



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA E DE MATERIAIS – PPGEM**

**JOSÉ ALEXANDRE DE CAMPOS**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESGASTE DE CANTO  
DURANTE O PROCESSO DE ELETROEROSÃO DO AISI H13.**

**CURITIBA**

**2014**

**JOSÉ ALEXANDRE DE CAMPOS**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESGASTE DE CANTO  
DURANTE O PROCESSO DE ELETROEROSÃO DO AISI H13.**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia de Manufatura, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba, da UTFPR.

**Orientador:** Prof. Paulo André de Camargo Beltrão, Ph. D.

**CURITIBA**

**2014**

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**

---

C198a Campos, José Alexandre  
2014 Avaliação experimental do desgaste de canto durante o processo de eletroerosão do AISI H13 / José Alexandre Campos.-- 2014.  
100 f.: il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2014.  
Bibliografia: f. 87-92.

1. Usinagem por eletroerosão. 2. Aço-ferramenta. 3. Eletrodos. 4. Desgaste mecânico. 5. Análise dimensional. 6. Superfícies (Tecnologia) - Medição. 7. Tolerância (Engenharia). 8. Materiais - Testes. 9. Engenharia mecânica - Dissertações. I. Beltrão, Paulo André de Camargo, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. III. Título.

CDD 22 -- 620.1

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

JOSÉ ALEXANDRE DE CAMPOS

### **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESGASTE DE CANTO DURANTE O PROCESSO DE ELETROEROSÃO DO AISI H13.**

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de mestre em engenharia, área de concentração em engenharia de manufatura, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, do Campus de Curitiba, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

---

Prof. Paulo César Borges, Dr. Eng.  
Coordenador de Curso

Banca Examinadora

---

Prof. Carlos Cziulik, Ph.D.  
UTFPR

---

Prof. Dalberto Dias da Costa, Dr. Eng.  
UFPR

---

Prof. Paulo André de Camargo Beltrão, Ph.D.  
Orientador – UTFPR

Curitiba, 19 de dezembro de 2014.

“Não diga que a vitória está perdida  
se é de batalhas que se vive a vida.”

Raul Seixas.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Dr. Paulo André de Camargo Beltrão, agradeço pelo compromisso assumido, pelo empenho dedicado à conclusão desse trabalho, pela perseverança em vencer vários desafios que existiram e agradecer principalmente pelo suporte e materiais que disponibilizaram que em muito enriqueceram o meu conhecimento e o conteúdo desse trabalho de investigação.

Aos coordenadores do PPGEM da UTFPR, professor Dr. Giuseppe Pintaúde e professor Dr. Paulo César Borges, por acreditarem nesse trabalho e ajudar na parte burocrática do sistema e ao Professor Dr. Júlio Klein juntamente com o técnico do laboratório Alexandre José Gonçalves, contribuindo nos ensaios de XRD e MEV. À instituição Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, que disponibilizou a estrutura para pesquisas e os seus professores para consultas e orientações.

Aos professores da UTFPR, campus Ponta Grossa, Professor Irapuan Santos, por contribuir com várias revisões bibliográficas relacionado ao tema do trabalho, Professor Anderson G. M. Pukasiewicz, no intuito de encontrar um método de medição para os ensaios, Professores Ruimar R. de Gouveia e Marcelo V. Carvalho auxiliando com softwares de análises.

Aos Professores Claudimir Rebeyca e Fábio Alencar Schneider da Universidade Positivo, por cederem o espaço para realização de algumas usinagens, sala de estudo, e pela motivação e colaboração durante a execução desta dissertação.

À empresa Artis Matriz, representada pelo Murilo Olenik e à empresa ELF, representado pelo Euclides Leandro, por apresentarem situações do dia-a-dia da empresa e pelo auxílio na preparação dos eletrodos para os ensaios práticos.

Aos meus amigos Marcelo Bereta, Johny Engel, Marcio José Roberto e Amarildo Rogério Paiva, assim como outros amigos não citados, pelo grande apoio, aconselhamento, motivação e colaboração durante a execução desta dissertação.

E por fim, agradecer a Deus que me permitiu conhecer todas estas pessoas envolvidas neste trabalho que foram fundamentais para finalização de mais uma etapa importante em minha vida.

CAMPOS, José Alexandre, **Avaliação experimental do desgaste de canto durante o processo de eletroerosão do AISI H13**, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 100p., 2014.

## RESUMO

A fabricação de moldes e matrizes são ricas em detalhes e geometrias complexas, exigindo tecnologias mais inovadoras e precisas. Um dos processos que se destaca na fabricação de moldes e matrizes, é o de eletroerosão por penetração (*Electrical Discharge Machining* - EDM). A usinagem por descargas elétricas é classificada como um processo de fabricação de geometria não definida, onde a remoção de material é realizada por repetidas descargas elétricas entre dois eletrodos eletricamente condutores. O desgaste da ferramenta é um dos principais parâmetros de medida no desempenho da usinagem por EDM. O maior problema ocasionado pelo desgaste de canto do eletrodo é a mudança de geometria da ferramenta no decorrer da usinagem, alterando a tolerância geométrica e o dimensional da cavidade. O presente trabalho propõe avaliação dimensional do desgaste de canto do eletrodo, no decorrer da usinagem do processo de EDM, variando o ângulo de superfície frontal do eletrodo. Outro propósito é a criação de um índice, chamado de taxa de arredondamento, que leva em consideração as áreas de desgaste de canto do eletrodo em função da área removida de material da peça. Os resultados mostraram que os eletrodos de cobre, cobre tungstênio e grafite, tem um grande crescimento de raio de canto no início da usinagem, estabilizando esses valores com tempo maiores de processo. O ângulo de superfície frontal do eletrodo influência diretamente no desgaste de canto do eletrodo. Os eletrodos de grafite não apresentaram comportamento de arredondamento de desgaste de canto durante os ensaios. Para o índice de taxa de arredondamento os eletrodos de cobre tungstênio tiveram o menor valor apresentado na usinagem do AISI H13.

Palavras-chave: desgaste de canto, desgaste do eletrodo, ângulo de inclinação da superfície frontal, eletroerosão, taxa de arredondamento.

CAMPOS, José Alexandre, **Experimental evaluation of corner wear during the EDM process AISI H13**, Dissertation (Master of Engineering) – Post-graduate Program in Mechanical Engineering and Materials, Federal University of Technological Paraná, Curitiba, 100p, 2014.

## **ABSTRACT**

The manufacture of molds and dies are rich in detail and complex geometries, requiring more innovative and precise technologies. One of the processes that stands out in the manufacture of molds and dies, is to EDM by penetration (Electrical Discharge Machining - EDM). The cutting by electrical discharge is classified as a non-defined geometry manufacturing process where material removal is carried out by repeated electrical discharge between two electrodes electrically conductive. The tool wear is a major measurement parameters in machining performance by EDM. The biggest problem caused by the electrode corner wear is the tool geometry change during the machining by changing the geometric tolerance and dimensional cavity. This paper proposes dimensional evaluation of the electrode corner wear, during the machining of the EDM process, varying the front surface of the electrode angle. Another purpose is to create an index, called rounding rate, which takes into account the areas of electrode corner wear due to the removed area of the workpiece material. The results showed that the copper electrode, copper tungsten and graphite, has a large corner radius growth at the beginning of machining, stabilizing these values with higher process time. The front surface of the electrode angle influence directly on the electrode corner wear. Graphite electrodes showed no corner wear rounding behavior during the tests. For rounding rate index tungsten copper electrodes had the lowest value presented in the machining of AISI H13.

Keywords : corner wear, electrode wear, tilt angle of the front surface, EDM, rounding rate.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - a) placa de molde para gabinete de placas eletrônicas; b) eletrodo ferramenta de usinagem da cavidade do molde. ....	19
Figura 2 - Esquema da usinagem de eletroerosão por penetração (DUNIß, NEUMANN e SCHWARTZ, 1979 apud SANTOS, 2010). ....	22
Figura 3 - As quatro fases de uma descarga elétrica em EDM, König e Klocke (1997) apud Amorim, (2002). ....	23
Figura 4 - Evolução da tensão e corrente elétrica durante a descarga de uma faísca, apresentando em destaque os principais parâmetros de controle do processo (AMORIM, 2002). ....	25
Figura 5 - Diferença das taxas de remoção no ânodo e no cátodo em função do tempo de descarga, Dibitonto et al. (1989). ....	28
Figura 6 - Lavagem lateral dos produtos da remoção, Drozda (1983). ....	30
Figura 7 - Lavagem por pressão pelo eletrodo-ferramenta, Drozda (1983). ....	31
Figura 8 - Aspectos indesejáveis provocados pela lavagem por pressão pelo eletrodo, Drozda (1983). ....	31
Figura 9 - Lavagem por sucção das partículas através do eletrodo, Drozda (1983). ....	32
Figura 10- Deformação do fundo da cavidade provocada pela lavagem por pressão através do eletrodo, Bruyn (1970). ....	33
Figura 11 - Representação dos tempos de avanço e retração dos eletrodos. ....	34
Figura 12 - Exemplo de uso do fluido dielétrico em EDM, óleo hidrocarboneto. ....	35
Figura 13 - Representação esquemática da seção transversal de amostra eletroerodida (AMORIM, 2002). ....	36
Figura 14 - Ferramenta com ângulo de inclinação da superfície frontal ( $\theta$ ). ....	41
Figura 15 - Características geométricas do desgaste do eletrodo. ....	43
Figura 16 – a) Geometria do eletrodo durante a usinagem; b) Ângulo de inclinação da superfície frontal durante a usinagem, Mohri et al. (1994). ....	45
Figura 17 - Relação entre carbono equivalente e taxa de desgaste do eletrodo de cobre, Mohri et al. (1995). ....	46
Figura 18 - Geometria crítica do eletrodo em condições de usinagem extrema, Aas (2004). ....	47

Figura 19 - Desgaste do eletrodo no sistema de lavagem por injeção interna do fluido dielétrico.....	48
Figura 20 - Divisão de desgaste primário e desgaste secundário conforme Murray, Zdebski e Clare, (2012).....	49
Figura 21 - Modelo esquemático geral do desenvolvimento dos ensaios .....	54
Figura 22 - Máquina de EDM (ENGEMAQ 440 NC) utilizada para os ensaios. ....	56
Figura 23 - Rugosímetro portátil Mitutoyo utilizado no pré-ensaios.....	57
Figura 24 - Sistema de fixação do eletrodo-feramenta e eletrodo-peça.....	58
Figura 25 - Estéreo Microscópio óptico utilizado para medição do arredondamento do canto do eletrodo durante a usinagem por EDM.....	61
Figura 26 - Difrátômetro de raio x $CuK\alpha$ para análise da superfície do eletrodo após usinagem. ....	61
Figura 27 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV) para análise dos materiais agregados na superfície do eletrodo durante usinagem. ....	62
Figura 28 - Desenho esquemático dos eletrodos com ângulo de superfície frontal $\emptyset$ . ....	63
Figura 29 - Centro de usinagem com proteção de guias e fusos, específico para grafite.....	64
Figura 30 - Definição de área de remoção de material e área de arredondamento através do comprimento de desgaste e raios inicial e final da ponta do eletrodo. ....	67
Figura 31 - Eletrodo de cobre com ângulo de superfície frontal de $45^\circ$ , com raio de canto após usinagem de cinco minutos. ....	68
Figura 32 - Aumento do raio de canto do eletrodo de cobre para os ângulos de superfície frontal de $15^\circ$ , $30^\circ$ , $45^\circ$ e $60^\circ$ no intervalo de tempo de usinagem de 0 à 100 minutos. ....	69
Figura 33 - Aumento do raio de canto do eletrodo de cobre tungstênio para os ângulos de superfície frontal de $15^\circ$ , $30^\circ$ , $45^\circ$ e $60^\circ$ no intervalo de tempo de usinagem de 0 à 100 minutos. ....	70
Figura 34 - Eletrodos de grafite com ângulo de superfície frontal de $45^\circ$ . a) 5 minutos de usinagem, b) 20 minutos de usinagem, c) 45 minutos de usinagem, d) 60 minutos de usinagem. ....	72

Figura 35 - Aumento do raio de canto do eletrodo de cobre tungstênio para os ângulos de superfície frontal de 15°, 30°, 45° e 60° no intervalo de tempo de usinagem de 0 à 100 minutos.....	73
Figura 36 - Comparação na evolução do raio de canto dos três materiais de eletrodos para o Elet45.....	74
Figura 37 - Taxa de arredondamento com eletrodo de superfície frontal de 15° no decorrer da usinagem. ....	75
Figura 38 - Taxa de arredondamento com eletrodo de superfície frontal de 30° no decorrer da usinagem. ....	76
Figura 39 - Taxa de arredondamento com eletrodo de superfície frontal de 45° no decorrer da usinagem. ....	77
Figura 40 - Taxa de arredondamento com eletrodo de superfície frontal de 60° no decorrer da usinagem. ....	77
Figura 41 - Taxa de arredondamento em função do ângulo de superfície frontal no tempo de 60 minutos para os eletrodos de Cu, CuW e Gr.....	78
Figura 42 – Difratoograma do eletrodo de cobre após usinagem do AISI H13. ....	80
Figura 43 - Imagem obtida por MEV do eletrodo de cobre após usinagem do aço AISI H13.....	80
Figura 44 – Difratoograma do eletrodo de cobre tungstênio após usinagem do AISI H13. ....	81
Figura 45 - Imagem obtida por MEV do eletrodo de cobre tungstênio após usinagem do aço AISI H13.....	82
Figura 46 - Difratoograma do eletrodo de grafite após usinagem do AISI H13. ....	82
Figura 47 - Imagem obtida por MEV do eletrodo de grafite após usinagem do aço AISI H13.....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação AISI dos aços ferramentas. ....	51
Tabela 2 - Relação dos parâmetros utilizados nas pesquisas sobre eletroerosão. ....	52
Tabela 3 - Classificação das operações de usinagem por eletroerosão de acordo com a taxa de remoção de material. ....	54
Tabela 4 - Parâmetros elétricos do manual da máquina ferramenta para operação de acabamento utilizados no pré ensaio. ....	55
Tabela 5 - Composição química (% m/m) do aço ferramenta AISI H13 (Aços Favorit). ....	57
Tabela 6 - Propriedades dos materiais utilizados para eletrodos. ....	58
Tabela 7 - Características do fluido dielétrico para EDM. ....	59
Tabela 8 - Parâmetros elétricos para os ensaios com rugosidade $R_a < 3 \mu\text{m}$ . ....	60
Tabela 9 - Variáveis dos ensaios ângulo de superfície frontal do eletrodo e tempo de usinagem. ....	65
Tabela 10 - Espectro da superfície do eletrodo de cobre eletrolítico após usinagem do aço AISI H13. ....	80
Tabela 11 - Espectro da superfície do eletrodo de cobre tungstênio após usinagem do aço AISI H13. ....	82
Tabela 12 - Espectro da superfície do eletrodo de grafite após usinagem do aço AISI H13. ....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI - *American Iron and Steel Institute*  
CAD - *Computer aided design*  
CAM - *Computer aided manufacturing*  
CNC - Controle Numérico Computadorizado  
Cr - Cromo  
Cu - Cobre Eletrolítico  
CuW - Cobre Tungstênio  
DOE - *Design of Experiment*  
DT - *Duty Time*  
EDM - *Electrical Discharge Machine*  
Gap - Folga ou fenda de trabalho entre os eletrodos  
GD - Geometria definida  
GND - Geometria não definida  
GR - Grafite  
HB - *Hardness Brinell*  
HV - *Hardness Vickers*  
ISO - *International Organization for Standardization*  
JCPDS - *Joint Committee of Powder Diffraction Standards*  
LCM - Método de compensação linear  
LVDT - Transformador diferencial linear variável  
MEV - Microscopia Eletrônica por Varredura  
Mo - Molibdenio  
Mn - Maganês  
NBR - Norma Brasileira  
Ra - Rugosidade média  
Ry- Rugosidade total  
TRM - Taxa de Remoção do Material  
TS - *Transistor Standard*  
UWM - Método de desgaste uniforme  
V - Vanádio  
VDI - Norma Alemã - *Verein Deutscher Ingenieure*  
XRD - Difração de raio X  
W - Tungstênio

## LISTA DE SÍMBOLOS

$W_e$	energia utilizada	[J]
$V_w$	taxa de remoção de material	[mm <sup>3</sup> /min]
$V_e$	taxa de desgaste	[mm <sup>3</sup> /min]
$\hat{u}_i$	tensão em aberto	[V]
$u_e$	tensão média da descarga	[V]
$U$	tensão média de trabalho	[V]
$t_d$	tempo de retardo de ignição	[ $\mu$ s]
$t_e$	duração da descarga	[ $\mu$ s]
$t_i$	duração do pulso de tensão	[ $\mu$ s]
$t_o$	tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão $t_i$	[ $\mu$ s]
$t_p$	tempo do período do ciclo de uma descarga	[ $\mu$ s]
$\hat{i}_e$	corrente máxima durante a descarga	[A]
$i_e$	corrente média durante a descarga	[A]
$\tau$	relação de contato	
$\vartheta$	desgaste volumétrico relativo	
$\vartheta_{rc}$	taxa de arredondamento	
$\varnothing$	diâmetro	
$\beta$	ângulo da superfície lateral	
$r_c$	raio de canto	

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	18
1.2	OBJETIVO GERAL .....	19
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	20
<b>2</b>	<b>USINAGEM POR ELETROEROSÃO: CONTEXTO .....</b>	<b>21</b>
2.1	O PROCESSO DE EDM.....	21
2.2	FUNDAMENTOS DO FENÔMENO FÍSICO DE UMA DESCARGA .....	22
2.3	PRINCIPAIS PARÂMETROS DE CONTROLE EM EDM .....	25
2.4	INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE EDM DURANTE A USINAGEM. ....	26
2.5	SISTEMA DE LAVAGEM DOS PRODUTOS DA REMOÇÃO .....	28
2.6	FLUIDOS DIELÉTRICOS.....	34
2.7	INTEGRIDADE DE SUPERFÍCIE .....	35
2.8	CARACTERÍSTICAS DO ELETRODO E PRINCIPAIS MATERIAIS UTILIZADOS .....	38
2.9	FATORES QUE INFLUENCIAM NO DESGASTE DO ELETRODO.....	40
2.10	TIPO DE DESGASTE DO ELETRODO .....	43
2.11	PESQUISAS NA ÁREA DE DESGASTE DE CANTO EM EDM.....	44
2.12	APLICAÇÕES E CARACTERÍSTICAS DOS AÇOS FERRAMENTA E PARÂMETROS DE USINAGEM. ....	51
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>53</b>
3.1	PRÉ-ENSAIO.....	53
3.2	MATERIAIS .....	56
3.2.1	Equipamentos utilizados no pré-ensaio .....	56
3.2.2	Peça de trabalho .....	57
3.2.3	Eletrodo ferramenta .....	57
3.2.4	Fluido dielétrico e método de lavagem.....	59
3.2.5	Parâmetros elétricos do processo .....	59
3.2.6	Equipamentos de medição.....	60
3.3	MÉTODOS.....	62
3.3.1	Fabricação dos eletrodos .....	62
3.3.2	Planejamento dos experimentos.....	64
3.3.3	Apresentação dos resultados .....	66
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>68</b>
4.1	ANÁLISE DA GEOMETRIA DO ELETRODO .....	68
4.1.1	Eletrodo de cobre eletrolítico .....	69
4.1.2	Eletrodo de cobre tungstênio.....	70

4.1.3 Eletrodo de grafite.....	71
4.1.4 Comparação entre os três materiais de eletrodos.....	73
4.2 ANÁLISE DE INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE DO ELETRODO .....	79
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>85</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	86
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>87</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>95</b>
<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE E .....</b>	<b>97</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>98</b>
<b>ANEXO B .....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO C .....</b>	<b>100</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A literatura divide os processos de usinagem em três grupos: i) processos de usinagem com ferramentas de geometria definida; ii) processos de usinagem com ferramentas de geometria não definida; e iii) processos especiais de usinagem (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

Os processos especiais de usinagem utilizam tecnologias e conceitos novos, se comparados com processos GD e GND, e surgiram para suprir necessidades específicas. Entre estes processos pode-se citar a usinagem com jato d'água, a usinagem eletroquímica, a usinagem por laser e a eletroerosão.

A eletroerosão é o mais utilizado e popular dos processos especiais de usinagem (SANTOS, 2010), e se baseia no fenômeno de descargas elétricas não estacionárias (faíscas) controladas para fundir e vaporizar parcelas do material, configurando, através da remoção dessas parcelas de material, a usinagem de uma determinada superfície.

O processo possui grande aplicação em indústrias que necessitam da usinagem de peças com geometria complexa e alta dureza, tais como moldes e matrizes, automotivo, aeroespacial, médico, óptico, joalheria, dental, de ferramentas, de prototipagem e de componentes cirúrgicos (SANTOS, 2010).

Os processos de eletroerosão (*Electrical Discharge Machining* - EDM) são divididos em três tipos: i) eletroerosão por penetração; ii) eletroerosão a fio; e iii) retificação eletroerosiva (KÖNIG e KLOCKE, 1997), sendo que neste trabalho a sigla EDM, por uma questão de objetividade, será utilizada para designar o processo de eletroerosão por penetração, atual objeto de estudo.

A fabricação de componentes com geometrias complexas engloba vários aspectos geométricos, tais como furos pequenos com forma irregulares, furos profundos, canais, cavidades com muitos entalhes e cavidades complexas. Na indústria de moldes e matrizes, a fabricação desse tipo de peça geralmente está associada a propriedades do material da peça como difícil usinabilidade e elevada dureza. Justamente nesses casos, o processo de EDM oferece vantagens quando comparado aos processos de usinagem convencional, além de peças livres de rebarbas e com possibilidades de usinagem do material após tratamento térmico. (JHA, RAM e RAO, 2011).

A teoria mais aceita para o processo de EDM é a termoelétrica, onde a remoção de material é realizada por repetidas descargas elétricas entre dois eletrodos eletricamente condutores, sendo um deles a peça a ser usinada e o outro a ferramenta, denominados como ânodo (positivo) e cátodo (negativo) (EUBANK, 1993).

Ho e Newman (2003), condensaram o Estado da Arte da tecnologia do processo de EDM, referindo-se a trabalhos do período de 1983 a 2003, e verificaram que pesquisadores têm investido esforços na procura de maior eficiência do processo de EDM. Neste período encontram-se pesquisas referentes à melhoria das medidas de desempenho, otimização das variáveis de processo, monitoramento e controle do processo de faíscas, simplificação do projeto do eletrodo e sua fabricação.

Com relação à simplificação do projeto do eletrodo e sua fabricação, um dos focos de pesquisa tem sido o desgaste do eletrodo. De acordo com a *VDI - Verein Deutscher Ingenieure 3402 Blatt 1* (1990), há quatro maneiras de analisar-se o desgaste de eletrodo no processo de EDM:

- a) desgaste volumétrico;
- b) desgaste da face frontal;
- c) desgaste de canto e;
- d) desgaste lateral.

Portanto, o desgaste da ferramenta de EDM faz com que a profundidade definida não seja atingida e altera a forma da cavidade usinada. Em particular, este problema se intensifica na fabricação de cavidades cegas.

As medições de desgaste do eletrodo são normalmente efetuadas em estado estacionário, ou seja, depois de encerrar a usinagem da peça de trabalho. Por outro lado, o desgaste do eletrodo ocorre de forma contínua durante todo o tempo de usinagem. Consequentemente, o conhecimento sobre a evolução do desgaste do eletrodo é importante para se alcançar melhor precisão na geometria da peça de trabalho e nas tolerâncias de projeto, uma vez que se terá informações mais detalhadas sobre a alteração da forma do eletrodo (AMORIM et al., 2010).

