rio de Janeiro: ABNT, 2000

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 6023: informação e documentação: referências: elaboração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002

ALBERTAZZI, Armando. **Apostila Metrologia: parte I**. Santa Catarina. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

AMORIM, Fred L.; WEINGAERTNER, Walter L. The behavior of graphite and copper electrodes on the finish die-sinking electrical discharge machining (EDM) of AISI P20 tool steel. **Journal of Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering**. V. 29. N. 4 p 366 - 371. 2007.

BENEDICT, Gary F. **Nontraditional manufacturing processes**. New York: Marcel Dekker, 1987.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2002.

COUTINHO, Carlos B. **Materiais metálicos para engenharia**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1992.

CRUZ JUNIOR, Eli J. **A influência do tamanho de grão ferrítico da peça na integridade superficial de peças erodidas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Faculdade de Engenharia Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2015.

GUITRAU, E. B. **The EDM handbook**. Cincinnati, USA. Hansen Gardner Publications. 1997

HO, K. H; NEWMAN, S.T, State of the art electrical discharge machining (EDM). **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. V. 43, Issue 13, 2003, P. 1287-1300.

KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven R. **Manufacturing engineering and technology**. 6th ed. New Jersey: Pearson Education, 2010.

LEE, S.H.; LI, X.P. Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide. **Journal of Materials Processing Technology**. V. 115, Issue 3, 2001, Pages 344-358,

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

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição química dos aços**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989.

SPIEGEL, Murray R.. **Estatística**. 3 ed. São Paulo: *Makron Books*, 1993. (Coleção Schaum)

WEINGAERTNER, Walter L. **Tecnologia de fabricação** V. 3. (Material didático da disciplina EMC 6316. POSMEC). UFSC. Florianópolis. [199-?].