De acordo com Bleys, Kruth e Lauwers (2004), a utilização de usinagem EDM por penetração sem considerar o desgaste do eletrodo pode levar ao desvio da geometria final da peça. A compreensão de como ocorre o desgaste do eletrodo, pode facilitar a tomada de decisão em várias etapas do processo, indo desde

alguma forma de compensação no próprio processo até uma melhor logística no sequenciamento de eletrodos entre as fases de desbaste e acabamento, permitindo atingir uma melhor tolerância geométrica da cavidade e otimização dos recursos. Essas compensações e logística podem ser uma nova forma de elaboração do processo ou até mesmo uma melhor definição na quantidade de eletrodos.

Neste contexto, este trabalho propõe a avaliação dimensional do desgaste de canto do eletrodo, no decorrer da usinagem do processo de EDM, variando o ângulo de superfície frontal do eletrodo. Outro propósito é a criação de um índice, chamado de taxa de arredondamento, que leva em consideração as áreas de desgaste de canto do eletrodo em função da área removida de material da peça.

## **1.1 Justificativa**

A empresa Artiz Matriz, situada na cidade de Campo Largo - Pr, foi referência para o estudo deste trabalho. Com atividade principal a elaboração de projetos e fabricação de moldes e matrizes, a empresa se destaca na fabricação de ferramentas na área automotiva e eletrodomésticos, onde peças plásticas com variadas geometrias e diversos detalhes são rotineiros. Um dos casos mais complexos e de elevado custo, é a usinagem de cavidades estreitas com canto vivo, essa situação pode ser mais agravante quando a superfície de fundo da cavidade apresenta um ângulo menor que  $90^\circ$  com a parede lateral da cavidade.

Para usinagem de uma cavidade com essas especificações e dentro da tolerância geométrica do projeto, atualmente a empresa realiza por meio empírico, a fabricação de diversos eletrodos, muitas vezes não sendo necessários o repasse de todos para finalizar a cavidade. Para exemplificar este problema, a Figura 1(a) apresenta a placa de um molde de injeção plástica, com a cavidade de um gabinete. O produto final tem diversas nervuras, onde são montadas placas eletrônicas, exigindo baixa tolerância dimensional da geometria das nervuras para conseguir realizar essas montagens. Para atender a solicitação do projeto, foi utilizado de forma empírica diversos eletrodos até conseguir atingir as especificações exigidas de tolerância geométrica do perfil das nervuras. A Figura 1(b) demonstra o eletrodo de acabamento das nervuras antes da usinagem.

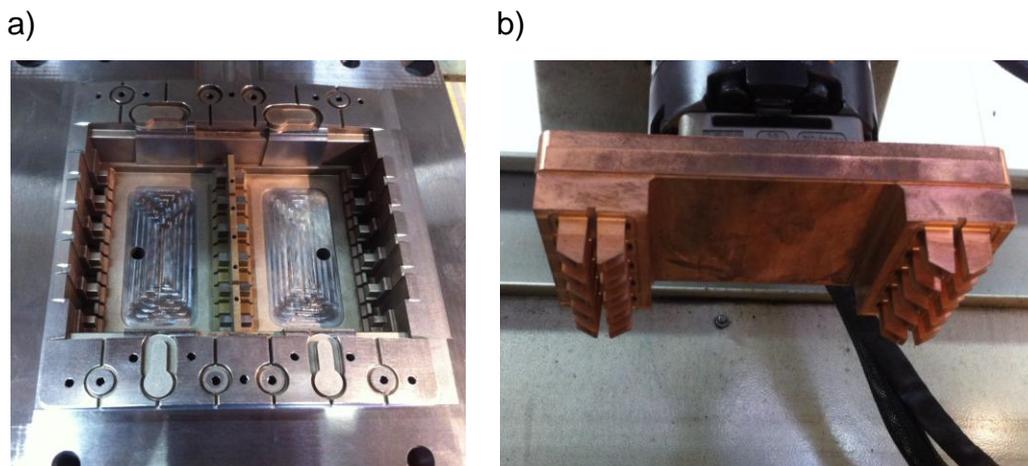


Figura 1 - a) placa de molde para gabinete de placas eletrônicas; b) eletrodo ferramenta de usinagem da cavidade do molde.

O atual desenvolvimento mundial da pesquisa sobre a usinagem por EDM, relacionado ao desgaste de canto do eletrodo é bastante restrito. As principais fontes de informação são tabelas genéricas de parâmetros de processo fornecidas no **EDM Handbook (1997)**, as quais, muitas vezes, não produzem as melhores condições de usinagem, sendo necessário que as ferramentarias desenvolva teste empíricos para garantir uma determinada situação de desgaste de canto. Entretanto, estes tipos de testes, quase sempre, são técnica e economicamente inviáveis de serem conduzidos nas ferramentarias.

A empresa acredita que com valores conhecido de taxa de arredondamento do eletrodo em vários ângulos de superfície frontal, reduza o numero de eletrodos para atingir uma determinada tolerância geométrica, e como consequência a redução do custo de processo de eletroerosão.

## 1.2 Objetivo geral

O presente trabalho, tem por objetivo avaliação dimensional do desgaste de canto do eletrodo, no decorrer da usinagem do processo de EDM, variando o ângulo de superfície frontal do eletrodo. Outro propósito é a criação de um índice, chamado de taxa de arredondamento, que leva em consideração as áreas de desgaste de canto do eletrodo em função da área removida de material da peça, criando parâmetros para possibilitar o analista de processo ainda em fase de projeto estimar o número de eletrodos para atingir uma determinada tolerância geométrica.

### **1.3 Objetivos específicos**

A realização do objetivo geral é detalhada através dos objetivos específicos:

- a) Comparar e analisar as características dimensionais do desgaste de canto, em diferentes ângulos de inclinação de superfície frontal dos eletrodos no decorrer da usinagem.
- b) Comparar e analisar a taxa de arredondamento dos materiais de eletrodos, no decorrer da usinagem, para os diferentes ângulos de superfície frontal no decorrer da usinagem.
- c) Verificar a integridade da superfície dos eletrodos ensaiados com o objetivo de entender os valores apresentados do arredondamento de canto do eletrodo.

### **1.4 Estrutura da Dissertação**

Na sequência deste estudo, o capítulo 2 tratará um contexto sobre o processo de eletroerosão. Ainda dentro do capítulo 2, são abordados alguns conceitos importantes para o trabalho em questão, como os tipos de desgastes de eletrodos e modo de medição dos mesmos. No capítulo 3, será explicada os materiais utilizados e a metodologia empregada no estudo. No capítulo 4, serão apresentados os resultados encontrados nos ensaios realizados, para a empresa em questão. No capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas com a realização deste trabalho.

## 2 USINAGEM POR ELETROEROSÃO: CONTEXTO

Esta seção fornece os fundamentos básicos sobre o processo de eletroerosão, o fenômeno físico de uma descarga elétrica, os principais parâmetros elétricos, tipos de desgaste do eletrodo e linhas de pesquisas na área de desgaste de canto do eletrodo.

### 2.1 O processo de EDM

Fato comum em diversas áreas técnicas, a necessidade do meio industrial em solucionar problemas de fabricação faz surgir aplicação tecnológica para diversos conceitos, assim como aconteceu com a descarga elétrica.

Os primeiros equipamentos utilizando descarga elétrica com aplicação industrial surgiram no período entre a primeira e segunda guerra mundial, com a finalidade de remover brocas e ferramentas de rosca que quebravam dentro da peça. König e Klocke (1997) relatam que esses equipamentos eram de difícil operação devido ao controle manual da distância de trabalho entre os eletrodos, ocasionando assim a geração de arcos e curtos-circuitos por consequência o desgaste de ambos os eletrodos por igual.

Dois cientistas, Boris R. Lazarenko e Natalie I. Lazarenko (1944) na Universidade de Moscou perceberam que a capacidade de erosão por descarga elétrica poderia ser utilizada para a usinagem de materiais. Com o objetivo de obter resultados tecnológicos para as indústrias da Ex União Soviética, começaram a melhorar o controle dos equipamentos de descarga elétrica (AMORIM, 2002).

Entre as melhorias apresentadas está o circuito de relaxação, batizado como circuito de Lazarenko, onde dois eletrodos submersos em um fluido líquido constituía a primeira máquina-ferramenta de eletroerosão confiável, de fácil construção e de baixo custo. Esse sistema foi muito utilizado na década de 1950 e serviu como referência para a melhoria dos equipamentos atuais (KÖNIG E KLOCKE, 1997).

Com o avanço da tecnologia, na década de 1980, o controle numérico computadorizado (CNC) vem aumentar os recursos disponíveis em processos de EDM, aumentando assim a eficiência da operação, troca automática de eletrodos/ferramentas e controle mais preciso de diversos parâmetros, o que fez

crescer o interesse da indústria e de pesquisas pelo processo, Ho e Newman, (2003).

As máquinas mais modernas de eletroerosão possuem interação com *softwares* CAD/CAM. Isso permite que, no momento do projeto, o próprio *software* defina os eletrodos a serem utilizados e a trajetória de trabalho, conseguindo assim, mesmo com eletrodos de geometria simples, fabricar superfícies tridimensionais complexas (RAJURKAR E YU, 2000).

Os principais componentes de um processo de usinagem por EDM por penetração são apresentados na Figura 2.

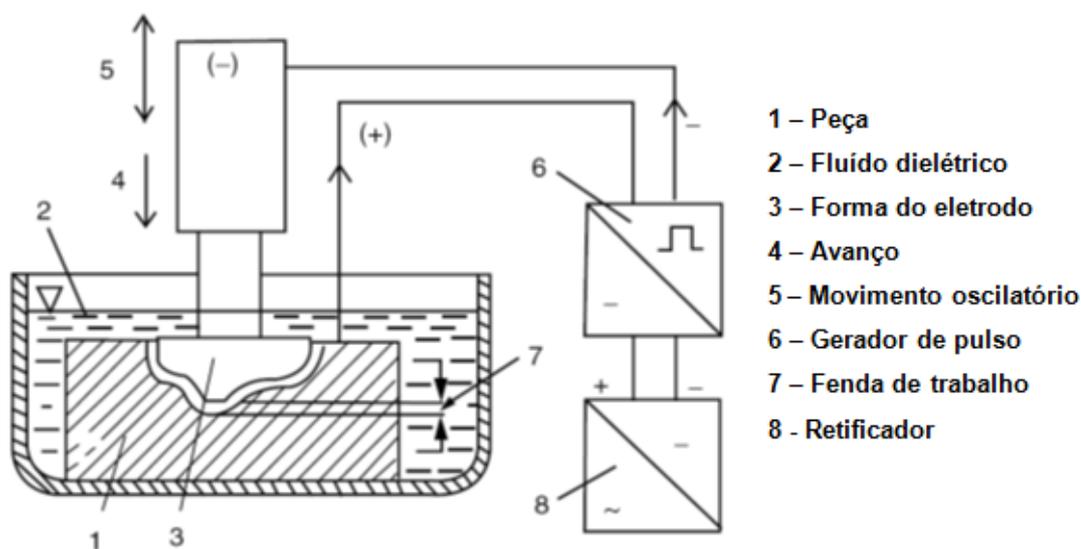


Figura 2 - Esquema da usinagem de eletroerosão por penetração (DUNIß, NEUMANN e SCHWARTZ, 1979 apud SANTOS, 2010).

A aplicação do processo de usinagem EDM vem crescendo em indústrias que necessitam fabricar peças com geometria complexa e de alta dureza, tais como moldes e matrizes, setores automotivo, aeroespacial, médico, óptico, de joalheria, de ferramentas e de componentes cirúrgicos, (HO e NEWMAN, 2003; JHA, RAM e RAO, 2011).

## 2.2 Fundamentos do fenômeno físico de uma descarga

A remoção de material no processo de eletroerosão consiste basicamente na aproximação de um eletrodo/ferramenta e um eletrodo/peça com polaridades diferentes. Os dois eletrodos estão mergulhados num fluido dielétrico, que pode ser

água deionizada, um óleo (hidrocarboneto) ou querosene. Quando se atinge certa distância (de 5 a 100  $\mu\text{m}$ ) entre o eletrodo e a peça, denominada fenda de trabalho, ocorre a formação de diversas descargas elétricas não estacionárias, controladas para fundir e vaporizar parcelas do material (GUITRAU, 1997).

A teoria mais aceita para o processo de EDM é a termoelétrica, sendo caracterizada por quatro etapas distintas. A Figura 3 descreve essas etapas conforme König e Klocke (1997).

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

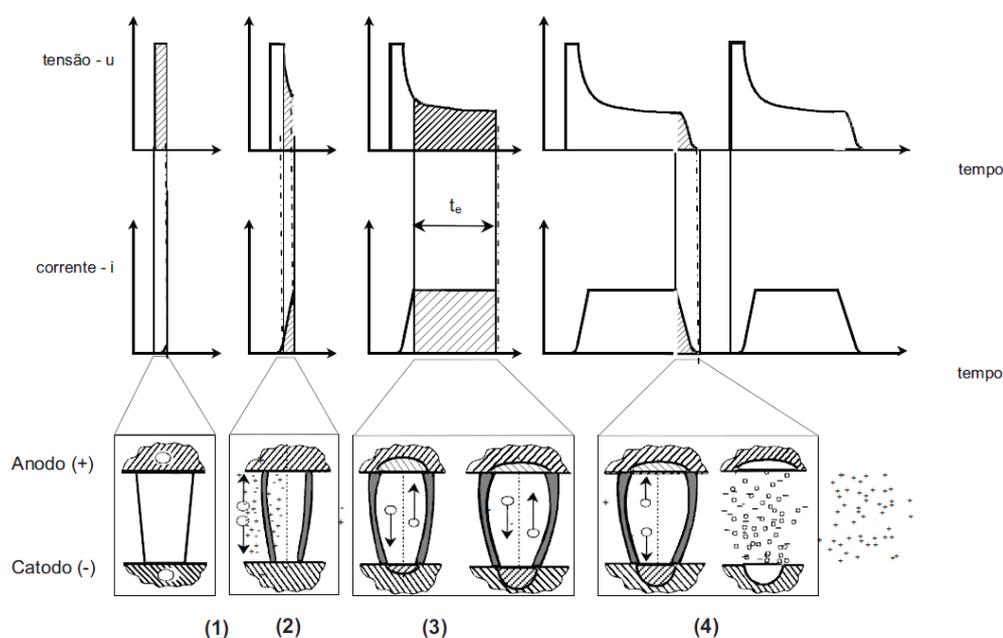


Figura 3 - As quatro fases de uma descarga elétrica em EDM, König e Klocke (1997) apud Amorim, (2002).

Quando a aproximação entre os eletrodos chega a uma distância entre 0,5 e 1,0 mm, ocorre a liberação de tensão entre os eletrodos, chamada de tensão em aberto ( $u_i$ ), não passando corrente entre os eletrodos devido à resistência do fluido dielétrico.

O servomecanismo é então acionado para deslocar o eletrodo em direção à peça até atingir a distância da fenda de trabalho, também chamada de *gap*. Nesse instante ocorre o aumento do campo elétrico entre as superfícies dos eletrodos, nos picos de rugosidades das superfícies ou onde possuem detritos entre a fenda de trabalho, inicia-se a emissão de elétrons do cátodo, chocando-se com moléculas do

fluido dielétrico, liberando mais elétrons e íons positivos em direção ao cátodo, caracterizando o fenômeno de ionização por impacto.

A multiplicação do fenômeno de ionização por impacto faz com que ocorra um aquecimento e uma evaporação de uma pequena quantia de fluido dielétrico, diminuindo a rigidez da resistência elétrica do próprio fluido. Nesse instante ocorre o aumento da corrente elétrica entre os eletrodos, e o surgimento de túneis transportadores de energia entre o ânodo e o cátodo. A tensão inicial cai drasticamente para a tensão de ruptura do dielétrico, e a corrente atinge o valor estipulado ( $i_e$ ), formando um canal de plasma entre os eletrodos, o qual é limitado pela pressão do dielétrico (AMORIM, 2002).

Um tempo de descarga ( $t_e$ ) é estipulado pelo operador para a passagem da corrente elétrica entre os eletrodos, atingindo temperaturas entre 8000 e 12000 °C (HO e NEWMAN, 2003; GUITRAU, 1997), que, por condução térmica, funde uma pequena quantia de material de ambos os eletrodos. Nesta fase, uma característica importante, relatado por Dibitonto et al. (1989), é a ação entre os íons positivos e os elétrons ao colidirem com o cátodo e o ânodo respectivamente. Devido à maior inércia dos íons positivos, associada a sua maior massa em relação aos elétrons, estes precisam de mais tempo para atingir certa velocidade. Desta forma, logo no início da descarga acontece um maior bombardeamento de elétrons no ânodo do que o de íons positivos no cátodo.

No final do tempo de descarga de corrente elétrica, o controle do gerador da máquina rompe a corrente elétrica entre os eletrodos, iniciando assim o tempo de intervalo até o início de um novo ciclo de descarga. Esse tempo entre descargas ( $t_0$ ) deve ser especificado de maneira a garantir a deionização do fluido dielétrico e adequada lavagem das partículas erodidas.

A remoção do material no processo de EDM está associada ao fenômeno de superaquecimento do material fundido. Segundo Eubank et al. (1993), a temperatura chega próxima ao ponto de ebulição dos materiais dos eletrodos, com a interrupção da descarga elétrica, e o rompimento do canal de plasma, são geradas forças com intensidade suficiente para separar bruscamente o material fundido das paredes das cavidades, criando uma pequena cratera na superfície de ambos os eletrodos. Parte do material removido é carregado pelo fluido dielétrico para fora da fenda de trabalho, outra parte se solidifica em regiões próximas a cratera gerada, constituindo

nos aços a chamada camada branca. O material removido para fora da cavidade apresenta formato de pequenas esferas, ocas ou sólidas.

### 2.3 Principais parâmetros de controle em EDM

Os parâmetros de controle no processo de EDM são classificados como parâmetros elétricos e não elétricos. A Figura 4 apresenta um resumo dos principais parâmetros elétricos do processo de EDM de acordo com a norma VDI 3402 (1990).

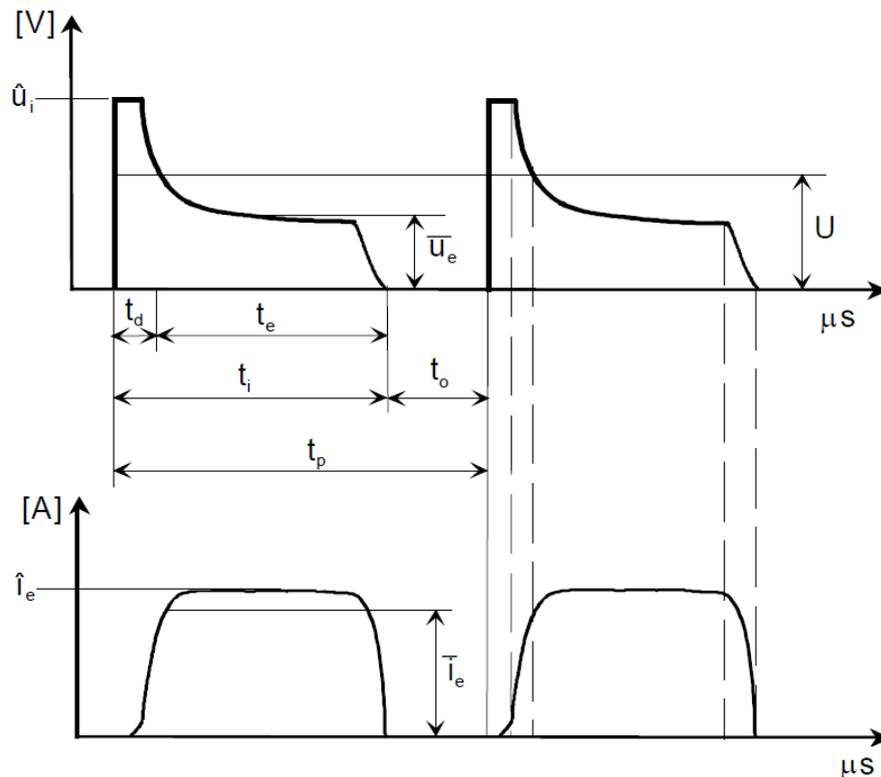


Figura 4 - Evolução da tensão e corrente elétrica durante a descarga de uma faísca, apresentando em destaque os principais parâmetros de controle do processo (AMORIM, 2002).

Que podem ser especificados como:

- $\hat{u}_i$  - tensão em aberto (V);
- $\bar{u}_e$  – tensão média da descarga (V);
- $U$  – tensão média de trabalho durante a usinagem (V);
- $t_d$  – tempo de retardo de ignição da descarga ( $\mu$ s);
- $t_e$  – duração da descarga ( $\mu$ s);
- $t_i$  – duração do pulso de tensão ( $t_d + t_e$ ) ( $\mu$ s);
- $t_o$  – duração do intervalo entre duas sucessivas descargas ( $\mu$ s);
- $t_p$  – duração do período do ciclo de uma descarga ( $\mu$ s);

- $i_e$  – corrente máxima durante a descarga (A);
- $\bar{i}_e$  – corrente média durante a descarga (A);
- $\tau$  - relação de contato: representa a razão entre a duração do pulso ( $t_i$ ) e a duração do período do ciclo da descarga ( $t_p$ ) ( $\mu s$ ).

Os parâmetros citados são regulados dentro de faixas que cada modelo de máquina de EDM disponibiliza. Amorim (2002) relata que a energia da descarga elétrica ( $W_e$ ) transformada durante uma faísca, é representada pela equação 01. Essa energia influencia na qualidade do acabamento superficial e no volume de material removido por um ciclo completo da descarga elétrica.

$$W_e = \bar{i}_e \cdot i_e \cdot t_e \text{ (V.A. } \mu s \text{.) (J)} \quad (\text{Eq. 01})$$

Para a avaliação do rendimento do processo de usinagem por EDM são usualmente utilizados os seguintes parâmetros (VDI, 1990):

- $V_w$  – taxa de remoção de material: representa o volume de material removido do eletrodo/peça durante o tempo [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ].
- $V_e$  – taxa de desgaste: representa o volume de material que é removido do eletrodo/ferramenta durante o tempo [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ].
- $\mathcal{G}$  - desgaste relativo: representa o desgaste volumétrico relativo entre os eletrodo/ferramenta e eletrodo/peça, dado pela razão entre  $V_e$  e  $V_w$  normalmente em valores percentuais. Esse desgaste é determinado pela equação 02:

$$\mathcal{G} = \frac{V_e}{V_w} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 02})$$

## 2.4 Influência dos parâmetros de EDM durante a usinagem.

Conforme König e Klocke (1997), a tensão em aberto  $\hat{u}_i$  (V) e a tensão média de trabalho  $U$  (V) tem grande influência sobre a dimensão da fenda de trabalho. Pequenas tensões médias de trabalho proporcionam a ocorrência de muitos curtos-circuitos e arcos durante a usinagem. Com a elevação da tensão média de trabalho, ocorre o aumento da abertura da fenda de trabalho, proporcionando boas condições de movimentação de retirada das partículas eletroerodidas, e com isso um aumento

da taxa de remoção e diminuição do desgaste relativo, pelo fato de intensificar a ocorrência de descargas elétricas normais, ou seja, sem ocorrência de curtos circuitos.

Entretanto, o aumento gradual da tensão em aberto ocasionará aumento excessivo da fenda de trabalho e ocasionando longo tempo de ignição da faísca ( $t_d$ ), provocando a diminuição do rendimento do processo por reduzir a frequência de descargas, já que acontece uma elevação do tempo de período do ciclo ( $t_p$ ).

Em condições de desgaste, ou seja, altos níveis de energia ( $W_e$ ), trabalha-se normalmente com tensões em aberto ( $\hat{u}_i$ ) em níveis mais baixos, como por exemplo, 80, 100 ou 120 V, por causa da fenda de trabalho ser de maiores dimensões. Na operação de acabamento, ou seja, com a utilização de baixos níveis de energia ( $W_e$ ), a fenda de trabalho diminui progressivamente. Normalmente, para essas condições de usinagem, é prática usual elevar a tensão em aberto ( $\hat{u}_i$ ) com a finalidade de aumentar a fenda de trabalho, facilitando a lavagem, e evitar a ocorrência de descargas instáveis (AMORIM, 2002).

Outro parâmetro de grande influência no rendimento do processo de EDM é a polaridade em relação ao tempo de descarga elétrica,  $t_i$  ( $\mu s$ ). Segundo Dibitonto et al. (1989), durante os primeiros momentos da descarga, devido a maior mobilidade dos elétrons, a erosão de material é maior no ânodo do que no cátodo. Com o passar do tempo ( $\mu s$ ) os íons positivos atingem o cátodo, que por emitir apenas elétrons, mantém seu diâmetro do canal de plasma praticamente inalterado, enquanto que o diâmetro do canal de plasma no ânodo aumenta em relação ao do cátodo, diminuindo sua temperatura e conseqüentemente, a erosão do material. A Figura 5 mostra a evolução do desgaste dos eletrodos em função do tempo de descarga.

Em operações de desgaste, com maiores níveis de corrente ( $\hat{i}_e$ ), longos tempos de duração de descarga são ótimos, pelo fato de altas pressões e temperaturas no canal de plasma e como conseqüência, é gerado um aumento da remoção de material da peça ( $V_w$ ) e pouca remoção de material no eletrodo/ferramenta ( $V_e$ ). Normalmente se estabelece a polaridade positiva para o eletrodo/ferramenta (ânodo) e a negativa para o eletrodo/peça (cátodo).

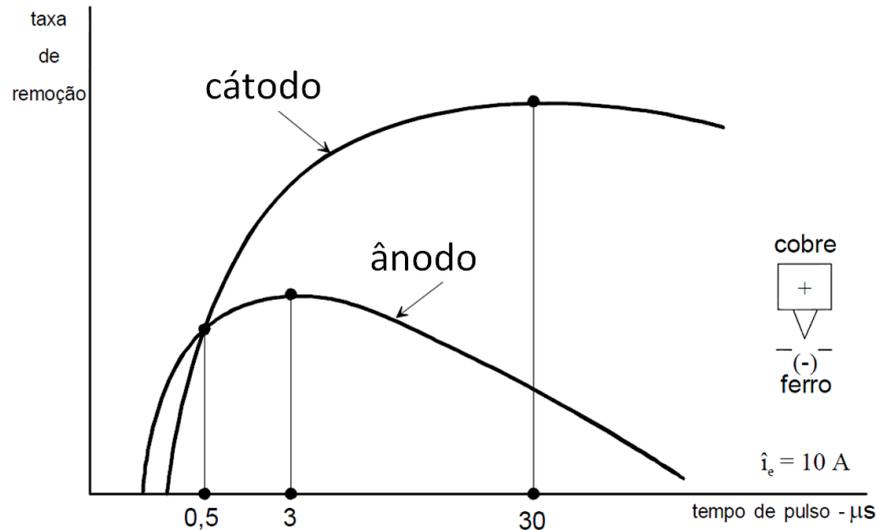


Figura 5 - Diferença das taxas de remoção no ânodo e no cátodo em função do tempo de descarga, Dibitonto et al. (1989).

No regime de acabamento onde são empregados baixas correntes de descarga ( $\hat{i}_e$ ) e pequenos tempos de duração da descarga ( $t_i$ ) com o objetivo de obter baixos níveis de rugosidade, é comum adotar a polaridade negativa (cátodo) para o eletrodo/ferramenta e a polaridade positiva (ânodo) para o eletrodo/peça, ocorrendo assim um desgaste mais acentuado no eletrodo/ferramenta.

O sistema de lavagem promovida pela alimentação de dielétrico na fenda de trabalho tem grande influência no desempenho da usinagem, pois além de responsável pela retirada do excesso das partículas erodidas, tem a função de resfriar os eletrodos e restringir o tamanho do canal de plasma, concentrando a energia da descarga e removendo maior quantidade de material.

## 2.5 Sistema de lavagem dos produtos da remoção

Durante o processo de EDM, na usinagem, ocorre a contaminação da fenda de trabalho entre o eletrodo/peça e eletrodo/ferramenta causado pelas partículas eletroerodidas e, também, por subprodutos da desintegração do dielétrico.

Entretanto, esse material que encontra-se na fenda de trabalho pode trazer benefícios positivos e negativos sobre o processo de EDM. Um exemplo relatado por Müller (1965), diz que em condições normais de usinagem uma certa contaminação da fenda de trabalho produz benefícios ao processo, pois algumas partículas submicroscópicas e pequenas gotículas que permanecem na fenda, após

o término da descarga com o estabelecimento de  $t_0$ , intensificam o campo elétrico favorecendo maior facilidade de ignição da próxima faísca.

Esses resíduos influenciam na diminuição do tempo de retardo da ignição  $t_d$ , no aumento da dimensão da fenda de trabalho e em melhor dispersão das descargas elétricas ao longo das superfícies frontais dos eletrodos, informa Schumacher (1990). Portanto, podem promover aumento da taxa de remoção de material  $V_w$ , diminuição do desgaste  $\vartheta$  e melhoria do acabamento superficial.

Entretanto, é importante ressaltar que uma instabilidade do processo na forma de arcos e curtos-circuitos pode ser gerada para os casos de sobrecontaminação da fenda. Nesse sentido, a lavagem promovida pela alimentação de dielétrico na fenda de trabalho é de fundamental importância para o bom desempenho da usinagem, pois a mesma é responsável pela retirada do excesso dos produtos da remoção. (AMORIM, 2002)

O dielétrico possui ainda duas outras funções principais:

- 1) reduzir a expansão do canal de plasma promovendo a concentração da energia da descarga. Quanto menor o volume do canal de plasma maior a quantidade de energia irradiada para os eletrodos e, portanto, melhor o rendimento do processo, segundo Tomlinson e Adkin (1992). O fluido dielétrico normalmente utilizado é constituído de hidrocarbonetos (alcanos, alcenos, benzênicos e acetilênicos). A viscosidade do dielétrico age diretamente sobre os índices da taxa de remoção de material e do desgaste relativo, por causa de sua influência sobre as condições de lavagem e estrangulamento do canal de plasma, bem como sobre a refrigeração dos eletrodos. Segundo Levy (1989), para a obtenção de um bom rendimento do processo, a recomendação é utilizar dielétrico com viscosidade menor ou igual a 3 cSt em regimes de acabamento e de 4 cSt nas condições de desbaste;
- 2) a segunda função do dielétrico é refrigerar os eletrodos-ferramenta e peça. No processo de EDM, por causa da alta temperatura, é fundamental evitar que haja aquecimento excessivo dos eletrodos, o qual pode ocasionar acentuada dilatação volumétrica principalmente do eletrodo-ferramenta, gerando deficiência nas condições de lavagem - em especial na usinagem de cavidades profundas e estreitas e, portanto, instabilidade da operação.

Analisando o tipo de trabalho a ser executado, ou seja, dependendo principalmente da geometria e profundidade da cavidade e do regime de usinagem (desbaste ou acabamento), o fluido dielétrico é direcionado à fenda de trabalho de várias maneiras.

Um dos tipos de lavagem é por jatos laterais com bicos posicionados próximos a fenda de trabalho. Esse tipo apresenta resultados satisfatórios em cavidades planas e de pouca profundidade, como ilustra a Figura 6.

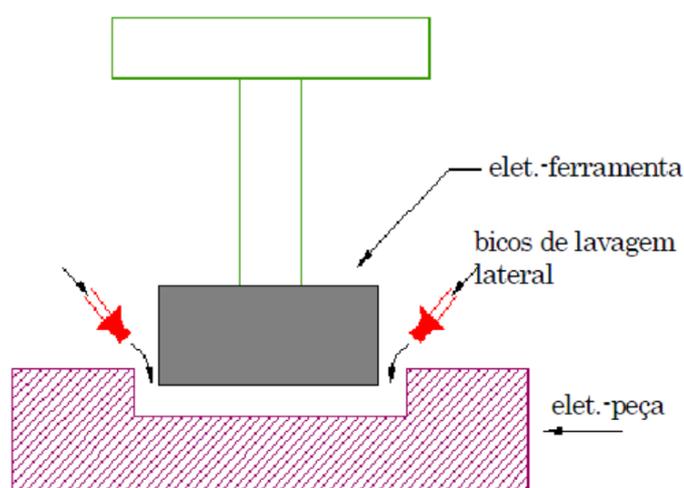


Figura 6 - Lavagem lateral dos produtos da remoção, Drozda (1983).

Para cavidades mais profundas é prática usual alimentar o dielétrico diretamente na fenda de trabalho sob pressão através de furos no eletrodo-ferramenta. De acordo com Drozda (1983), os furos para a lavagem são normalmente posicionados nas áreas onde ocorrerão as maiores profundidades de usinagem. Um espaçamento uniforme entre os furos e em relação à borda do eletrodo-ferramenta melhora o fluxo do dielétrico. Recomenda-se utilizar furos com diâmetros maiores para uma boa vazão do fluido dielétrico. A Figura 7 mostra esse tipo de lavagem em EDM.

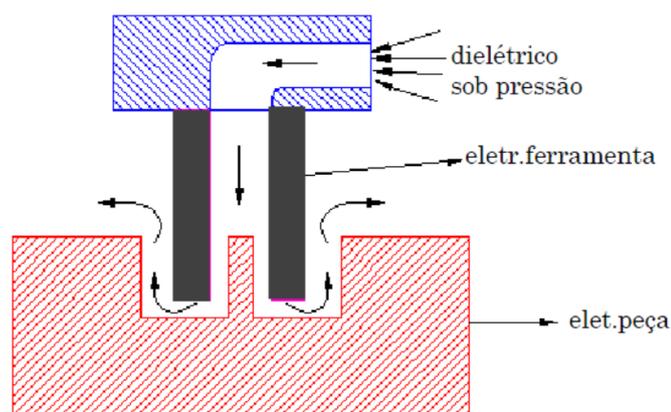


Figura 7 - Lavagem por pressão pelo eletrodo-ferramenta, Drozda (1983).

O sistema de lavagem por pressão pelo eletrodo, provoca alteração na forma geométrica da cavidade, gerando paredes cônicas em furos laterais longos, conforme apresentado na Figura 8.

A explicação para esta imprecisão geométrica é encontrada na movimentação das partículas da fenda de trabalho em direção às paredes da cavidade, ou seja, as partículas eletroerodidas no ponto A devem passar pelo ponto B, onde as mesmas acabam se concentrando. Como as partículas metálicas são condutoras de eletricidade, facilitam a ocorrência de faíscas elétricas indesejáveis próximas ao canto do eletrodo (ponto B), gerando a conicidade. Todavia, chega um instante em que a fenda de trabalho entre o eletrodo e as paredes das cavidades, atinge uma dimensão que diminui ou impossibilita a ocorrência de faíscas laterais. A partir desse ponto observa-se a redução na formação de conicidade da cavidade (ponto C).

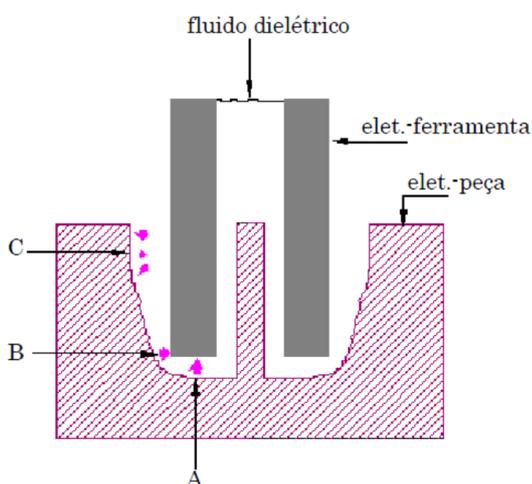


Figura 8 - Aspectos indesejáveis provocados pela lavagem por pressão pelo eletrodo, Drozda (1983).

Uma técnica que reduz o problema de conicidade pela dificuldade de remover as partículas metálicas, é o sistema de lavagem através de sucção do dielétrico pelo eletrodo, representado na Figura 9. Neste caso, o fluido dielétrico limpo é alimentado na fenda de trabalho e as partículas eletroerodidas são succionadas através dos furos presentes no eletrodo-ferramenta, reduzindo a possibilidade da ocorrência excessiva de faíscas nas paredes laterais da cavidade.

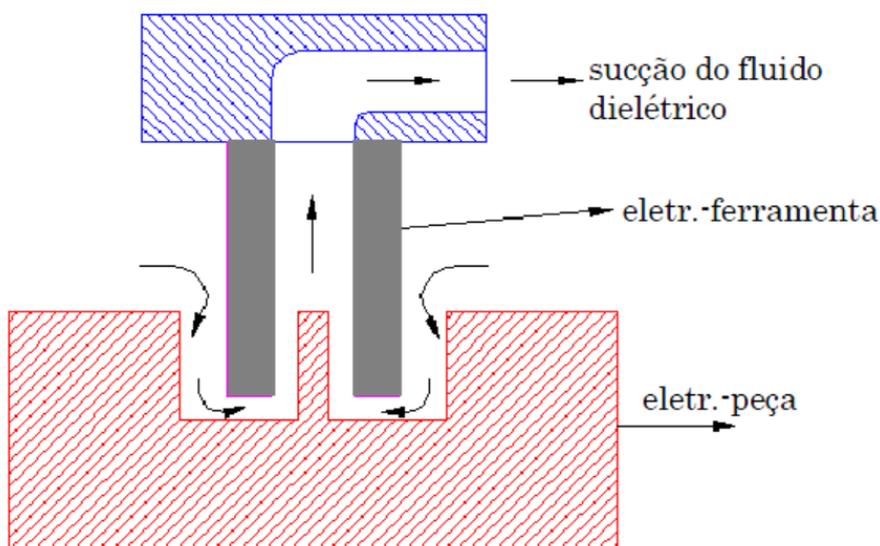


Figura 9 - Lavagem por sucção das partículas através do eletrodo, Drozda (1983).

Bruyn (1970), informa que outro problema pode ser causado através da pressão de fluido dielétrico pelo eletrodo, alterando assim o fundo da cavidade em usinagem e a superfície do eletrodo-ferramenta, como mostrado na Figura 10.

Neste caso, ocorre na lavagem por pressão, a saída do fluido dielétrico no orifício do eletrodo é limpo e ao passar pela cavidade acontece um aumento dos gradientes de temperatura e concentração das partículas eletroerodidas.

Por este motivo, analisando em função da cavidade, no local de entrada do dielétrico ocorre menor número de descargas que no local de saída, já que a sobreconcentração de impurezas facilita a ocorrência das faíscas elétricas naquela posição. Sendo assim, a remoção de material e o desgaste relativo são mais acentuados no local de saída do fluido, causando a deformação do fundo da cavidade.

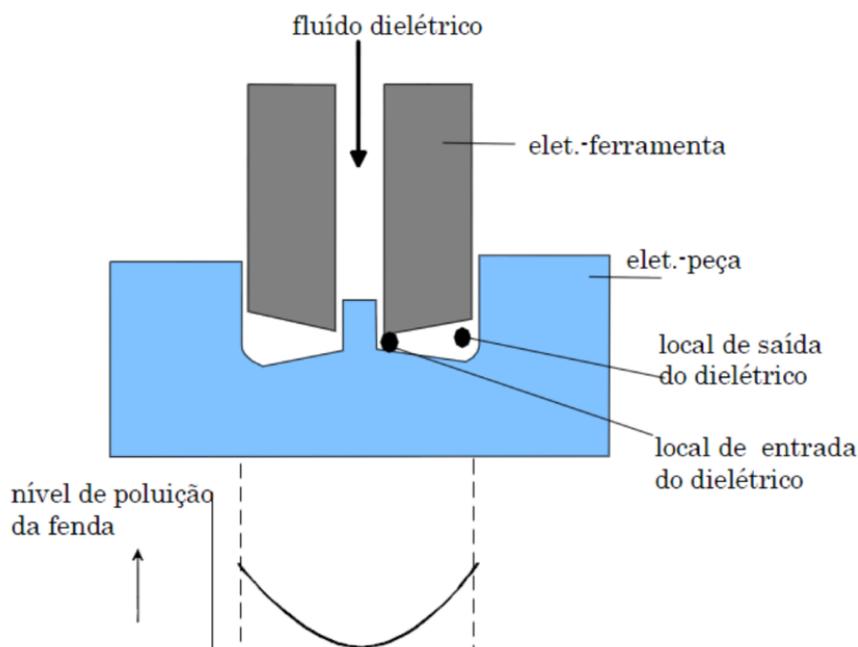


Figura 10- Deformação do fundo da cavidade provocada pela lavagem por pressão através do eletrodo, Bruyn (1970).

Bruyn (1970), ainda em seu estudo, recomenda que para uma boa condição de lavagem, é necessário controlar rigorosamente a pressão e a vazão do dielétrico pela fenda para cada caso específico de trabalho a ser executado. Como regra geral, é possível estabelecer que os valores das grandezas taxa de remoção do material e desgaste relativo são ótimos para uma vazão mínima de dielétrico pela fenda de trabalho. No entanto, existe um limite mínimo, pois caso a vazão seja muito baixa não ocorrerá retirada adequada das partículas eletroerodidas, o que vem a causar deterioração do processo.

Para trabalhos complexos de usinagem é comum adotar como forma de melhoria das condições de lavagem a movimentação pulsada na direção vertical do eletrodo-ferramenta. Este movimento do eletrodo de avanço e retrocesso em relação à cavidade gera um efeito de bombeamento, o qual facilita a expulsão das partículas eletroerodidas da fenda de trabalho, como mostra a Figura 11. O tempo do movimento de avanço e de retração em algumas máquinas pode variar de 0,1 a 12,8 s, sendo que no avanço ocorre uma sequência de descargas elétricas e no movimento de retração não há fornecimento de energia.

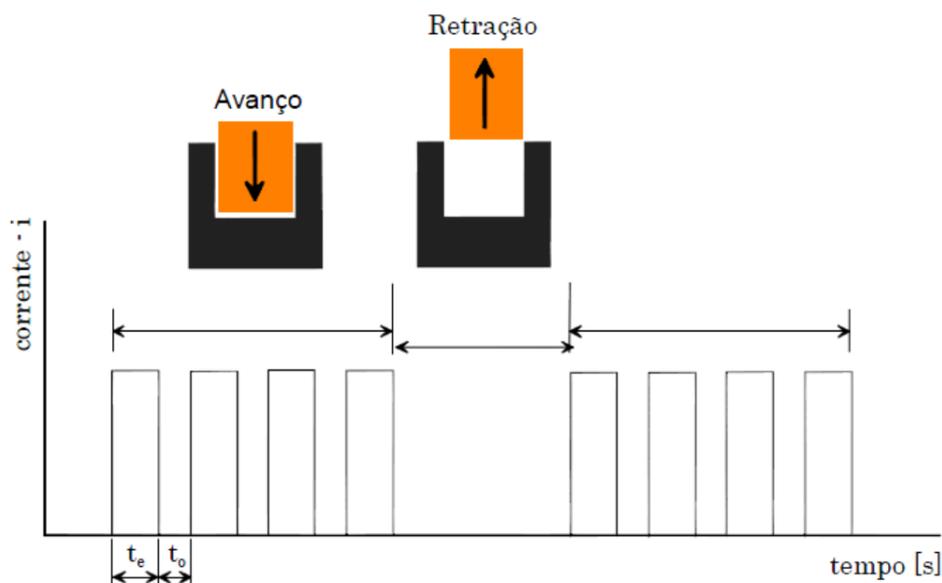


Figura 11 - Representação dos tempos de avanço e retração dos eletrodos.

## 2.6 Fluidos dielétricos

Um bom fluido dielétrico deve apresentar como pontos de qualidade a ionização rápida após a descarga elétrica e que possua alta força dielétrica para sua função de isolante até que o momento que ocorre a tensão de desequilíbrio e o fenômeno da formação do canal de plasma.

Entre as principais funções do dielétrico estão o controle da potência de abertura do arco, provocado pela descarga elétrica, remoção das partículas erodidas da cavidade da peça, refrigeração da peça e do eletrodo-ferramenta e proteção contra oxidação durante e após o processo de usinagem EDM.

O querosene foi por muito tempo utilizado como fluido dielétrico. Porém atualmente não tem grande aceitação nos processos de EDM, devido a problemas com a saúde ocupacional e a agressividade. Assim, houve a substituição por óleos de origem mineral e sintética. Atualmente, são amplamente utilizados óleos a base de hidrocarbonetos como fluido dielétrico.

Uma das mais importantes propriedades do dielétrico é o ponto de fulgor, que deve ser observado para evitar sérios acidentes. A máquina de eletroerosão deve ter um sistema fechado de abastecimento de dielétrico que possa permitir uma boa filtragem e manter a temperatura desse fluido constante a temperatura ambiente.

Klocke et al. (2004) têm investigado a influência das partículas de pó suspenso, em EDM e especialmente na fenda de trabalho, sobre a expansão

térmica no dielétrico e na zona de influência dos eletrodos, para analisar as alterações da composição da camada de reformulação na superfície da peça de trabalho. Na Figura 12, mostra-se o fluido dielétrico na cuba da máquina de EDM.



Figura 12 - Exemplo de uso do fluido dielétrico em EDM, óleo hidrocarboneto.

## 2.7 Integridade de superfície

A análise de superfícies é um importante fator do resultado de um processo de fabricação, e tem relações muito fortes com o desempenho técnico da superfície. Apesar da aceitação da topografia de superfície como fator relevante para o desempenho da superfície em termos de solicitação mecânica, como na resistência a fadiga, existem condições subsuperficiais e microestruturais alteradas durante a usinagem que também contribuem no desempenho do componente (HIOKI, 2006).

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

Segundo König e Klocke (1997), a influência térmica da eletroerosão na vida de uma ferramenta de moldagem pode-se apresentar o seguinte comentário: um dos fatores preponderante para a redução da vida do molde está mais relacionado às tensões residuais, as quais podem gerar microfissuras que, sob carregamento,

transformam-se em trincas e acabam por reduzir a resistência à fadiga do material. A rugosidade e profundidade das zonas termicamente afetadas exercem pequena influência sob a vida da ferramenta.

As superfícies geradas por eletroerosão possuem três camadas bastante claras: A camada refundida, comumente chamada camada branca (*white layer*), a camada termicamente afetada e o material não afetado (HO e NEWMAN, 2003). A Figura 13 mostra as três camadas existentes em uma superfície usinada por eletroerosão.

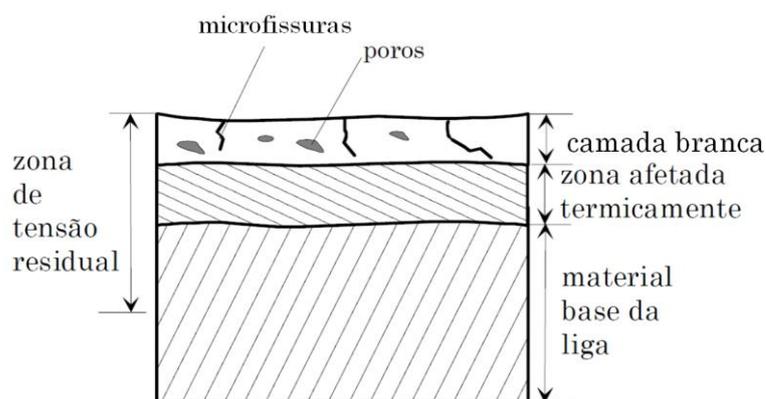


Figura 13 - Representação esquemática da seção transversal de amostra eletroerodida (AMORIM, 2002).