**APÊNDICE A - Parâmetros de usinagem fornecidos pelo fabricante do equipamento**

Figura 1 - Parâmetros de usinagem fornecidos pelo fabricante do equipamento

ENGENHADOR		ELETRODO: Cobre (eletrolítico)		PEÇA: Aço		POLARIDADE ELETRODO: (+)		TENSÃO: 100 V											
VALORES ESTABELECIDOS		RUGOSIDADE		REMOÇÃO MATERIAL V <sub>w</sub>		SUBDIMENSIONAMENTO - UNDERSIZE		CONDIÇÕES DE TESTE											
SETTING VALUES		ROUGHNESS		TAXA DE DESGASTE V <sub>w</sub>		2gs = 2 gap slide		TEST CONDITIONS											
Ion	TS	Ioff	Rmax	Rmax	V <sub>w</sub>	V <sub>w</sub>	V <sub>r</sub>	PRESSÃO (mm)	PRESSURE (In)	ASPIRAÇÃO (mm)	ASPIRATION (In)	V <sub>min</sub>	I <sub>av</sub>	ÁREA					
μs	OT	%	μm	μin	mm <sup>3</sup> /min	in <sup>3</sup> /min	%	2gs max	2gs	2gs max	2gs	2gs max	2gs	Volt	AMP	cm <sup>2</sup>	In <sup>2</sup>		
150	2	88	26	1024	16	.00094	0.0	0.223	0.121	.0088	.0048	0.208	0.100	.0082	.0042	38	6.5	5	.775
150	3	91	32	1260	36	.00212	0.0	0.261	0.136	.0103	.0053	0.245	0.121	.0096	.0048	35	9.5	5	.775
150	4	91	35	1378	62	.00366	0.8	0.279	0.145	.0110	.0057	0.266	0.132	.0105	.0052	33	13	10	1.550
150	5	91	38	1496	87	.00513	1.8	0.305	0.153	.0120	.0060	0.292	0.140	.0115	.0055	32	16	10	1.550
150	6	91	40	1575	112	.00660	2.8	0.331	0.161	.0130	.0063	0.318	0.147	.0125	.0058	30	19	10	1.550
150	7	91	42	1653	132	.00778	4.2	0.347	0.167	.0137	.0066					30	23	10	1.550
150	8	91	44	1732	152	.00897	5.5	0.363	0.173	.0143	.0068					30	26	10	1.550
150	9	91	46	1811	176	.01038	6.4	0.380	0.179	.0150	.0070					30	29	10	1.550
150	10	91	46	1890	200	.01180	7.3	0.396	0.185	.0156	.0073					30	33	10	1.550
150	11	91	51	2008	216	.01274	8.2	0.408	0.188	.0161	.0075					30	36	10	1.550
150	12	91	54	2126	232	.01369	9	0.419	0.193	.0164	.0076					30	39	10	1.550
200	2	90	30	1181	14	.00063	0.0	0.250	0.130	.0096	.0051	0.238	0.116	.0094	.0046	38	7	5	.775
200	3	92	34	1338	32	.00189	0.0	0.284	0.144	.0112	.0057	0.272	0.132	.0107	.0052	35	10	5	.775
200	4	92	38	1496	60	.00354	0.3	0.314	0.156	.0124	.0061	0.303	0.145	.0119	.0057	33	14	10	1.550
200	5	92	43	1693	86	.00507	0.9	0.347	0.166	.0137	.0065	0.340	0.159	.0134	.0062	32	17	10	1.550
200	6	92	47	1850	112	.00661	1.5	0.379	0.175	.0149	.0069	0.376	0.172	.0148	.0068	30	20	10	1.550
200	7	92	48	1896	132	.00779	1.8	0.392	0.180	.0154	.0071					30	23	10	1.550
200	8	92	49	1929	152	.00897	2	0.404	0.184	.0159	.0072					30	27	10	1.550
200	9	92	52	2027	172	.01038	2.6	0.425	0.192	.0161	.0075					30	30	10	1.550
200	10	92	55	2165	200	.01160	3.5	0.448	0.200	.0176	.0079					30	34	10	1.550
200	11	92	57	2244	216	.01274	4.3	0.460	0.204	.0181	.0080					30	37	10	1.550
200	12	92	58	2283	232	.01369	5	0.471	0.207	.0185	.0081					30	40	10	1.550
300	4	95	44	1732	60	.00354	0.0	0.345	0.172	.0136	.0068	0.333	0.160	.0131	.0063	32	14	10	1.550
300	5	95	49	1929	86	.00507	0.0	0.381	0.183	.0150	.0072	0.374	0.175	.0147	.0069	31	17	10	1.550
300	6	95	54	2126	112	.00661	0.9	0.417	0.193	.0164	.0076	0.414	0.189	.0163	.0074	29	20	10	1.550
300	7	95	55	2165	132	.00779	1.1	0.431	0.198	.0170	.0078					30	24	10	1.550
300	8	95	56	2205	152	.00897	1.2	0.444	0.202	.0175	.0080					30	27	10	1.550
300	9	95	60	2362	184	.01086	1.6	0.489	0.211	.0192	.0083					30	31	10	1.550
300	10	95	63	2480	216	.01274	2	0.493	0.220	.0194	.0087					30	35	10	1.550
300	11	95	65	2559	224	.01322	2.4	0.506	0.224	.0199	.0088					31	38	10	1.550
300	12	95	67	2638	232	.01369	2.8	0.518	0.228	.0204	.0090					31	41	10	1.550

Fonte: Adaptação de manual do equipamento de eletroerosão EDM 440 – ENGEMAQ (2002)

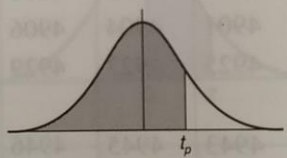
**APÊNDICE B** - Valores dos percentis da distribuição t de Student com  $v$  graus de liberdade



Fotografia 1 - Valores dos percentis da distribuição t de Student com v graus de liberdade

**Apêndice III**

Valores dos percentis ( $t_p$ ) da distribuição t de Student com v graus de liberdade (área sombreada =  $p$ )



v	$t_{0,995}$	$t_{0,99}$	$t_{0,975}$	$t_{0,95}$	$t_{0,90}$	$t_{0,80}$	$t_{0,75}$	$t_{0,70}$	$t_{0,60}$	$t_{0,55}$
1	63,66	31,82	12,71	6,31	3,08	1,376	1,000	0,727	0,325	0,158
2	9,92	6,96	4,30	2,92	1,89	1,061	0,816	617	289	142
3	5,84	4,54	3,18	2,35	1,64	0,978	0,765	584	277	137
4	4,60	3,75	2,78	2,13	1,53	0,941	0,741	569	271	134
5	4,03	3,36	2,57	2,02	1,48	0,920	0,727	0,559	0,267	0,132
6	3,71	3,14	2,45	1,94	1,44	906	718	553	265	131
7	3,50	3,00	2,36	1,90	1,42	896	711	549	263	130
8	3,36	2,90	2,31	1,86	1,40	889	706	546	262	130
9	3,25	2,82	2,26	1,83	1,38	883	703	543	261	129

614

Fonte: SPIEGEL (1993) – “ESTATÍSTICA”- 3ªed.