- a) Camada superficial branca. Na superfície das peças, após a interrupção da descarga, observa-se a presença de uma camada superficial formada pela parte do material liquefeito durante a descarga e não expelido pela lavagem, o qual é solidificado na própria cratera e em regiões vizinhas. Esta camada apresenta mudanças químicas devido à interação com subprodutos do dielétrico e do próprio eletrodo-ferramenta, e modificações na sua estrutura por causa da rápida solidificação do material. Normalmente, possui composição e estrutura bastante heterogêneas e apresenta propriedades mecânicas completamente diferentes daquelas encontradas no material base da liga (AMORIM, 2002). É natural um aumento da dureza superficial de materiais metálicos na camada branca devido à formação de carbonetos complexos na superfície por reações a altas temperaturas com o carbono presente no dielétrico (HO e NEWMAN, 2003). Em regimes de usinagem de desbaste, observa-se a presença de muitas

microfissuras e poros ao longo da camada superficial. No entanto, estas microfissuras normalmente não se propagam até o material base. Da mesma forma, é notado também que a resistência à corrosão e ao desgaste abrasivo apresentam comportamentos diferentes daqueles do material base. Porém, durante a utilização da ferramenta, devido aos esforços de moldagem pode haver a propagação destas microfissuras, as quais, por sua vez, vêm proporcionar redução da vida do molde.

- b) Zona termicamente afetada. Esta camada está situada logo abaixo da camada superficial. Uma importante diferença dessa camada é que a mesma não sofreu fusão. Entretanto, apesar de não haver contato com o dielétrico, o calor irradiado pelo plasma é suficiente para promover modificações em sua estrutura e composição química devido ao fenômeno de difusão de átomos de áreas com maior concentração para aquelas de menor concentração atômica. A zona afetada termicamente é, usualmente, composta de várias camadas, quase sempre difíceis de serem diferenciadas. No caso dos aços, é observada, logo abaixo da camada superficial branca, a presença de uma camada temperada e depois desta uma camada revenida (AMORIM, 2002).
- c) Zonas de tensão residual. O alto gradiente de temperatura, promovido pelo ciclo de aquecimento e refrigeração do material durante a eletroerosão, ocasiona a formação de uma zona de tensão residual que parte da camada superficial até áreas bem próximas ao material base da liga. Essas tensões residuais podem causar microfissuras que sob carregamento da ferramenta podem se propagar até o material base.

Em relação à textura superficial das peças após a usinagem pode-se estabelecer que com o aumento da energia da descarga  $W_e$ , ou seja, maiores picos de corrente  $\hat{i}_e$ , observa-se uma elevação proporcional da rugosidade. O mesmo comportamento é percebido para a espessura da camada superficial e das zonas termicamente afetadas. Isto é, quanto mais energético é o processo maiores são as espessuras destas zonas.

A medição da rugosidade da superfície é o parâmetro mais utilizado para definição da superfície obtida. A maior parte das publicações se refere aos

tradicionais parâmetros bidimensionais de rugosidade. Destes, são mais utilizados o  $R_a$  e o  $R_t$  embora outros parâmetros, como  $R_y$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ , estejam ganhando espaço (FUKUZAWA et al., 2004; HAN e KUNIEDA, 2004).

## **2.8 Características do eletrodo e principais materiais utilizados**

Drozda (1998) explica que o eletrodo ferramenta é responsável pelo transporte da corrente elétrica para a peça. Portanto, qualquer material que apresente condutividade elétrica pode ser utilizado como eletrodo ferramenta. Apesar do processo de EDM ser considerado como um processo com praticamente zero de esforço mecânico, cada centelha individual é um processo violento em escala microscópica, exercendo considerável estresse no material do eletrodo. O comportamento do material do eletrodo frente a diversas centelhas simultaneamente será um fator significativo na determinação do desempenho do material do eletrodo em relação ao desgaste e acabamento de superfície.

As propriedades mecânicas tem grande influência na fabricação do eletrodo e pouco durante a usinagem no processo de EDM (KERN, 2008). No entanto, as propriedades termofísicas do eletrodo tem influência considerável sobre o desempenho do processo em termos de desgaste do eletrodo e de integridade da superfície da peça. As principais propriedades termofísicas a serem observadas são a condutividade térmica e elétrica, a expansão térmica, as temperaturas de fusão e ebulição (AMORIM e WEINGAERTNER, 2007).

Os principais materiais utilizados na fabricação de eletrodos para o processo de EDM são o cobre, a grafita e o cobre-tungstênio. Os dois primeiros são mais utilizados na usinagem de aços em geral com melhor custo/benefício e o cobre-tungstênio, para a usinagem de alta precisão. Estes materiais são disponíveis em diferentes classificações ou ligas. Segundo Drozda (1998), as principais características desses materiais são:

a) Eletrodo de Cobre: o cobre é classificado como um material puro ou como cobre eletrolítico. Pode ser utilizado para obter uma ótima superfície de acabamento. Ao ser polido, pode gerar uma superfície com rugosidade de até  $R_a = 0,25 \mu\text{m}$ . Os eletrodos de cobre também promovem produção seriada e são aplicados nas produções de geometrias complexas a baixo custo. Para a indústria de equipamentos médicos o eletrodo de cobre apresenta grande vantagem sobre o

eletrodo de grafita devido à sua capacidade de polimento e menor degradação de partículas durante a usinagem;

b) Eletrodo de Cobre-Tungstênio: este material de eletrodo é recomendado para aplicações de usinagem que necessitam de alto acabamento, alta precisão e ainda para materiais de difícil aplicação da usinagem por EDM. O cobre-tungstênio possui ótima resistência ao desgaste térmico e é menos suscetível a rupturas ou fraturas quando comparado com a grafita, para usinagem de cavidades profundas. O cobre-tungstênio possui pior usinabilidade quando comparado ao cobre eletrolítico. Este material está na classe dos materiais mais caros para a produção de eletrodos e sua composição é de 70% para o tungstênio e de 30% para o cobre;

c) Eletrodo de Grafita: este material é muito utilizado na fabricação de eletrodos para a EDM. A classificação é realizada através da sua granulometria, que varia entre partículas de tamanho que chegam a 0,20  $\mu\text{m}$ , considerado de baixa densidade, e podem chegar a partículas de tamanho de 0,013  $\mu\text{m}$ , considerado de alta densidade. O custo do eletrodo de grafita é menor para as classes de partículas de baixa densidade. A grafita de granulometria alta é utilizada normalmente para usinagem de desbaste na EDM e as de granulometria baixas, aplicadas para a usinagem em regime de acabamento. Normalmente, a grafita proporciona alta taxa de remoção de material quando comparado com eletrodos de materiais metálicos para a usinagem de aços. A confecção da geometria do eletrodo de grafita pode ser realizada por torneamento, fresamento e furação. Porém, é importante ter cuidado especial ao realizar a usinagem do eletrodo de grafita, pois apresenta o inconveniente de gerar alta quantidade de pó e estas se depositam nas guias das máquinas-ferramenta resultando no desgaste prematuro do equipamento e conseqüentemente na redução da vida útil deste equipamento (DRODZA, 1998).

Na análise realizada por Klocke et al. (2013), onde duas classes de grafites foram comparadas na usinagem de aço ferramenta em operação de desbaste, as experiências revelaram que a corrente de descarga é a principal influência sobre a taxa de remoção de material, e a duração de descarga é a maior influência sobre o desgaste da ferramenta. Levando em consideração a classificação típica de materiais de grafite, a análise detalhada mostrou que não existe ligação direta entre o desempenho e o tamanho do grão sobre taxa de remoção de material e desgaste da ferramenta. Os testes revelaram que a condutividade elétrica tem grande influência no parâmetro taxa de remoção do material utilizado. A influência sobre o

desgaste da ferramenta não é tão óbvia, mas parece ser uma combinação do tamanho de grão e resistência elétrica, pelo menos, de acordo com o número limitado de propriedades dos materiais que foram investigados. Pode-se observar um fenômeno no decorrer da investigação realizado por Klocke et al. (2013), um aumento da massa do eletrodo, em vez do desgaste da ferramenta acontecer. O aumento da massa do eletrodo foi explicado por um acréscimo de material da peça de trabalho nas arestas do eletrodo através de certos parâmetros. Um profundo conhecimento desse fenômeno pode melhorar a constância perfil do eletrodo e otimizar o desgaste da ferramenta usando o controle de processo.

## **2.9 Fatores que influenciam no desgaste do eletrodo.**

Como a ferramenta e a peça são considerados um par de eletrodos no processo de EDM, o processo de desgaste da ferramenta é semelhante ao mecanismo de remoção de material. O desgaste do eletrodo é um problema a ser considerado muito importante no processo de usinagem EDM (PHAM, et al., 2004).

Os principais parâmetros elétricos e não elétricos que afetam o desgaste do eletrodo são:

- a) Corrente de descarga: o aumento da corrente de descarga ( $i_e$ ) resulta em maiores quantidades de energia elétrica (equação 01), fundindo uma grande quantidade de material e com grandes crateras formadas em ambas superfícies da peça e do eletrodo (CROOKALL, 1979; COGUN, POYRAZOGLU, 2001);
- b) Duração de pulso: o aumento da duração de pulso de tensão ( $t_i$ ) tem influência significativa no desgaste do eletrodo. Isto é devido, principalmente, ao decréscimo na densidade de corrente do espaço do canal de descarga e o aumento no tempo de transferência de calor a partir da cratera derretida para o corpo da ferramenta, o que resulta em menos material a ser removido da cratera na proporção de duração de pulso (COGUN, AKASLAN, 2002; CHEN, MAHDAVIAN, 1999; MOHRI et al., 1995). Relata-se que com longa duração de pulsos, o carbono proveniente da decomposição dos hidrocarbonetos (do líquido dielétrico) e o metal fundido proveniente do aço carbono (material da peça) conferem uma camada à superfície da ferramenta. Esta camada

- depositada aumenta a resistência ao desgaste da ferramenta (CHEN, MAHDAVIAN, 1999; MOHRI et al., 1995);
- c) Polaridade: em baixos valores para corrente de descarga, a polaridade negativa na ferramenta apresenta menor desgaste do eletrodo, e em altas correntes de descarga, a polaridade não apresenta efeito significativo para desgaste do eletrodo (LEE e LI, 2001);
- d) Método de lavagem, pressão e taxa de fluxo: a introdução do líquido dielétrico na fenda de trabalho baseia-se normalmente em quatro métodos: fluxo normal, fluxo inverso, lavagem de imersão e jato de lavagem. Em um sistema de lavagem através da ferramenta, o desgaste da ferramenta é menor quando comparado com o sistema direto pela lateral. Isto é, devido a menor temperatura do fluido dielétrico, menor volume de gás e menor contaminação (KOENIG et al., 1977). Na parte experimental deste mesmo estudo, verificam que o desgaste do eletrodo aumenta na direção da vazão do dielétrico. Por exemplo, o ângulo de inclinação da superfície frontal da ferramenta  $\varnothing$  (Figura 14) sofre alterações, aumentando com a diminuição do diâmetro da ferramenta e, também, com o aumento da vazão de dielétrico. Masuzawa e Heuvelman (1983) relatam que vibrações na direção vertical e horizontal da ferramenta gerando uma movimentação no líquido dielétrico no interior da cavidade e que esse fenômeno aumenta a taxa de remoção de material da peça. Contudo também aumenta o desgaste do eletrodo durante o processo;

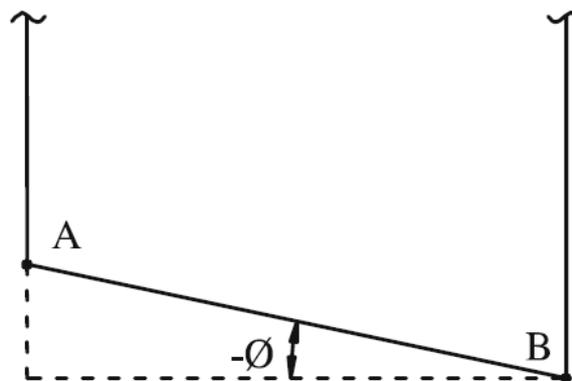


Figura 14 - Ferramenta com ângulo de inclinação da superfície frontal ( $\varnothing$ ).

**e)** Ferramenta e materiais: um material de ferramenta ideal deve proporcionar um máximo de desgaste da peça e mínimo desgaste da ferramenta. Para tanto, o material da ferramenta deve ter:

- e.1)** Temperatura de fusão elevada;
- e.2)** Alta densidade;
- e.3)** Elevado coeficiente de condução de calor;
- e.4)** Elevado calor específico;
- e.5)** Alta energia de coesão;
- e.6)** Elevado calor latente de evaporação.

Todas essas são propriedades que resultam em alta resistência ao desgaste (SAMUEL, PHILIP, 1997). Ferramentas de cobre dão valores mais elevados de desgaste relativo em comparação com os feitos de carboneto de tungstênio e grafite (LEE e LI, 2001). Elevada temperatura de fusão e energia de coesão do material da peça podem causar desgaste superior da ferramenta (LEE e LI, 2001; JESWANI, 1979; LONGFELLOW, WOOD e PALME, 1968).

**f)** Geometria da ferramenta e a área de usinagem: experiências conduzidas usando um eletrodo de aço cilíndrico mostraram que eletrodos com diâmetros pequenos, apresentam maior desgaste com correntes de descargas ( $i_e$ ) crescentes, assim como o aumento da tensão média de descarga ( $u_e$ ) também aumenta o desgaste do eletrodo em descargas com baixa corrente elétrica (CHEN, MAHDAVIAN, 1999). Na operação de alargamento de um orifício de 20 mm a 22 mm de diâmetro, verifica-se que o ângulo do cone do lado da superfície da ferramenta cilíndrica aumenta muito rapidamente no início da usinagem. Entretanto não mostra uma notável variação com o tempo após certa profundidade de afundamento ferramenta (MOHRI et al., 1994).

**g)** Movimentação da ferramenta: na investigação experimental realizada por Chen, Wang e Lin (2013), três movimentos diferentes do eletrodo foram utilizados para obter uma cavidade quadrada. As análises apresentadas esta em função do desgaste do eletrodo na usinagem de um aço ferramenta. O movimento mergulho em linha reta produz um desgaste uniforme do eletrodo quando comparado com o movimento de mergulho com movimento espiral e com o movimento de mergulho com movimento rotacional no final. O eletrodo

com movimento de mergulho espiral apresenta resultado de degrau no percurso do movimento na superfície da parede.

## 2.10 Tipo de desgaste do eletrodo

A ocorrência de desgaste do eletrodo/ferramenta é inevitável nos processos de usinagem por EDM, e é uma questão muito importante uma vez que a degradação da forma da ferramenta afeta diretamente a forma final da cavidade. Para melhorar a precisão da usinagem na geometria de uma peça de trabalho é necessário que se estabeleçam métodos para detectar o desgaste do eletrodo da ferramenta, bem como compensar o desgaste deste.

O desgaste do eletrodo é caracterizado em quatro tipos: volumétrico, lateral, canto e frontal. O desgaste de canto influencia diretamente a geometria da cavidade podendo ser em alguns casos compensados (JHA et al., 2011). Os métodos para avaliar a relação de desgaste do eletrodo são por meio de medição do peso, da forma/geometria, do tamanho/dimensional e do volume total.

A mais usual é medir a diferença de peso antes e depois da usinagem e transferir para volume através da densidade do material. A Figura 15 mostra os tipos de desgastes do eletrodo durante a usinagem. A região entre os pontos A e B representam o desgaste de frontal, entre os pontos B e C esta o desgaste de canto e entre os pontos C e D o desgaste lateral.

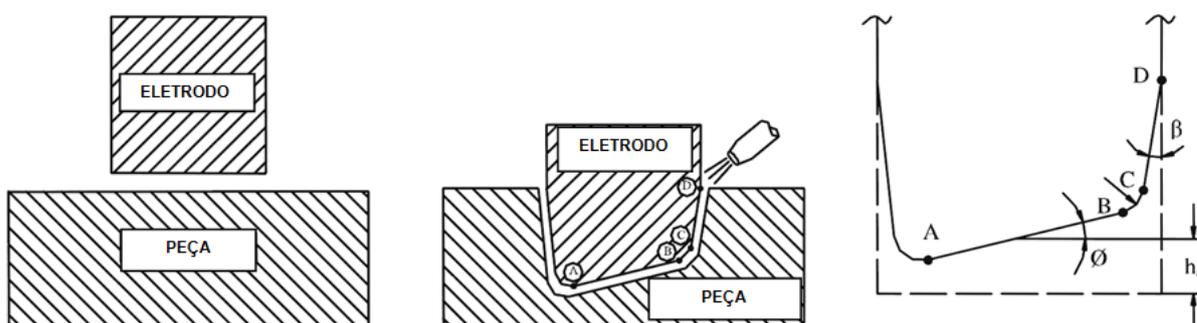


Figura 15 - Características geométricas do desgaste do eletrodo.

O desgaste lateral é representado pelo ângulo da superfície lateral ( $\beta$ ) do eletrodo. Em muitos trabalhos de pesquisa (COGUN e AKASLAN, 2002; MOHRI et al., 1995), o desgaste lateral é negligenciado, uma vez que tem um ângulo muito pequeno. As outras características geométricas de desgaste da ferramenta, o

desgaste frontal e desgaste de aresta, são muito mais evidentes do que o desgaste lateral e, são em grande parte, responsáveis pela degradação da forma da ferramenta e, caso não haja compensação, da geometria da peça de trabalho.

O desgaste de canto é apresentado na forma de arredondamento das arestas de usinagem e é representado geometricamente por um arco de círculo (COGUN e AKASLAN, 2002; MOHRI et al., 1995; CROOKALL e FEREDAY, 1973). As experiências realizadas utilizando ferramentas de latão em forma de “V” com ângulos de ponta de 60, 90 e 120°, indicaram que o raio da ponta é aumentado muito rapidamente no início da usinagem, mas o arredondamento da ponta é estabilizado com o decorrer da usinagem (CROOKALL e FEREDAY, 1997-1999).

O desgaste frontal é caracterizado pela parte dianteira da superfície, geralmente é a área de maior desgaste. O aumento da vazão dielétrica, corrente de descarga ( $i_e$ ) e duração do pulso da descarga ( $t_e$ ) aumenta o valor do ângulo de inclinação da superfície frontal ( $\theta$ ), entre estes parâmetros, o que tem o maior efeito é a corrente de descarga (KOENIG et al., 1977).

### **2.11 Pesquisas na área de desgaste de canto em EDM.**

Mohri et al. (1994), apresentam um método de medição da mudança de forma do eletrodo e da peça de trabalho durante a usinagem através de uma sonda, calibrada por sistema de poliedros. O mecanismo consiste de uma máquina de EDM com posição controlada numericamente. Como sonda, foi utilizada uma caneta de rugosímetro de superfície e como sensor para deslocamento de medição linear, o LVDT (transformador diferencial linear variável), sendo os dados enviados para um computador juntamente com a posição do NC da máquina-ferramenta.

Em um dos ensaios realizados por Mohri et al. (1994), para validar o método de medição, foram conduzidos ensaios com eletrodo de cobre, de seção cilíndrica com diâmetro de 22 mm, para realizar um furo em uma chapa de aço carbono com pré-furo de 20 mm. Verificou-se que o ângulo de inclinação da superfície frontal aumentou no início da usinagem e a partir de um determinado tempo, houve a estabilização do ângulo, concluindo que a taxa de desgaste do eletrodo depende da geometria do mesmo conforme mostra a Figura 16-a. Nos mesmos ensaios realizados por Mohri et al. (1994), a medição do eletrodo ocorre em tempos determinados pelo autor, conseguindo resolução de microns.

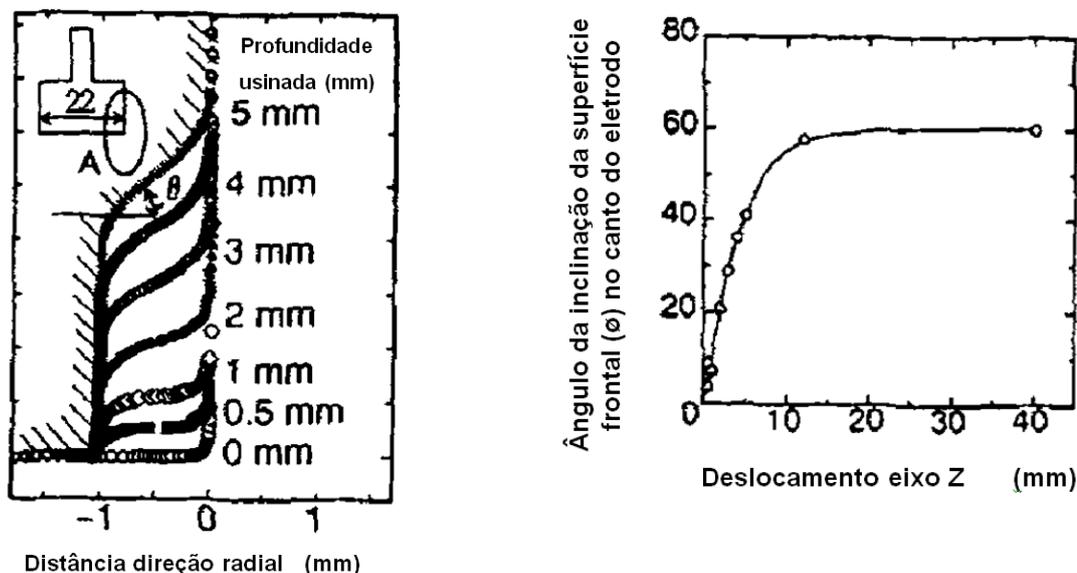


Figura 16 – a) Geometria do eletrodo durante a usinagem; b) Ângulo de inclinação da superfície frontal durante a usinagem, Mohri et al. (1994).

Experimentos realizados por Mohri et al. (1995), visando o mecanismo de desgaste dos eletrodos em fase de transição (durante a usinagem) e em fase estacionária (fim da usinagem), utilizando eletrodo de cobre com geometria cilíndrica de 10 mm, em aço carbono, confirma que no tempo de usinagem de 106 minutos o raio gerado no desgaste de aresta é dez vezes o valor do desgaste frontal e que no início da usinagem esse valor é bem maior (Figura 16-b).

Em outros ensaios realizados por Mohri et al. (1995), a usinagem utilizando eletrodo de cobre em aço carbono, apresentou um desgaste bem menor do eletrodo comparado com a usinagem de liga de latão, zinco e cobre. Esse fato é explicado por ligações muito fortes na superfície do eletrodo quando na usinagem de aço carbono com fluido dielétrico hidrocarboneto. Essas ligações são chamadas carbono turboestrático que é um laminado de cristais bidimensionais de carbono com fase aleatória.

Mohri et al. (1995) faz relação entre o carbono turboestrático e o carbono equivalente, utilizado no mecanismo de precipitação de grafite em ferro fundido, sendo que quanto maior o valor do carbono equivalente, menor o desgaste do eletrodo. Porém em materiais com grandes quantidades de Níquel e Cromo, o carbono equivalente tem dificuldades para precipitar, sendo os elementos considerados catalisadores conforme mostra Figura 17.

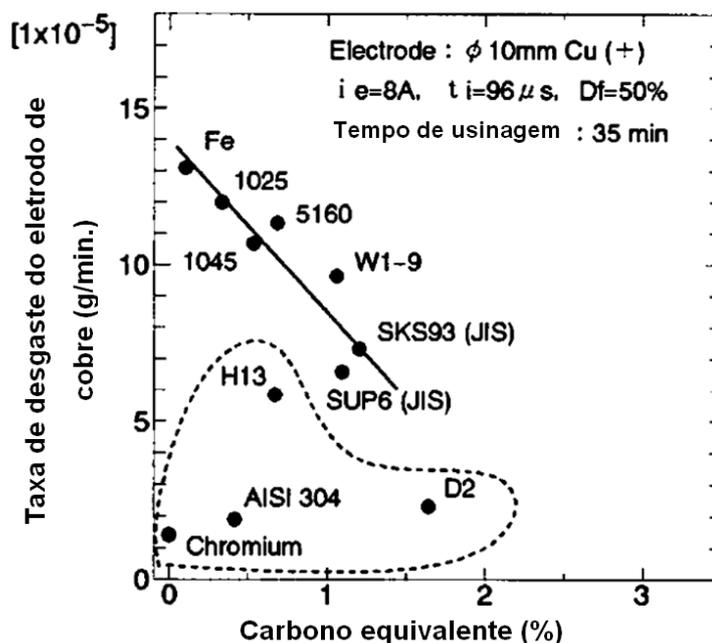


Figura 17 - Relação entre carbono equivalente e taxa de desgaste do eletrodo de cobre, Mohri et al. (1995).

A pesquisa de Marafona (2007), faz comparação do carbono equivalente com o a taxa de desgaste do eletrodo, e conclui que quanto menor a equivalência do carbono, maior é a taxa de desgaste do eletrodo. Seus ensaios foram realizados com eletrodos de cobre tungstênio e aço ferramenta com alto teor de carbono. Este mesmo autor (MARAFONA, 2007), afirma que no início da usinagem o carbono equivalente é baixo e aumento durante o decorrer do processo, reduzindo assim a taxa de desgaste do eletrodo.

Estudos realizados por Aas (2004), com o objetivo de escolher a opção com maior rendimento entre duas classes de grafitas com granulometrias diferentes, na fabricação de fendas estreitas e profundas em uma liga de Níquel, diz que se o parâmetro corrente de descarga ( $i_e$ ) for definido como alto (acima de  $0,1 A/mm^2$  na superfície frontal), são criadas condições de usinagem instáveis com descargas de arco e curtos circuitos, sendo na maioria das vezes localizados nos cantos afiados, podendo sobrepor os desgastes de arestas laterais e assim aumentar o desgaste frontal conforme a Figura 18. Dentre as classes analisadas para atingir uma determinada profundidade, uma apresenta boa rentabilidade levando em consideração a taxa de remoção de material e a quantidade de eletrodos fabricados

para uma produção seriada, e a outra classe de grafite apresenta baixo desgaste do eletrodo, reduzindo o custo na fabricação do eletrodo.

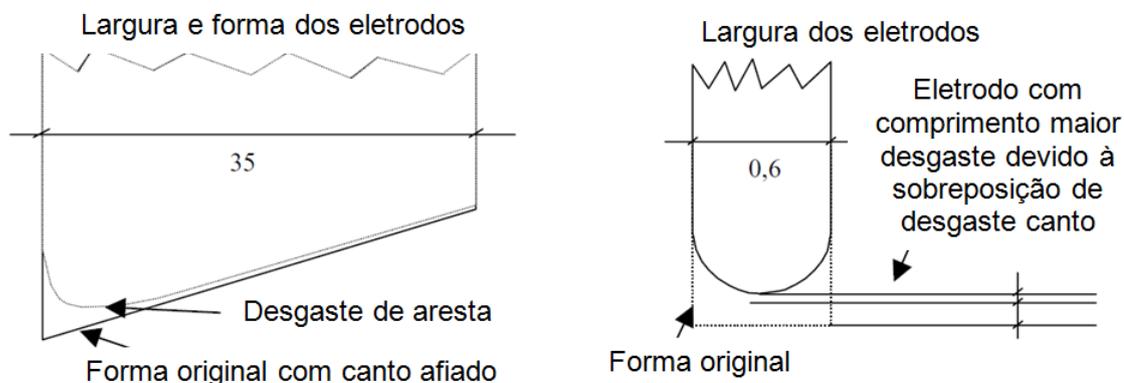


Figura 18 - Geometria crítica do eletrodo em condições de usinagem extrema, Aas (2004).

Em uma investigação experimental realizado por Ozgedik e Congum (2006), pode-se encontrar as características geométricas do desgaste da ferramenta variando a corrente de descarga ( $i_e$ ), duração de pulso ( $t_i$ ) e o método de lavagem, sendo utilizado eletrodo de cobre, com geometria cilíndrica com 22 mm e furo de 4 mm no centro para passagem do fluido dielétrico. A peça de trabalho utilizado foi fabricado em aço carbono. Para realizar as medições, os eletrodos foram cortados ao meio, pelo processo de EDM a fio, sendo em seguida escaneados por um *scanner* de alta resolução, utilizando um *software* de imagens.

Foram marcados 250 pontos do perfil de desgaste do eletrodo na imagem, tomando como referência de coordenadas cartesianas (X e Y), o centro de simetria do eletrodo e a face frontal de usinagem antes do desgaste. Através de análise de regressão, foi comprovado que funções exponenciais, modeladas matematicamente para obter os perfis de desgaste de aresta interno e externo do eletrodo, podem ser perfeitamente utilizadas, obtendo arcos de círculos na representação.

Nesse mesmo estudo, conclui-se que com o aumento da corrente de descarga, há um aumento no desgaste de canto, assim como o aumento da duração de pulso leva ao aumento da taxa de desgaste, com diminuição do desgaste de canto. Já com relação ao fluido dielétrico, um maior desgaste de superfície frontal e desgaste de canto são observados no local de entrada do fluido dielétrico em comparação com o local de saída do fluido conforme apresentado na Figura 19.

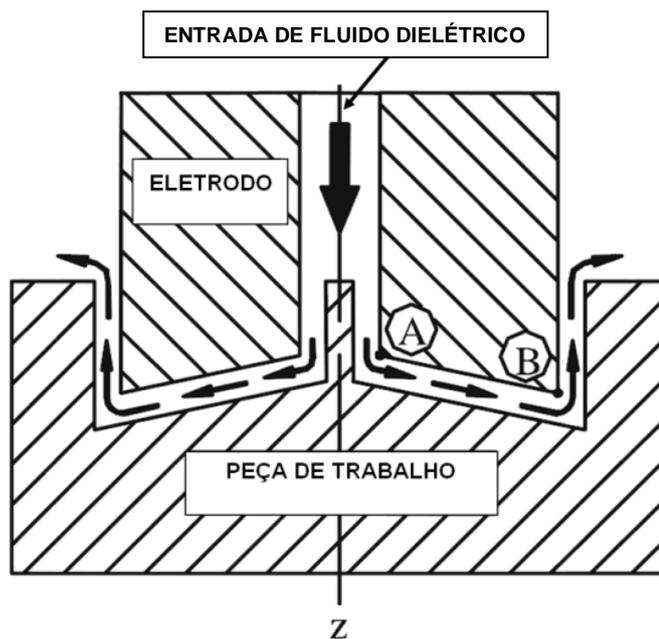


Figura 19 - Desgaste do eletrodo no sistema de lavagem por injeção interna do fluido dielétrico.

Em um estudo recente, Amorim et al. (2010) fez ensaios utilizando eletrodos de geometria quadrada de 7 mm de cobre tungstênio na usinagem de acabamento em aço ferramenta AISI H13, focando a compreensão da relação entre os parâmetros de processo para a modificação da forma do eletrodo no decorrer do tempo de usinagem, medindo o desgaste de canto.

Observa-se que para os primeiros 20 minutos de usinagem o desgaste do raio de canto aumentou abruptamente passando do valor inicial de 11  $\mu\text{m}$  para 200  $\mu\text{m}$  e a partir do tempo de 100 minutos de usinagem o desgaste de aresta começa a estabilizar sem apresentar valores significantivos.

Explica-se que este fenômeno está relacionado com a precipitação do carbono ao longo do raio de ponta do eletrodo, sendo esse carbono liberado por pirólise do fluido dielétrico (hidrocarboneto) e do material da peça de trabalho (aço ferramenta). Outra explicação seria que em pontas afiadas do eletrodo, a ocorrência de precipitação de carbono é dificultada, por esse motivo, só ocorrendo a partir de determinado arredondamento da aresta, apresentando um crescimento estável do desgaste de aresta do eletrodo.

Murray, Zdebski e Clare, (2012), em trabalho de pesquisa para compreender o fenômeno do gap de descarga, quando retirado material da peça e solidificado rapidamente no eletrodo pela ejeção do fluido dielétrico, explica que o reatamento dos detritos para o eletrodo ferramenta não ocorre aleatoriamente, mas é

dependente da sua refusão no dielétrico pelo processo de descarga secundário. Observa-se também que o material depositado sobre o eletrodo ferramenta pode oferecer um efeito de proteção contra o desgaste de outras descargas secundárias e assim potencialmente aumentar a vida útil da ferramenta.

Duas superfícies de desgaste foram caracterizados nos eletrodos após usinagem das cavidades conforme Figura 20. A região desgaste primário, ocorreu nas extremidades e nas laterais do eletrodo e a região de desgaste secundário acima deste. A região de desgaste principal é irregular, com pouca deposição do material da peça após usinagem. A ação alternativa do eletrodo, com o intuito de oscilar o fluido dielétrico e eliminar os material fundido da cavidade, não elimina as faíscas laterais do eletrodo nas ranhuras profundas, com todos os eletrodos, mostrando evidências de descarga secundária. A camada rica em elemento peça fica entre 1  $\mu\text{m}$  e 3  $\mu\text{m}$  de espessura e é observada no eletrodo para a onde não ocorreu usinagem junto a cavidade de todos os eletrodos. Caracteriza-se por uma elevada quantidade de deposição de material da peça e vínculos entre as partículas de tungstênio de um eletrodo baseado W-Cu. A espessura média desta camada aumenta com a corrente e o tempo de usinagem, o que sugere que a espessura da camada, é uma função da energia da faísca e do número total de faíscas.

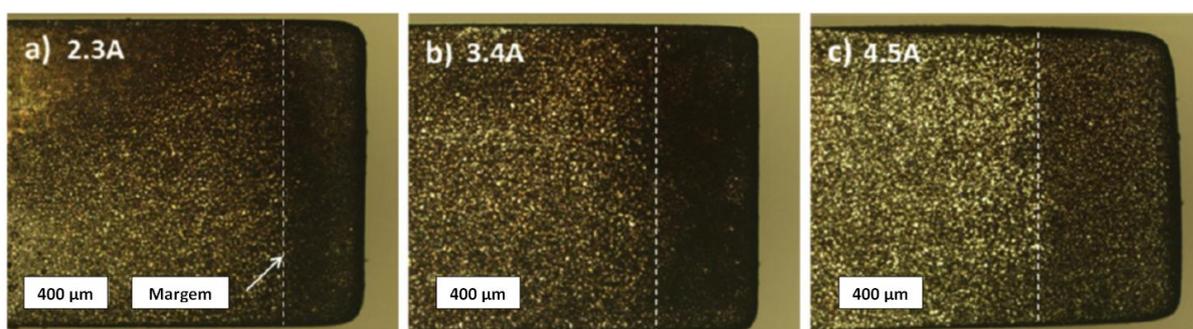


Figura 20 - Divisão de desgaste primário e desgaste secundário conforme Murray, Zdebski e Clare, (2012).

Tsai e Masuzawa (2004) realizaram ensaios com processo de EDM, utilizando um sistema de contato elétrico para medir a variação de tamanho do eletrodo e utilizando um microscópio óptico (resolução de 0,1  $\mu\text{m}$ ) para medir o desgaste de canto. Após a imagem coletada, fazem a estimativa com base em relações geométricas de pontos de interseção com algumas linhas retas conhecidas, e definem a curva de desgaste de canto através de uma equação polinomial.

Tsai e Masuzawa (2004) também relatam que a razão volumétrica de desgaste do eletrodo torna-se pequena para o material do eletrodo com o ponto de ebulição elevado, ponto de fusão elevado e elevada condutividade térmica independente dos materiais da peça de trabalho e que o desgaste de canto refere-se à difusão de calor, sendo o arredondamento mais evidente quando a condutividade térmica do eletrodo é baixa.

A minimização e compensação de desgaste do eletrodo sempre foi um dos motivos principais para estudos em processo de EDM. Orbitar (oscilar) o eletrodo em relação à peça de trabalho melhora a eficiência de lavagem e é a estratégia de usinagem mais comum proposta por estudos nessa área. Os pesquisadores têm proposto vários métodos para compensar o desgaste do eletrodo de maneira uniforme e para compensar esse desgaste sem alterar a geometria e o dimensional, (SNOEYS, STAELENS, DEKEYSER, 1986).

Existem dois métodos de compensação de desgaste do eletrodo: o método de compensação linear (LCM) (NARASIMHAN, YU, RAJURKAR, 2005), onde o valor do desgaste é conhecido através de pré-ensaios ou por sensores que fazem o monitoramento em tempo real e faz a compensação da ferramenta longitudinalmente; e o método de desgaste uniforme (UWM) (MASUZAWA et al., 1998), utilizado em peças com usinagem tridimensional feitas por camadas, fazendo a compensação durante a execução do percurso de deslocamento da ferramenta. Esse método só é possível em máquinas CNC e integradas com sistema CAD/CAM.

Na investigação de Nguyen, Wong e Rahman (2012), fica evidente o quanto importante é conhecer o comportamento do desgaste de canto do eletrodo em EDM. O trabalho realizado, foi a usinagem de uma superfície complexa, com remoção por camadas e trajetória do eletrodo associada com software de CAM, verifica-se que, além da profundidade de usinagem inerente e o desgaste do eletrodo indispensável, o raio de canto do eletrodo virtual também é de suma importância na determinação da precisão de usinagem. Detectou-se que o perfil de erro podia ser reduzida através da aplicação do raio do canto no modelo do eletrodo virtual. Para verificação, micro-geometrias típicas formados por planos inclinados e uma esfera parcial são fabricados com e sem o novo modelo para a geometria do eletrodo virtual.

## 2.12 Aplicações e características dos aços ferramenta e parâmetros de usinagem.

Em se tratando da aplicação do processo de EDM para a indústria de injeção de plásticos, o principal material utilizado como eletrodo-peça é o aço ferramenta.

Esses aços são caracterizados por apresentarem elevadas dureza e resistência à abrasão, normalmente aliados à boa tenacidade e manutenção das propriedades de resistência mecânica, em temperaturas elevadas. Essas características normalmente se mantêm, com adição de altos teores de carbono e ligas como W, Mo, V, Mn e Cr.

A classificação dos aços ferramenta é dada conforme suas características metalúrgicas principais ou de acordo com sua aplicabilidade. A classificação mais usual dos aços ferramenta é a AISI (*American Iron and Steel Institute*), a qual tem se mostrado útil para a seleção de aços ferramenta. Na Tabela 1, os principais tipos de aço ferramenta e o respectivo símbolo. (SILVA et al., 2006)

Tabela 1 - Classificação AISI dos aços ferramentas.

TIPO DE AÇO FERRAMENTA		SÍMBOLO
	Aços temperáveis em água ( <b>Water</b> )	<b>W</b>
	Aços resistentes ao choque ( <b>Shock</b> )	<b>S</b>
Aços para fins especiais.	Tipo baixa liga ( <b>Low alloy</b> )	<b>L</b>
	Aços para moldes	<b>P</b>
Aços para trabalho a frio.	Aços temperáveis em óleo ( <b>Oil</b> )	<b>O</b>
	Aços média liga temperáveis ao ar ( <b>Air</b> )	<b>A</b>
	Aços alto carbono, alto cromo	<b>D</b>
Aços para trabalho a quente ( <b>Hot working</b> ).	Ao cromo	<b>H1 - H19</b>
	Ao tungstênio	<b>H20 - H39</b>
	Ao molibdênio	<b>H40 - H59</b>

Segundo Maciel (2003), as principais características de um aço na fabricação da cavidade de um molde de injeção plástica são:

- a) alta resistência a trincas por fadiga térmica;
- b) excelentes propriedades mecânicas em todas as direções;
- c) maior tenacidade, diminuindo a ocorrência de falhas;
- d) melhor resposta ao tratamento térmico;
- e) excelente reposta ao polimento;
- f) pouco sensível a choques térmicos quando resfriados com água;
- g) boa resistência ao desgaste;

- h) boa usinabilidade;
- i) boa reprodutibilidade.

Na fabricação do molde o componente mais representativo é a cavidade, que pode representar até 75% do custo total do ferramental e pode atingir 40% do seu tempo de fabricação (ALBANO, 2008). Entre os principais processos empregados na confecção da cavidade está a eletroerosão.

Nos últimos anos, pesquisadores têm testado de várias maneiras melhorar a eficiência para o processo de EDM. A maioria das pesquisas são referentes à melhoria das medidas de desempenho e otimização das variáveis de processo, conforme relatam Ho e Newman (2003). A Tabela 2 mostra uma relação de parâmetros de corte aplicados na eletroerosão do aço AISI H13 de acordo com as referências pesquisadas.

Tabela 2 - Relação dos parâmetros utilizados nas pesquisas sobre eletroerosão.

Autor / ano	Pesquisa	Parâmetros
Amorim, Schafer, Stedile e Bassani, 2010	O comportamento sobre os parâmetros e desgaste de aresta do eletrodo de cobre-tungstênio em acabamento de EDM a penetração do aço ferramenta  Material: AISI H13; Eletrodo: cilíndrico e quadrado em cobre-tungstênio; Dielétrico: hidrocarboneto	Eletrodo cilíndrico $\hat{u}_i = 200 \text{ V.};$ $i_e = 2, 4, 8 \text{ A.};$ $t_i = 3,2; 6,4; 12,5; 25; 50 \mu\text{s};$ $t_o = 3,2; 6,4; 12,5; 25; 50 \mu\text{s}.$ Eletrodo quadrado $\hat{u}_i = 200 \text{ V.};$ $i_e = 8 \text{ A.};$ $t_i = 50 \mu\text{s};$ $t_o = 50 \mu\text{s}.$
Pellicer, Ciurana e Delgado, 2009	Influência dos principais parâmetros do processo EDM e diferentes geometrias de eletrodo Material: AISI H13; Eletrodo: quadrado, triangular, redondo, retângula em cobre.	$\hat{u}_i = 80, 120, 160, 200\text{V}$ $i_e = 4,5,6,7\text{A}$ $t_i = 25, 50, 100, 200\mu\text{s}$ $t_o = 3.2, 6, 4, 13, 25\mu\text{s}$
Oliniki, 2009	Influência da combinação entre os parâmetros de usinagem por eletroerosão na integridade superficial do aço AISI H13 temperado e revenido Eletrodo: cilíndrico grafita e cobre Eletrolítico Dielétrico: hidrocarboneto e querosene	$\hat{u}_i = 120;$ $i_e = 8 \text{ A}$ $t_i = 9 \text{ e } 27 \mu\text{s}$ $t_o = 12 \mu\text{s}$

Como última observação sobre este capítulo, destaca-se o entendimento do processo de EDM, o entendimento do fenômeno físico de remoção de material, tipos de desgastes do eletrodo ferramenta, e parâmetros utilizados, permitindo atuar de forma mais adequada, definindo uma estratégia na decisão dos parâmetros do estudo pretendido.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são discriminados os materiais e os métodos utilizados para atingir plenamente os objetivos propostos no capítulo 1.

A Figura 21 apresenta esquematicamente o planejamento geral dos ensaios. Num primeiro momento, foi realizado um pré-ensaio a fim de se determinar os parâmetros a serem utilizados nos ensaios finais. Tal determinação se fez necessária pois adotou-se como definição para a operação de acabamento o resultado final da superfície usinada, conforme explicado na seção 3.1.

Na parte superior da Figura 21, apresentam-se os parâmetros do processo de EDM (peça de trabalho, eletrodo ferramenta, fluido dielétrico / método de lavagem e os parâmetros elétricos) que foram definidos através do pré-ensaio. Após esta definição das variáveis de entrada, realizaram-se testes preliminares em condições de acabamento sobre as condições de lavagem e os parâmetros elétricos, definidos pelo catálogo do fabricante da máquina (ENGEMAQ, 2002) com o intuito de estabelecer uma rugosidade padrão para os três pares de eletrodos que estivessem coerentes com o regime de acabamento.

#### 3.1 Pré-ensaio

Como o objetivo deste estudo é trabalhar com a operação de acabamento em processo de EDM, buscou-se mecanismos para correlacionar os parâmetros elétricos de EDM com a operação de acabamento. Das duas alternativas encontradas para tal definição, a primeira é especificada no *Machining Data Handbook* (1980) e classifica a operação de acabamento de acordo com a quantidade de material removido em função do tempo, conforme Tabela 3. Porém, não apresenta os parâmetros elétricos de EDM.

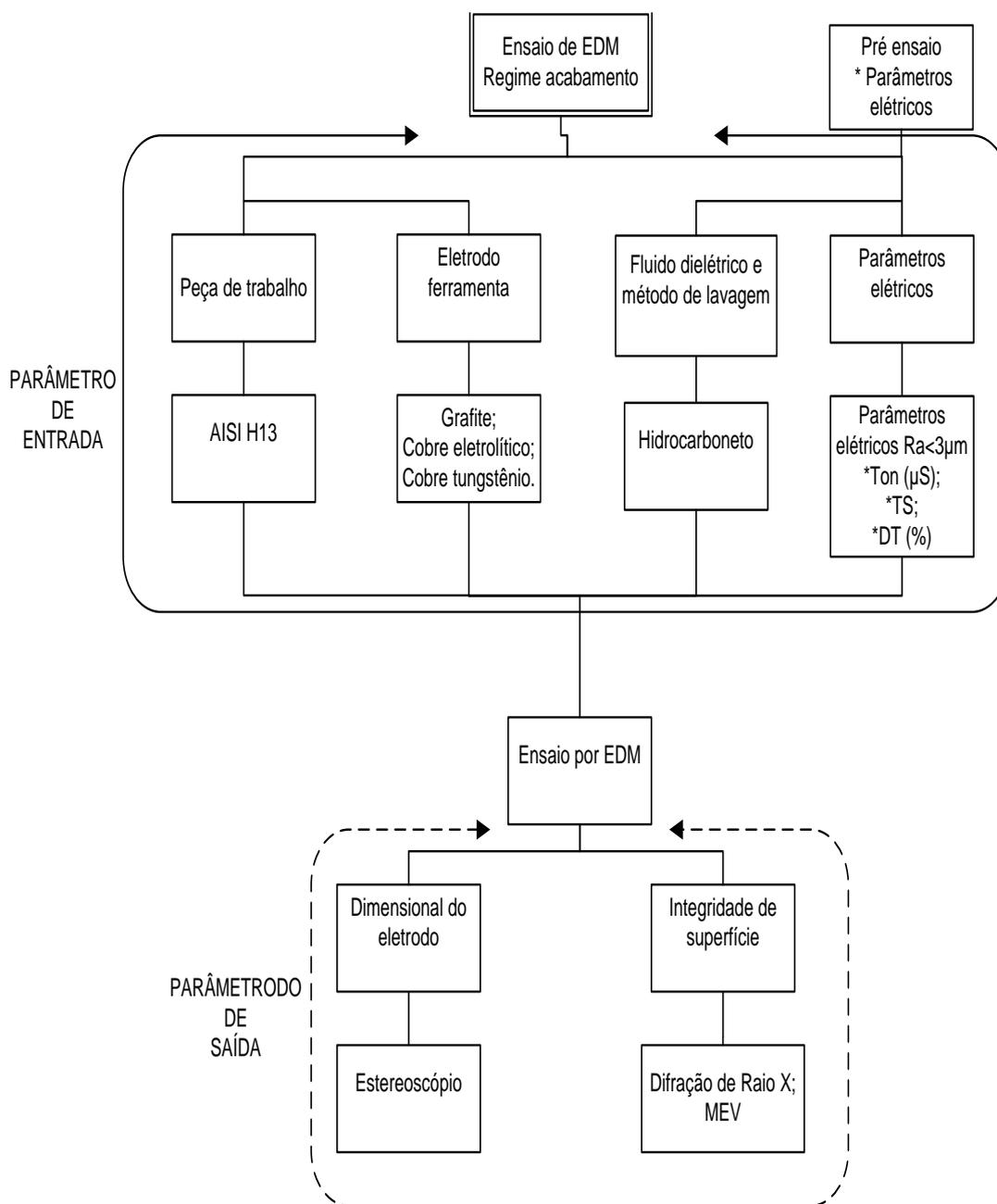


Figura 21 - Modelo esquemático geral do desenvolvimento dos ensaios

Tabela 3 - Classificação das operações de usinagem por eletroerosão de acordo com a taxa de remoção de material

Operação de usinagem	Taxa de remoção de material (mm <sup>3</sup> /min)
Acabamento	0,8 - 5,0
Pré-acabamento	5,1 - 115,0
Desbaste	115,1 - 410,0

A segunda opção (utilizada neste trabalho) levou em consideração a rugosidade atingida após usinagem como item para classificar a operação do processo de EDM. Para se ter uma referência das rugosidades obtidas para o aço AISI H13 em condições de acabamento, buscou-se os valores encontrados nos trabalhos de AMORIM et al., 2010; OLINIKI, 2009; e LEE e TAI, 2003, onde encontrou-se que a rugosidade média (Ra) variou entre 0,8  $\mu\text{m}$  à 3,2  $\mu\text{m}$ .

Com a informação de rugosidade média no processo de EDM, foram definidos, a partir do catálogo do fabricante da máquina ferramenta (ENGEMAQ, 2002), três valores de rugosidades (Tabela 4) para cada material de eletrodo, sendo que o catálogo apresenta os valores de referência em Ry (Rugosidade máxima).

Tabela 4 - Parâmetros elétricos do manual da máquina ferramenta para operação de acabamento utilizados no pré ensaio.

Material eletrodo	Rugosidade Total (Ry)	Corrente Nominal (A)	Tempo de duração de descarga ( $\mu\text{s}$ )	DutyTime (%)	Polaridade no eletrodo
Gr	15	3	50	91	(+)
Gr	17	3	75	86	(+)
Gr	19	6	50	91	(+)
Cu	14	3	50	89	(+)
Cu	17	6	50	89	(+)
Cu	20	6	75	83	(+)
CuW	14	6	50	91	(+)
CuW	17	6	100	89	(+)
CuW	19	9	75	86	(+)

Na usinagem do pré ensaio, os eletrodos de grafite (GR), cobre tungstênio (CuW) e cobre eletrolítico (Cu) apresentam geometria retangular com as medidas de 3,2 mm x 13,0 mm. O tempo de usinagem é de 15 minutos, com sistema de lavagem com bico lateral e pulsação do eletrodo no sentido vertical, com tempos de 0,2 segundos, saída de 0,5 mm da cavidade e retração ao ponto inicial do trabalho a cada 30 ciclos.

Os resultados encontrados para rugosidade média no pré-ensaio definiu os parâmetros elétricos de entrada para o ensaio do desgaste de canto em processo de EDM, conforme especificado no seção 3.2.5.

### 3.2 Materiais

Os materiais utilizados nesse trabalho estão apresentados seguindo a sequência apresentada no fluxograma (Figura 21). Iniciando pela descrição da máquina de EDM e do rugosímetro que foram utilizados no pré-ensaio para definição dos parâmetros.

#### 3.2.1 Equipamentos utilizados no pré-ensaio

Os testes, tanto do pré-ensaio quanto dos testes definitivos, foram executados em uma máquina de eletroerosão por penetração ENGEMAQ EDM 440 NC. É característica desse equipamento a tensão em aberto fixada em 100 V. A Figura 22 demonstra a máquina ferramenta utilizada para os ensaios, que está instalada na UTFPR - Ponta Grossa, no Laboratório de Usinagem.



Figura 22 - Máquina de EDM (ENGEMAQ 440 NC) utilizada para os ensaios.

O equipamento utilizado para medir a rugosidade na definição dos parâmetros elétricos para o ensaio de EDM, foi o rugosímetro Mitutoyo Surftest 301. Este equipamento está disponível na UTFPR - Ponta Grossa. As leituras foram realizadas com cinco comprimentos de amostra e  $cut-off = 0,8$  mm, obtendo as unidades de leitura em Ra e Ry. A Figura 23 mostra a maneira segundo a qual a rugosidade foi medida.



Figura 23 - Rugosímetro portátil Mitutoyo utilizado no pré-ensaios

### 3.2.2 Peça de trabalho

As amostras ensaiadas são de aço ferramenta AISI H13, de seção retangular de 44,0 x 35,0 mm e espessura de 12 mm com rugosidade  $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ , preparadas pelo processo de fresamento, seguido de tratamento térmico e por fim retificado. Esse material é largamente utilizado pela indústria de moldes e matrizes. As peças foram temperadas e revenidas com uma dureza final média de 45 HRC. O certificado do tratamento térmico de têmpera e revenido encontra-se no anexo A. A composição química do aço ferramenta AISI H13 é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química (% m/m) do aço ferramenta AISI H13 (Aços Favorit).

Material	C	Mn	Cr	Mo	V	Si
AISI H13	0,40	0,35	5,00	1,5	1,00	1,00

### 3.2.3 Eletrodo ferramenta

Os materiais utilizados como eletrodos ensaiados são grafite, cobre eletrolítico e cobre tungstênio. As propriedades dos materiais dos eletrodos são apresentadas na Tabela 6. Os eletrodos de grafite escolhidos são de granulometria  $10 \mu\text{m}$ , sendo este apresentado por Stedile (2009) como referência inicial para

acabamento e de fácil usinagem em processos convencionais para se obter a geometria desejada com canto afiado.

Na usinagem de moldes por EDM com estreitas tolerâncias e de difícil acesso, é comum o uso do eletrodo de cobre eletrolítico, apresentando fácil polimento nas superfícies geradas após a usinagem. O cobre-tungstênio é um material nobre de custo elevado, sendo utilizado em operações de acabamento onde se exige alta precisão dimensional. A classe mais utilizada é 30 % de cobre e 70 % tungstênio. O anexo B apresenta o certificado do cobre eletrolítico e o anexo C o certificado do cobre-tungstênio como materiais de eletrodo.

Tabela 6 - Propriedades dos materiais utilizados para eletrodos

Material	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Resistividade elétrica ( $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ )	Condutibilidade térmica (W/mK)	Ponto de fusão (°C)	Dureza (Brinell)
Grafite 10 $\mu\text{m}$	1,85	1,05	110	3500	110
Cobre eletrolítico	8,90	1,30	220	1083	95
Cobre tungstênio (30/70)	14,18	3,59	160	3410	220

A fixação do eletrodo na máquina ferramenta foi efetuada por um porta-eletrodo, fabricado no próprio Laboratório de Usinagem da UTFPR - PG, sendo utilizado por Santos (2010) nos seus ensaios. A fixação da peça foi realizada através de uma morsa para máquinas operatrizes, com o mordente fixo paralelo ao eixo de movimento da máquina, conforme Figura 24.



Figura 24 - Sistema de fixação do eletrodo-ferramenta e eletrodo-peça.

### 3.2.4 Fluido dielétrico e método de lavagem

O fluido dielétrico utilizado nos ensaios é o Electron, fabricado pela Archem Química Ltda. Suas características principais são listadas na Tabela 7. O sistema de lavagem é realizado por um jato lateral e pelo sistema de imersão. A vazão do fluido dielétrico pela lavagem lateral é de 4,0 litros/minuto e a pressão de 1,0 kgf/cm<sup>2</sup>. A pulsação do eletrodo no sentido vertical com valores de tempo de 0,2 segundos, de saída de 0,5 mm da cavidade e de retração ao ponto inicial do trabalho a cada 30 ciclos, é suficiente para garantir uma boa limpeza da cavidade (OLINIKI, 2009).

Amorim (2002) salienta em seus ensaios que esses métodos de lavagem são suficientes para cavidades rasas e, desta forma, o fluido dielétrico consegue efetuar eficientemente a remoção de excesso de partículas erodidas longe da fenda de trabalho, bem como realizar o arrefecimento adequado. Esse método também mantém algumas partículas dentro da fenda de trabalho de maneira a reduzir o tempo de retardo de ignição da descarga ( $t_d$ ).

Tabela 7 - Características do fluido dielétrico para EDM.

Ponto de Ebulição	250 °C
Ponto de Fulgor	100 °C
Viscosidade Cinemática	3 Cst
Rigidez Dielétrica	20 kV

### 3.2.5 Parâmetros elétricos do processo

São representados por:

- a) TS (*Transistor Standard*): define a quantidade de corrente  $i_e$ , onde cada TS equivale a três Amperes;
- b)  $T_{on}$  ou  $t_i$ : tempo de onda ligado ou duração do pulso de tensão, respectivamente. Tempos dados em micro-segundos ( $\mu s$ );
- c) DT (*Duty Time*) ou  $\tau$  (%): relação de contato, e;
- d) polaridade do eletrodo ferramenta.

Estes parâmetros são programados atuando-se sobre o sistema de controle da máquina e representam algumas das principais variáveis que influenciam no desgaste do eletrodo (GUITRAU, 1997) e nos aspectos de integridade da superfície

erodida. A Tabela 8 lista os parâmetros elétricos para o ensaio de EDM levando em conta a rugosidade definida para regime de acabamento.

Tabela 8 - Parâmetros elétricos para os ensaios com rugosidade  $R_a < 3 \mu\text{m}$ .

Eletrodo	Parâmetros			Tensão em aberto	Polaridade eletrodo	Rugosidade	Taxa de remoção de material	Desgaste relativo
	Ts	Ton $\mu\text{s}$	DT %					
Grafite	1	50	91	100	(+)	15	2,6	18
Cobre	1	50	89	100	(+)	14	6,8	1,5
CuW	2	50	91	100	(+)	14	20	1,6

Esses parâmetros foram retirados do catálogo do fabricante da máquina, utilizados no pré ensaio mostrado na seção 3.2.1, seguido da medição da rugosidade para atender as condições de acabamento superficial conforme resultados do APÊNDICE .

### 3.2.6 Equipamentos de medição

Os equipamentos utilizados para as análises dos testes são o estéreo microscópio ótico, difratômetro de raio-X e o microscópio eletrônico de varredura (MEV).

A Figura 25 apresenta o estéreo microscópio ótico Olympus SZX10, disponível na UTFPR – Curitiba, com ampliação de 100 vezes, que foi utilizado para conduzir a medição do desgaste da aresta no decorrer da usinagem do ensaio. Para análise dos resultados, utilizou-se o software AnaliSYS, versão 5.1, da *Olympus Soft Imaging GmbH*, com três pontos marcados no contorno da imagem, coletando assim o valor do arredondamento do canto do eletrodo.

A calibração do software AnaliSYS foi realizado através do nônio de um paquímetro de com resolução de 0,02 mm ampliado a 100 vezes. Utilizando o sistema de marcação de três pontos e a ferramenta arco do software, foi medido um diâmetro conhecido de 2,0 mm com erro de 0,0005mm, validando assim calibrado o sistema de medição.

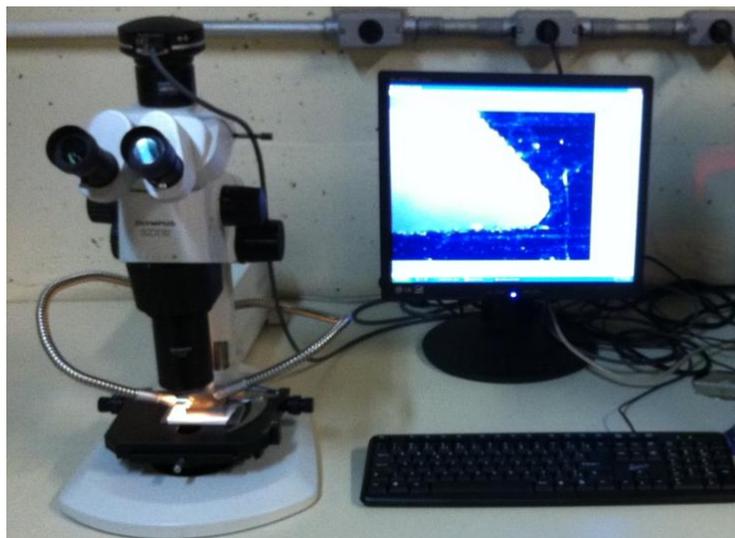


Figura 25 - Estéreo Microscópio óptico utilizado para medição do arredondamento do canto do eletrodo durante a usinagem por EDM.

O ensaio de difração de raio X foi aplicado para determinar as fases e os carbonetos gerados pela pirólise do dielétrico (hidrocarboneto), através do espaçamento atômico e da estrutura cristalina do material dos eletrodos, identificando assim os elementos de liga que surgiram na superfície após a usinagem de EDM.

As análises foram realizadas num difratômetro de raio X, modelo XRD 7000, instalado na UTFPR - Curitiba (Figura 26), utilizando radiação de  $\text{CuK}\alpha$ , com comprimento de onda de  $1,542 \text{ \AA}$ , corrente de  $30\text{mA}$  e tensão de  $40\text{kV}$ , numa faixa de  $20$  a  $100^\circ$  ( $2\theta$ ) e uma velocidade de varredura de  $0,05^\circ/\text{s}$ . A identificação das fases cristalinas presentes foi realizada através da biblioteca do Joint Committee of Powder Diffraction Standards, (**JCPDS, 2002**).



Figura 26 - Difratômetro de raio x  $\text{CuK}\alpha$  para análise da superfície do eletrodo após usinagem.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) Phillips modelo XL 30 (Figura 27), instalado na UTFPR - Curitiba, com uma sonda de espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDX), possui objetivo de determinar os elementos que possam estar agregados à superfície dos eletrodos após a usinagem.

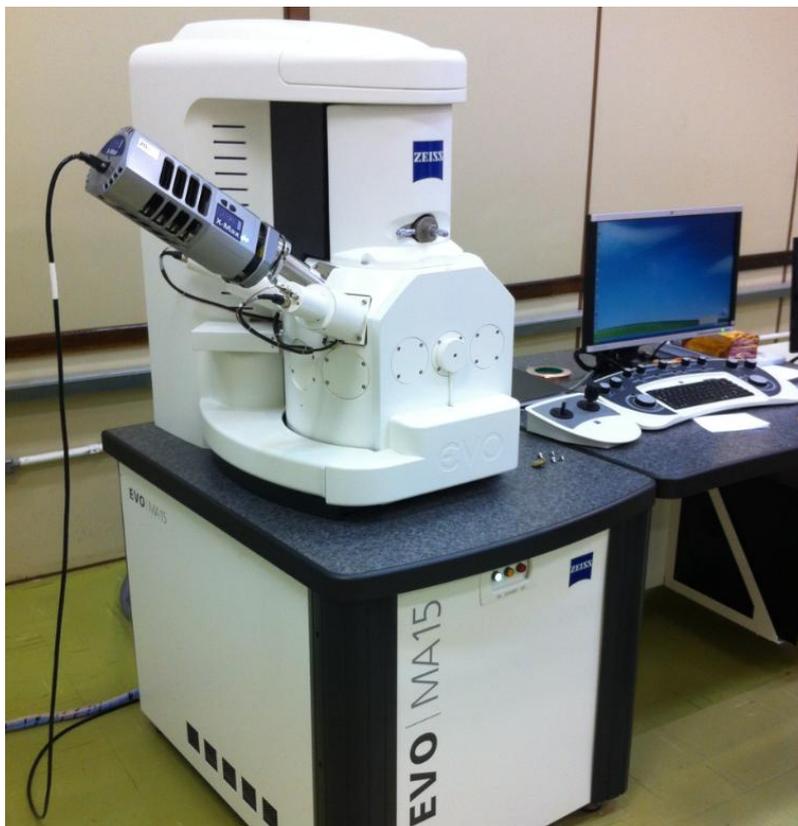


Figura 27 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV) para análise dos materiais agregados na superfície do eletrodo durante usinagem.

### 3.3 Métodos

Após definir os materiais utilizados nos testes de usinagem, serão definidos nas próximas seções os métodos para de fabricação dos eletrodos, os métodos dos experimentos e a apresentação dos resultados dos eletrodos ensaiados.

#### 3.3.1 Fabricação dos eletrodos

Os ângulos de inclinação de superfície frontal ( $\emptyset$ ) dos eletrodos definidos para os ensaios foram de 15, 30, 45 e 60°. Estes valores de ângulos foram estipulados de acordo com estudo de projetos de eletrodos, realizado na empresa no período do

ano de 2010 à 2013, sendo os citados, os mais indicados para atender as necessidades da empresa, na usinagem de cavidades de moldes realizadas por eletroerosão, com eletrodos que possuem ângulo de superfície frontal.

Por uma questão de simplificação de nomenclatura, os eletrodos serão referenciados no decorrer do texto de acordo com as siglas: Elet15, Elet30, Elet45 e Elet60 para os respectivos ângulos de inclinação de superfície frontal 15, 30, 45 e 60°. A geometria do eletrodo é retangular com medidas de 3,5 x 13,0 mm, com comprimento de 90,0 mm conforme desenho esquemático da Figura 28.

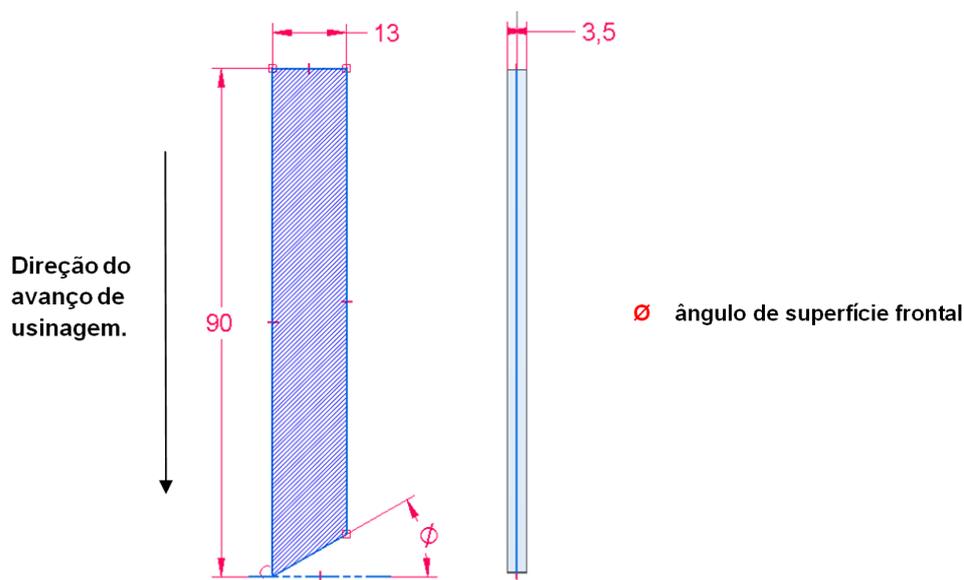


Figura 28 - Desenho esquemático dos eletrodos com ângulo de superfície frontal  $\emptyset$ .

Os eletrodos de grafites foram usinados pela empresa Artis Matriz, localizada no município de Campo Largo – PR, que conta com centros de usinagem específicos para peças em grafite, com sistema de proteção das guias e fusos, alta rotação da ferramenta e com sistema de aspiração do pó de grafite gerado durante a usinagem. A Figura 29 demonstra a usinagem dos eletrodos de grafite.

Os eletrodos de cobre eletrolítico e cobre-tungstênio foram usinados na mesma empresa. No entanto utilizou-se o processo de EDM a fio. Para garantir a menor diferença dimensional dos eletrodos, as lâminas de mesmo material foram cortadas todas juntas (por lote) de acordo com o ângulo da superfície frontal. Após o corte, realizou-se o polido das faces laterais dos eletrodos com uma lixa com granulometria 1600, garantindo uma rugosidade média de  $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ , minimizando o arredondamento do canto antes da usinagem.



Figura 29 - Centro de usinagem com proteção de guias e fusos, específico para grafite.

### 3.3.2 Planejamento dos experimentos

Com o objetivo de conhecer o arredondamento do canto do eletrodo no decorrer da usinagem, são definidos tempos de usinagem de 5, 10, 20, 30, 45, 60, 80 e 100 minutos. Esses valores de tempos de usinagem foram definidos de acordo com as pesquisas bibliográficas realizadas, onde por exemplo no trabalho de Amorim et al. (2010) é relatado que no decorrer da usinagem a estabilidade do arredondamento do canto do eletrodo após 100 minutos de usinagem é evidenciado.

Para determinação do número de experimentos e combinações a serem realizados nos ensaios foi empregada à metodologia DOE (*design of experiments*) fatorial. Essa metodologia tem o objetivo de melhor combinar as variáveis controláveis do processo, de modo a otimizar determinadas respostas de interesse, extraindo o máximo de informação com um número mínimo de experimentos.

A análise realizada nessa pesquisa foi determinada pela variação de dois fatores e quatro níveis com base nos objetivos do trabalho, definido como DOE fatorial completo, sendo assim o número de experimentos é obtida pela equação 3.

$$N = 4^k \quad (\text{Eq. 03})$$

Onde N= número de experimentos;

k = número de fatores.

Os fatores de ensaio para cada material de eletrodo são: i) o ângulo de inclinação da superfície frontal ( $\varnothing$ ); e ii) e o tempo de usinagem. Porém, tem-se quatro níveis, sendo eles 4 ângulos  $\varnothing$  e 8 tempos de usinagem. Conforme a Tabela 9, a solução encontrada foi executar dois ensaios DOE com a divisão dos tempos de

usinagem para cada ensaio e manter padrão os ângulos de superfície frontal do eletrodo. A equação 4 demonstra o número total de ensaios por material de eletrodos.

$$N = 2 * 4^2 = 32 \quad (\text{Eq. 04})$$

Com a definição de dois fatores e quatro níveis para cada material ensaiado, realizando o DOE 1 e o DOE 2, conforme a Tabela 9, tem-se trinta e dois ensaios. Os materiais em testes são o grafite, cobre eletrolítico e o cobre-tungstênio. Será realizado três repetições para garantir um grau estatístico, chegando-se a um total de 288 ensaios, somando todos os tempos desses ensaios a 255 horas de usinagem.

Tabela 9 - Variáveis dos ensaios ângulo de superfície frontal do eletrodo e tempo de usinagem.

DOE - 1			DOE - 2		
Material eletrodo	Ângulo de superfície frontal	Tempo de usinagem	Material eletrodo	Ângulo de superfície frontal	Tempo de usinagem
Grafite	15, 30, 45 e 60	5, 10, 20 e 30	Grafite	15, 30, 45 e 60	45, 60, 80 e 100
Cobre eletrolítico	15, 30, 45 e 60	5, 10, 20 e 30	Cobre eletrolítico	15, 30, 45 e 60	45, 60, 80 e 100
Cobre tungstênio	15, 30, 45 e 60	5, 10, 20 e 30	Cobre tungstênio	15, 30, 45 e 60	45, 60, 80 e 100

Para os resultados, foram calculados os intervalos de confiança para os pontos, com o intuito de obter análises consistentes do ponto de vista estatístico.

Os intervalos de confiança foram calculados para o número de valores considerados para 95% de confiança, através da equação 5 (TRIOLA, 1999).

$$E = t * \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (\text{Eq. 05})$$

Onde:

$E$  = intervalo de confiança para a estimativa da média.

$t$  = fator de abrangência.

$S$  = desvio padrão amostral.

$n$  = número de medições.

### 3.3.3 Apresentação dos resultados

Para a análise dos resultados, os dados obtidos foram plotados de tal forma que permitissem um acompanhamento do aumento do raio de canto com o tempo de usinagem para cada um dos materiais, considerando os quatro ângulos de inclinação de superfície frontal ( $\emptyset$ ).

Para esses gráficos construídos não foram marcados os intervalos de confiança, por uma questão de visualização. Portanto será apresentado tabelas com os valores dos desvios em relação a média encontrada, dando assim sustentação estatística aos dados nos APÊNDICE B, APÊNDICE C e APÊNDICE D. Os resultados plotados nos gráficos são médias estatísticas de três ensaios repetidos nas mesmas condições, a curva representada é uma linha de tendência logarítmica.

Também é apresentado um gráfico semelhante, mas com o objetivo de comparar os resultados entre os três materiais de eletrodo. Para tanto foi considerado apenas o ângulo de inclinação de superfície frontal  $\emptyset = 45^\circ$ .

Como forma de avaliar o rendimento do processo, também buscou-se um parâmetro de análise que refletisse o comportamento do desgaste relativo ( $\vartheta$ ). Contudo, o parâmetro de desgaste relativo definido na VDI (1990) refere-se a uma relação entre a taxa de remoção de material e a taxa de desgaste total do eletrodo, considerando além do desgaste de canto, os desgastes laterais e de superfície frontal. Para tanto, essa medição é realizada considerando a perda de material do eletrodo com o auxílio de balanças de precisão.

Como o objetivo deste trabalho está focado na avaliação dimensional do desgaste de canto, definiu-se um parâmetro de desgaste relativo de canto (taxa de arredondamento -  $\vartheta_{rc}$ ) onde a relação, entre as taxas de remoção de material e de desgaste de canto do eletrodo, é calculada baseando-se nas áreas das respectivas seções transversais. Esse procedimento é válido pois, para se obter o volume, seria necessário apenas multiplicar pela largura do eletrodo. Também, mostra-se prático pois desconsidera os outros tipos de desgaste, focando apenas no desgaste de canto, objeto deste estudo.

Durante a usinagem, foi coletada a profundidade atingida por cada eletrodo, conforme modelo de tabela apresentado no APÊNDICE E. Com os valores da profundidade de usinagem, do raio inicial (R2), do raio final (R1) e o ângulo de inclinação de superfície frontal do eletrodo ( $\emptyset$ ), foram calculados a área de remoção

de material e a área entre os arredondamentos inicial e final da usinagem. Através de um software de modelamento Solid Edge da Siemens, versão ST7, foi desenhado o contorno do eletrodo com os dados coletados, calculando assim através do software a área de cada região: i) desgaste de canto inicial ( $AR_i$ ); ii) desgaste de canto final ( $AR_f$ ); e iii) área de material removido da peça ( $V_w$ ), e por fim calcular a taxa de arredondamento ( $\mathcal{Q}_{rc}$ ) conforme equação 6.

$$\mathcal{Q}_{rc} = (AR_f - AR_i) / (V_w - AR_i) \quad (\text{Eq. 06})$$

Serão apresentados gráficos com o comportamento da taxa de arredondamento no decorrer do tempo de usinagem de 100 minutos, para os ângulos de superfície frontal do eletrodo Elet15, Elet30, Elet45 e Elet60 e plotados em valores percentuais.

Para a comparação entre materiais ensaiados analisando a taxa de arredondamento, será destacado a situação do tempo de usinagem de 60 minutos, por ser um tempo médio de usinagem em EDM para operação de acabamento. A Figura 30 apresenta as áreas analisada para cálculo da taxa de arredondamento.

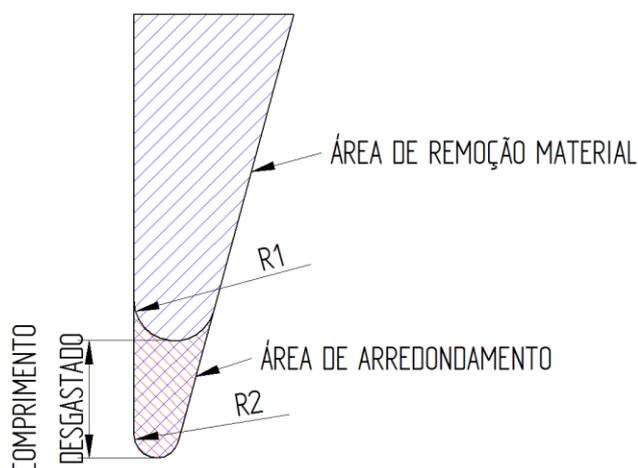


Figura 30 - Definição de área de remoção de material e área de arredondamento através do comprimento de desgaste e raios inicial e final da ponta do eletrodo.

Os ensaios de difração de raio X e MEV foram realizados em eletrodos com ângulo da superfície frontal zero e com tempo de usinagem de 60 minutos, para cada um dos três materiais. A área em análise está localizada no centro do eletrodo referente a largura de 3,5 mm e a 1,0 mm da face lateral do eletrodo referente ao comprimento de 13,00 mm, região onde ocorreu o desgaste de canto.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através das imagens obtidas no estéreo microscópio óptico, após os ensaios definidos no capítulo 3, foi possível medir e analisar o desgaste de canto, conforme mostra Figura 31.

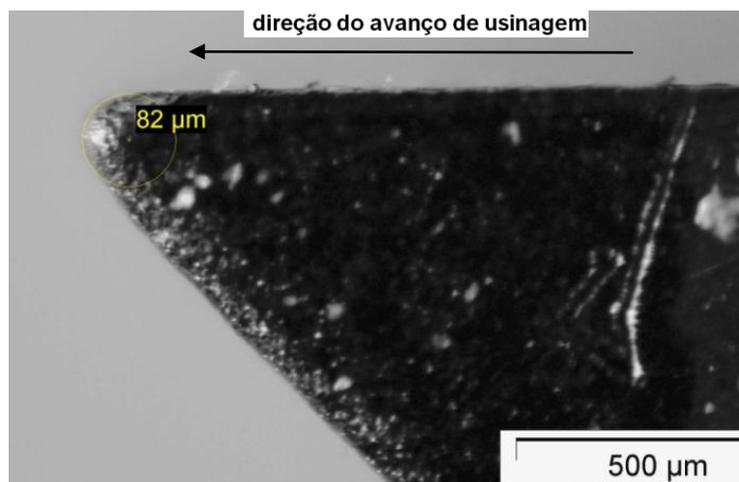


Figura 31 - Eletrodo de cobre com ângulo de superfície frontal de 45°, com raio de canto após usinagem de cinco minutos.

Conforme mencionado por Cogun e Akaslan, (2002); Mohri et al., (1995); Crookall e Fereday, (1973), os eletrodos de cobre e cobre tungstênio apresentaram o desgaste de canto na forma de arredondamento das arestas de usinagem, sendo representado geometricamente por um arco de círculo.

### 4.1 Análise da geometria do eletrodo

Nesta seção serão apresentados os resultados da evolução do desgaste de canto dos eletrodos Elet15, Elet30, Elet45 e Elet60, nos três materiais ensaiados. Nos três próximos itens, esse comportamento será analisado em relação ao tempo de usinagem para cada um dos três materiais. Em seguida será discutido esses resultados para entender o comportamento do desgaste de canto tomando referência a geometria do eletrodo.

Os pontos plotados nos gráficos são médias de três ensaios repetidos nas mesmas condições, a curva representada é uma linha de tendência logarítmica.

Na seção 4.1.4, busca-se fazer um comparativo entre os três materiais ensaiados por meio de duas análises diferentes. Num primeiro momento, apenas para se evidenciar a diferença entre o desgaste de canto sofrido pelos eletrodos para os diferentes materiais, o gráfico para o Elet45 é plotado em conjunto. Num segundo momento, os três materiais são comparados em relação ao parâmetro taxa de arredondamento de canto ( $\vartheta_{rc}$ ), definido na seção 3.3.3, para os quatro ângulos de superfície frontal Elet15, Elet30, Elet45 e Elet60.

#### 4.1.1 Eletrodo de cobre eletrolítico

Os resultados são analisados de acordo com o raio de canto gerado em relação ao tempo de usinagem. A Figura 32 apresenta os valores para os eletrodos de cobre eletrolítico e os parâmetros elétricos do processo.

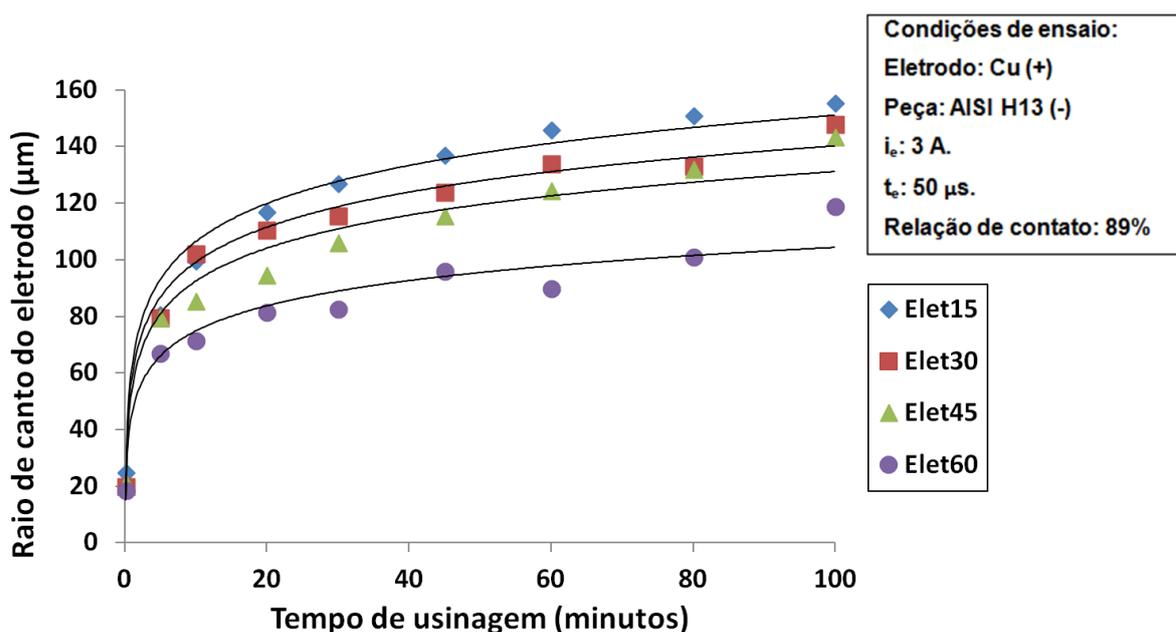


Figura 32 - Aumento do raio de canto do eletrodo de cobre para os ângulos de superfície frontal de 15°, 30°, 45° e 60° no intervalo de tempo de usinagem de 0 à 100 minutos.

Antes do início dos ensaios, os eletrodos de cobre eletrolítico, já apresentavam arredondamento de canto, devido ao processo de fabricação adotado para se obter a geometria definida no capítulo 3. Esse valor varia entre 12  $\mu$ m e 19  $\mu$ m para os eletrodos de ângulo nas superfícies analisados.

Observa-se que no ensaio com eletrodo de cobre eletrolítico, nos primeiros cinco minutos de usinagem, ocorre um aumento do raio de canto do eletrodo

significativo comparado aos demais intervalos de tempo. Os raios de canto ( $r_c$ ) para os eletrodos Elet15, Elet30 e Elet45 apresentaram valores muito próximos, variando de 73  $\mu\text{m}$  à 82  $\mu\text{m}$ , enquanto para o Elet60 esse parâmetro atingiu o valor de 67  $\mu\text{m}$ , representando o menor arredondamento nesse tempo de usinagem.

À medida que aumenta o tempo de usinagem, 80 à 100 minutos, quando comparado com o início (0 à 20 minutos), o desgaste do raio não sofre alteração significativa.

#### 4.1.2 Eletrodo de cobre tungstênio

A Figura 33 apresenta os valores para os eletrodos de cobre tungstênio e os parâmetros elétricos do processo.

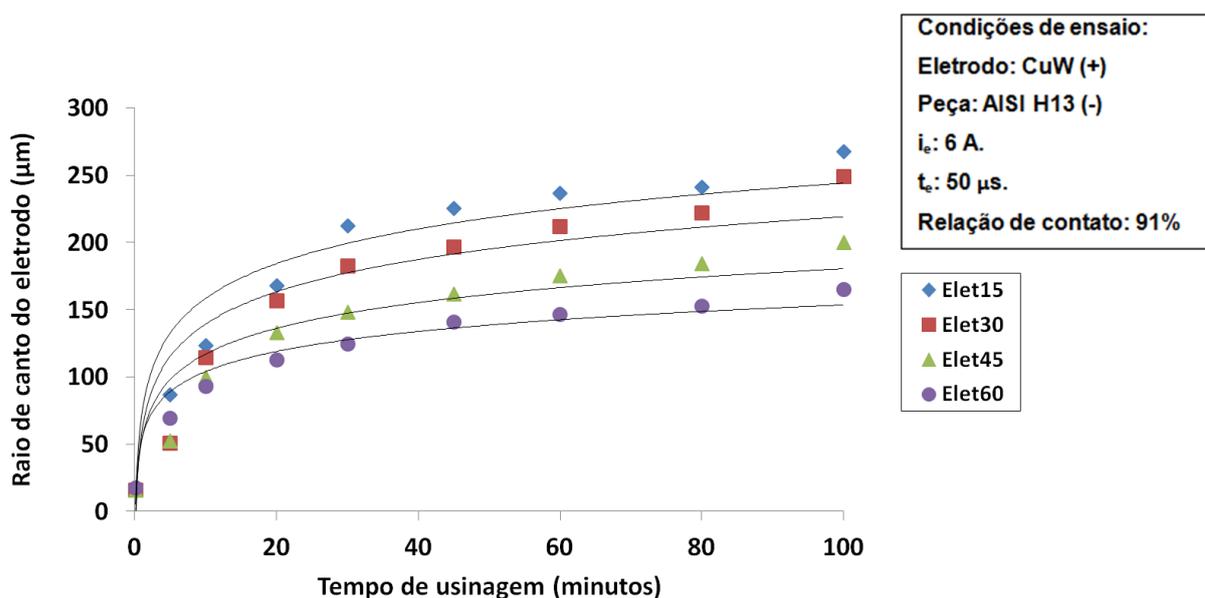


Figura 33 - Aumento do raio de canto do eletrodo de cobre tungstênio para os ângulos de superfície frontal de 15°, 30°, 45° e 60° no intervalo de tempo de usinagem de 0 à 100 minutos.

A Figura 33, demonstra que no tempo de usinagem de cinco minutos, o eletrodo de cobre tungstênio Elet15, apresenta o maior raio de canto com 87  $\mu\text{m}$ . O de menor raio de canto é Elet30 e Elet45 com valor médio de 50,5  $\mu\text{m}$  e 52,5  $\mu\text{m}$  respectivamente.

No decorrer da usinagem, o Elet15 apresenta o maior raio de canto, até o tempo máximo de análise dos ensaios que é de 100 minutos, chegando ao valor médio do raio de canto de 268  $\mu\text{m}$ . Já o Elet60 foi o que apresentou o menor raio de

canto gerado, atingindo o valor de raio de canto de 165,5  $\mu\text{m}$  para o maior tempo de amostragem.

Todos os ângulos de superfície frontal analisados para os eletrodos de cobre tungstênio, entre o tempo de usinagem de 0 a 100 minutos, apresentaram valores crescentes. Em cada tempo de usinagem o de maior raio de canto foi o Elet15 e o de menor raio o Elet60, salvo em cinco minutos de usinagem onde o Elet30 apresenta o menor arredondamento, com raio de canto de 50,5  $\mu\text{m}$ .

O mesmo fato apresentado nos eletrodos de cobre eletrolítico acontece no cobre tungstênio, quando analisando a linha de tendência, onde no decorrer da usinagem, a mudança da ponta afiada dos eletrodos em raio de canto, atinge um estado de equilíbrio.

Mohri et al., 1995 e Amorim, (2002), em suas pesquisas dizem que esse fenômeno ocorre devido a precipitação do carbono no arredondamento do eletrodo ao longo da usinagem. A precipitação do carbono funciona como uma camada de proteção contra o desgaste e é mais evidente em tempos maiores de usinagem. Isso acontece porque, no início da usinagem o raio de canto do eletrodo é um valor dimensional pequeno, o que evita a precipitação de carbono e, assim, acelera o crescimento do desgaste do raio.

Durante a usinagem com os eletrodos de cobre e cobre-tungstênio, nota-se que o desgaste de canto é maior do que o desgaste frontal no início da usinagem. Isto deve-se porque o canto está a ser atacado por diversas faíscas a partir de várias direções simultaneamente. Percebe-se, também que o desgaste de canto é afetado pelo ângulo de superfície frontal do eletrodo. Quanto menos agudo, maior o valor de arredondamento para o mesmo tempo de usinagem, uma vez que o desgaste de canto é uma função da proporção superfície / volume da condição de canto.

#### **4.1.3 Eletrodo de grafite**

A Figura 34, mostra como ficou a seção transversal do eletrodo de grafite para o Elet45, no tempo de usinagem de cinco minutos, (a) - a superfície frontal não apresentou deterioração e mostra um raio tangente às arestas que formam o ângulo de canto. No tempo de usinagem 20 minutos (b), o raio de canto diminuiu em relação ao raio de canto de cinco minutos de usinagem, isso devido a alteração da

superfície frontal, do qual apresenta irregularidades e não mais uma superfície linear. A maior alteração da superfície frontal ocorre no tempo de usinagem 45 minutos (c), gerando o menor raio de canto.

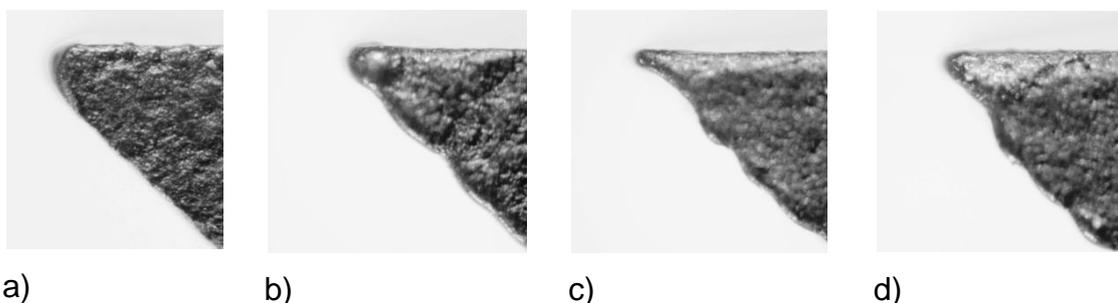


Figura 34 - Eletrodos de grafite com ângulo de superfície frontal de 45°. a) 5 minutos de usinagem, b) 20 minutos de usinagem, c) 45 minutos de usinagem, d) 60 minutos de usinagem.

Este tipo de fenômeno de desgaste irregular para o eletrodo de grafite também foi observado por Santos (2010) e Klocke et al. (2013), justificado por uma inadequação dos parâmetros elétricos e ineficiência nas condições de lavagem, com grande concentração dos detritos no canto do eletrodo de grafite. Percebe-se portanto que o eletrodo de grafite apresenta uma certa fragilidade estrutural para o processo de EDM, sendo o comportamento do seu desgaste de canto de difícil previsão. Este fenômeno, mostra-se bastante significativo os parâmetros de processo de eletroerosão para eletrodos de grafite, quando busca-se atingir tolerâncias geométricas em nível de acabamento.

Evidencia-se, portanto, que para a usinagem de acabamento em EDM com eletrodos de grafite, deve-se buscar uma definição mais precisa dos parâmetros elétricos, o que não foi possível nesse trabalho por se tratar de um estudo comparativo entre outros dois materiais.

A Figura 35 apresenta os valores de desgaste de canto para os eletrodos de grafite no decorrer da usinagem e os parâmetros elétricos do processo.

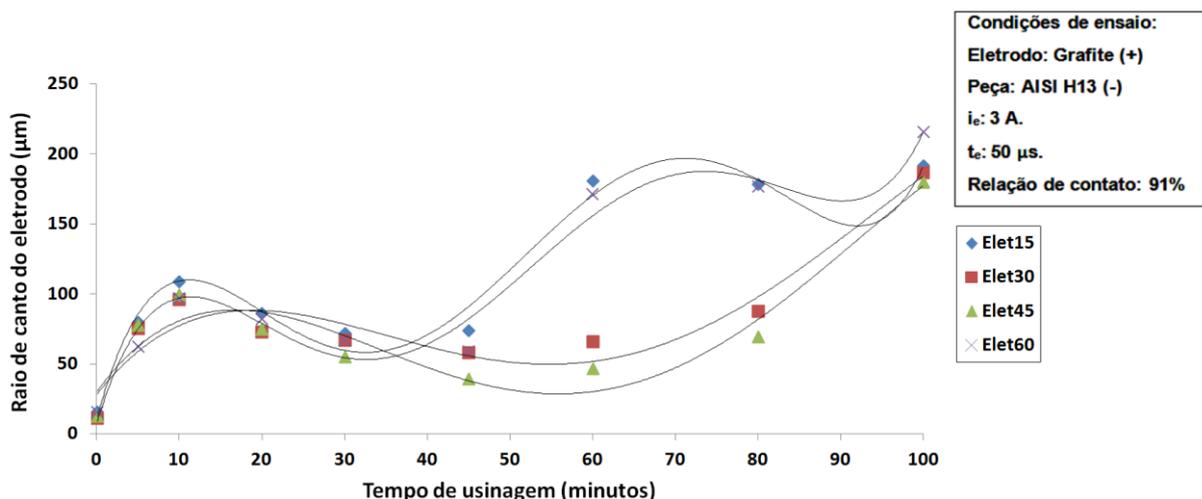


Figura 35 - Aumento do raio de canto do eletrodo de cobre tungstênio para os ângulos de superfície frontal de 15°, 30°, 45° e 60° no intervalo de tempo de usinagem de 0 à 100 minutos.

Até os dez minutos de usinagem todos os eletrodos de grafite ensaiadas, apresentam arredondamento crescente. O eletrodo de grafite Elet15 apresenta o maior arredondamento nesse momento. Já, o Elet60 demonstra o menor raio de canto.

Entre o período de usinagem de 20 à 45 minutos, o raio de canto do eletrodo de grafite começa a diminuir. Esse fato ocorre devido a um aumento da massa do no canto do eletrodo, seguido do lascamento de pequenas frações da superfície frontal do eletrodo ocorrendo, assim, o arredondamento irregular da região analisada.

#### 4.1.4 Comparação entre os três materiais de eletrodos

Nessa seção busca-se apresentar um comparativo entre os três materiais utilizados na confecção do eletrodos e uma análise sobre a evolução do desgaste dos mesmos.

##### a) Aumento do raio de canto para o Elet45

Apenas como forma de evidenciar a diferença entre os níveis de desgaste e o comportamento do mesmo com o tempo de usinagem, na Figura 36 podem ser visualizadas as curvas relativas aos ensaios realizados com o eletrodo Elet45 fabricado com os três materiais ensaiados.

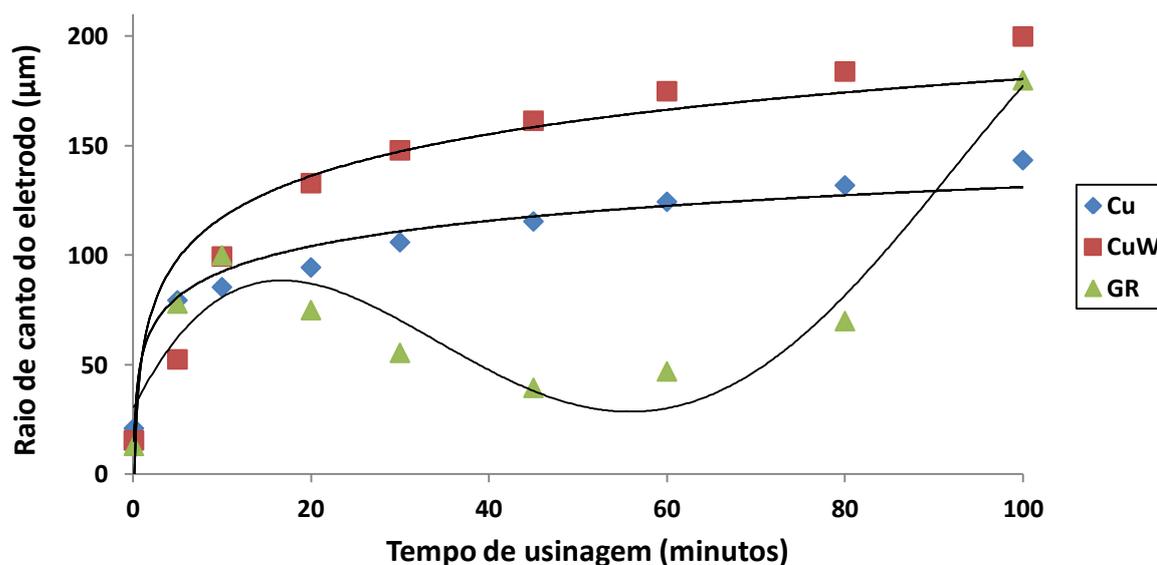


Figura 36 - Comparação na evolução do raio de canto dos três materiais de eletrodos para o Elet45.

Percebe-se que o eletrodo Elet45 teve o mesmo padrão de desgaste quando fabricados com Cu e com CuW. Contudo, fica evidente que o comportamento do desgaste para o eletrodo de Grafite é bastante diferenciado.

Apesar de terem o mesmo padrão de desgaste, a Figura 36 ressalta que o eletrodo de CuW, apresenta valores maiores de arredondamento de canto em comparação com o eletrodo de Cu, após o tempo de dez minutos de usinagem até o final do experimento.

Tsai E Masuzawa, (2004), dizem que o desgaste canto do eletrodo, refere-se à difusão de calor. O arredondamento de canto é mais evidente quando a condutividade térmica do eletrodo é baixa. Conforme apresentado na seção 3.2.3, a condutibilidade do cobre tungstênio é menor que o cobre eletrolítico, representando assim maior desgaste de canto a partir de dez minutos de usinagem.

### b) Taxa de arredondamento

Para análise do cálculo da taxa de arredondamento do eletrodo, desconsiderou os demais desgastes. Foi analisada a seção vertical do centro do eletrodo, tomando referência a área de material removido da peça pela área de desgaste do canto do eletrodo. A Figura 37 demonstra o comportamento da taxa de arredondamento do Elet15 para os três materiais em análise no decorrer da usinagem. Os resultado são plotados em percentual.

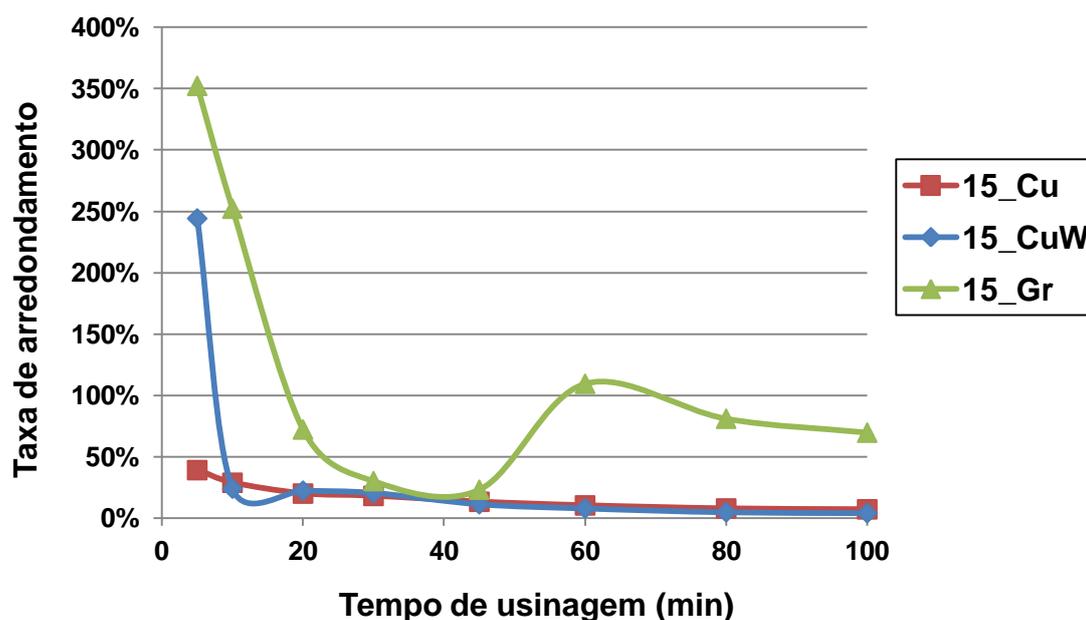


Figura 37 - Taxa de arredondamento com eletrodo de superfície frontal de 15° no decorrer da usinagem.

Comparando-se a taxa de arredondamento utilizando os três materiais de eletrodo no decorrer do tempo de usinagem, como apresenta a Figura 37, observa-se que o Elet15 de cobre eletrolítico exibe valores bem inferiores ao de cobre tungstênio e grafite nos primeiros cinco minutos de usinagem, sendo o de grafite com valor de 352% e o cobre tungstênio com 244% e o cobre eletrolítico com 39%.

No tempo entre 60 e 100 minutos, o Elet15 de grafite apresenta valores maiores de taxa de arredondamento que no período de 20 a 40 minutos, devido a valores baixos de taxa de remoção e alto desgaste de canto, ressaltando que o eletrodo de grafite teve material agregado na aresta e arrancados pedaços do canto do eletrodo.

O comportamento dos materiais de eletrodo cobre eletrolítico e cobre tungstênio, seguem conforme mencionado por AMORIM et al. (2010), nos primeiros minutos grande valores de arredondamento e a partir do tempo de 100 minutos de usinagem o desgaste de canto começa a estabilizar sem apresentar valores significativos em função da remoção de material.

Na avaliação da taxa de arredondamento utilizando os três materiais de eletrodo para o Elet30, no decorrer do tempo de usinagem, a Figura 38, mostra que o cobre eletrolítico exibe valores dez vezes menores que os do cobre tungstênio nos primeiros cinco minutos de usinagem, sendo 62% para o CuW e 5% para o Cu.

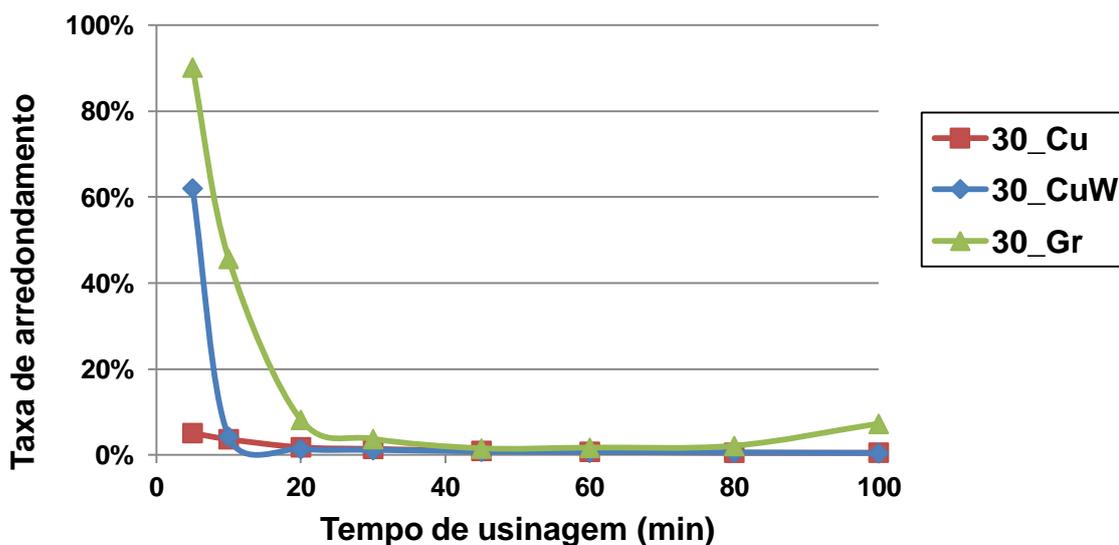


Figura 38 - Taxa de arredondamento com eletrodo de superfície frontal de 30° no decorrer da usinagem.

Ainda na análise do Elet30, o grafite apresenta a maior taxa de arredondamento em todos os tempos de usinagem, quando comparado aos eletrodos de cobre eletrolítico e cobre tungstênio. No tempo de 100 minutos a taxa de arredondamento para o eletrodo de grafite, aumenta comparado aos períodos de 30 a 80 minutos, de 2% para 7%, devido a valores baixos na área de remoção de material e alto desgaste de canto, havendo possibilidade de agregado de material na aresta, possibilitando a quebra da aresta do eletrodo, fazendo com que apresente um alto valor de raio de canto.

Para o Elet45, conforme mostra a Figura 39, o eletrodo de grafite apresenta o dobro do valor do eletrodo de cobre tungstênio no tempo de usinagem de 5 minutos, já o eletrodo de cobre eletrolítico, no mesmo tempo de usinagem, tem valor de taxa de arredondamento 17 vezes menor que o cobre tungstênio, sendo a taxa do grafite de 34%, CuW de 17% e Cu de 1%.

Nos demais tempos de usinagem, os eletrodos de cobre eletrolítico e cobre tungstênio tem valores de taxa de arredondamento abaixo de 1%, já o grafite apresenta a maior taxa de arredondamento em todos os tempos de usinagem. No tempo de 100 minutos a taxa de arredondamento para o eletrodo de grafite, aumenta comparado ao período entre 30 a 80 minutos, de 0,5% para 1,3%, devido a valores baixo de área de remoção de material da peça e alto desgaste de canto.

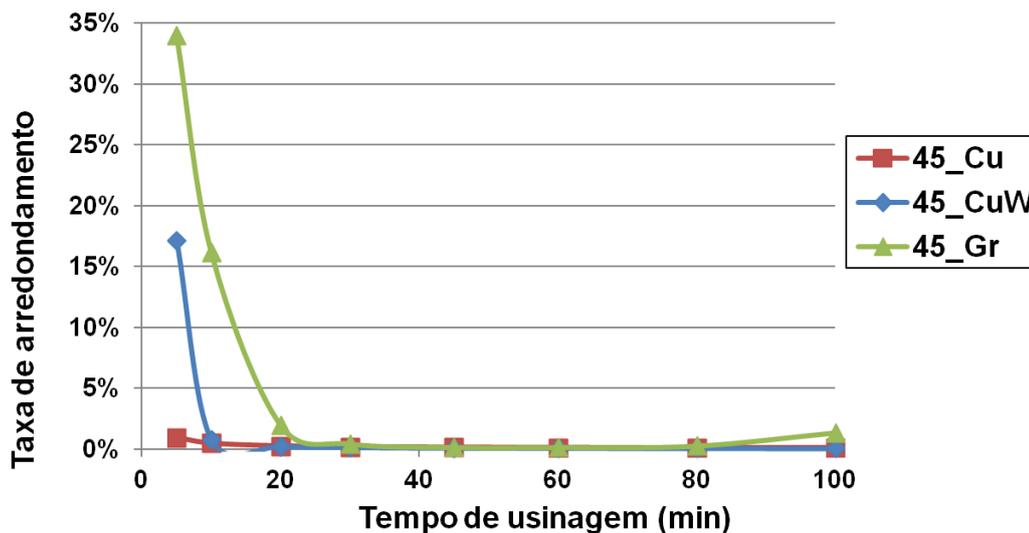


Figura 39 - Taxa de arredondamento com eletrodo de superfície frontal de 45° no decorrer da usinagem.

O Elet60, apresenta valores de taxa de arredondamento mostrado na Figura 40, onde o eletrodo de cobre eletrolítico obteve valor máximo de resultado 0,15% no tempo de cinco minutos, após esse tempo, os valores foram reduzindo chegando a valores insignificantes, menor que 0,5%. O eletrodo de cobre tungstênio apresenta a taxa de arredondamento de 12% no tempo de cinco minutos, após esse tempo, os valores caem para 0,45%.

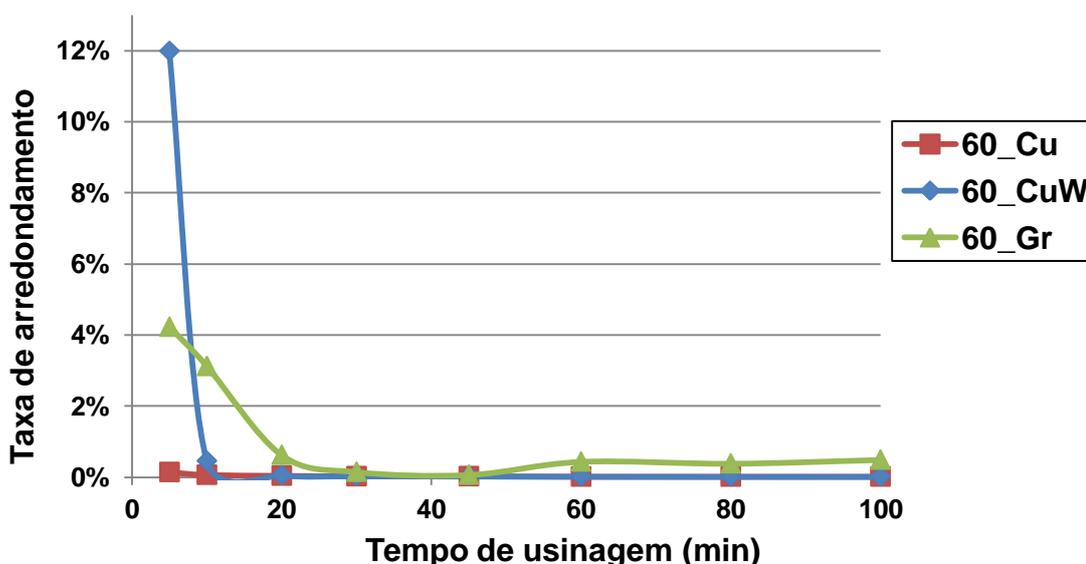


Figura 40 - Taxa de arredondamento com eletrodo de superfície frontal de 60° no decorrer da usinagem.

Para a comparação entre materiais ensaiados analisando a taxa de arredondamento, será destacado a situação do tempo de usinagem de 60 minutos, por ser um tempo médio de usinagem em EDM para operação de acabamento, conforme Figura 41.

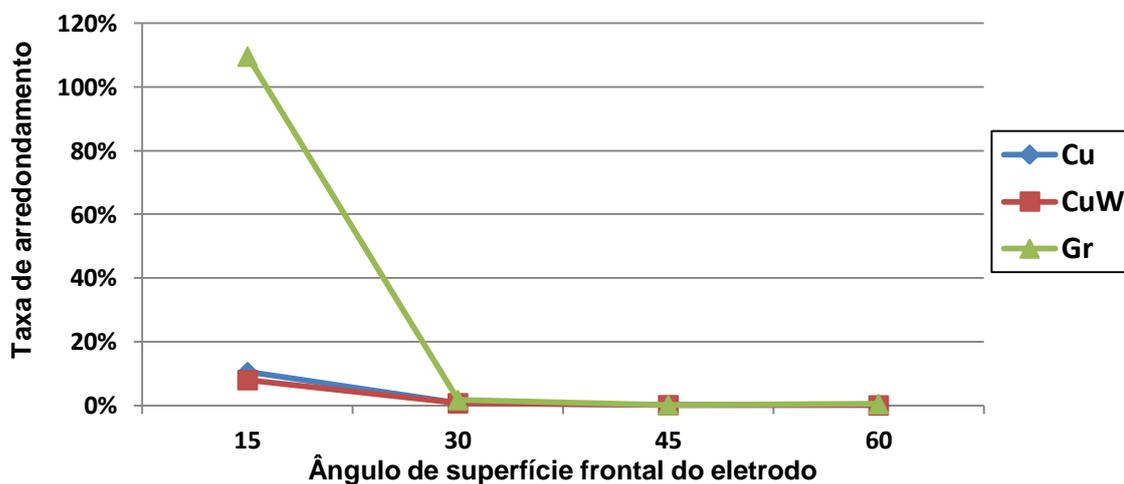


Figura 41 - Taxa de arredondamento em função do ângulo de superfície frontal no tempo de 60 minutos para os eletrodos de Cu, CuW e Gr.

Os eletrodos de grafite Elet15, são os que apresentaram o maior valor para taxa de arredondamento, com 109 %. Vale resaltar que os eletrodos de grafite durante a usinagem não se comportaram como os eletrodos de cobre eletrolítico e cobre tungstênio, onde o raio de canto é uniformemente crescente no decorrer da usinagem. Os eletrodos de cobre e cobre-tungstênio também tiveram a maior taxa de arredondamento com os Elet15, sendo 10 % para Cu e 8 % para o CuW.

Analisando os Elet30, percebe-se que o grafite mantém a maior taxa de arredondamento (1,7%), seguido pelo Cu (0,79%) e pelo CuW (0,70%). Com o Elet45, a taxa de arredondamento dos eletrodos continuam decrescendo, com valores abaixo de 0,2%, sendo o de CuW com menor valor (0,09%).

Os eletrodos Elet60 apresentaram a menor taxa de arredondamento em relação aos demais ângulos analisados. O grafite apresenta a maior taxa de arredondamento (0,38%), seguido pelo Cu (0,01%) e pelo CuW (0,01%).

Percebe-se a baixa taxa de arredondamento do CuW, esse índice pode ser explicado da seguinte maneira: a liga de Cu-W utilizada como material de eletrodo é composto por 30% de Cu e 70% de W, em que o elemento de tungstênio tem um ponto de fusão de 3410 °C. Conseqüentemente, a elevada concentração de

tungstênio promove uma melhor resistência do eletrodo contra a degradação térmica desgaste durante a usinagem.

## **4.2 Análise de integridade da superfície do eletrodo**

Com objetivo de verificar a presença de novos elementos químicos, na comparação dos materiais utilizados como eletrodos antes e depois da usinagem, nesta seção será apresentado o ensaio de XRD e o ensaio do MEV para identificar elementos que agregaram na superfície de usinagem no decorrer do processo.

Para tanto, considera-se como estado inicial dos materiais (antes da usinagem) a composição química conforme apresentada e certificada em documento de qualidade do fornecedor dos materiais. Dessa forma, tem-se que no eletrodo de cobre eletrolítico deve-se ter apenas a presença de cobre (100%). Para o eletrodo de grafite, o único elemento químico presente no estado inicial é carbono (100%) e para o eletrodo de cobre-tungstênio, deve-se ter cobre (30%) e tungstênio (70%).

Partindo-se dessa premissa, na análise por XRD e por MEV dos eletrodos após a usinagem, qualquer outro material, que possa ter se depositado sobre o eletrodo ou que tenha interferido em sua composição microestrutural, aparecerá como algum elemento químico que não estava na análise do estado inicial.

a) Eletrodo de cobre: pela análise do diagrama XRD (Figura 42) realizado sobre a superfície do eletrodo de cobre eletrolítico, após a operação de usinagem de eletroerosão do aço AISI H13, pode-se perceber que não foram encontrados nenhum tipo de alterações na microestrutura cristalina do cobre. Essa observação baseia-se na comparação entre os picos obtidos do diagrama XRD e a carta padrão de difração para o cobre. Observa-se, portanto, que não houve a formação de carbonetos ou outros compostos semelhantes.

Em seguida, o mesmo eletrodo foi submetido à análise por espectrometria com o intuito de se verificar a presença de outros elementos aderidos a sua superfície, como por exemplo o ferro, conforme pode ser notado em distintas regiões ressaltadas na Figura 43. Os resultados desta análise são detalhados na Tabela 10 em números percentuais. O ferro, o cromo, o silício, o molibdênio e o alumínio não formam carbonetos em cobre e são geralmente encontrados como uma solução sólida com o cobre.

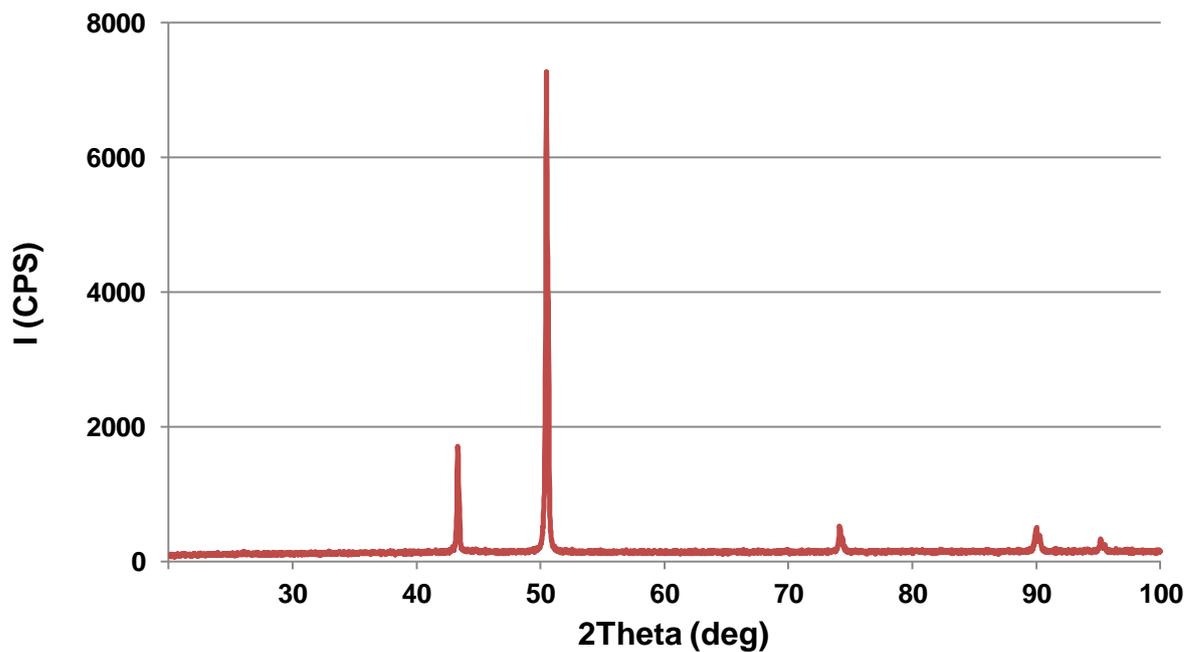


Figura 42 – Difratoograma do eletrodo de cobre após usinagem do AISI H13.

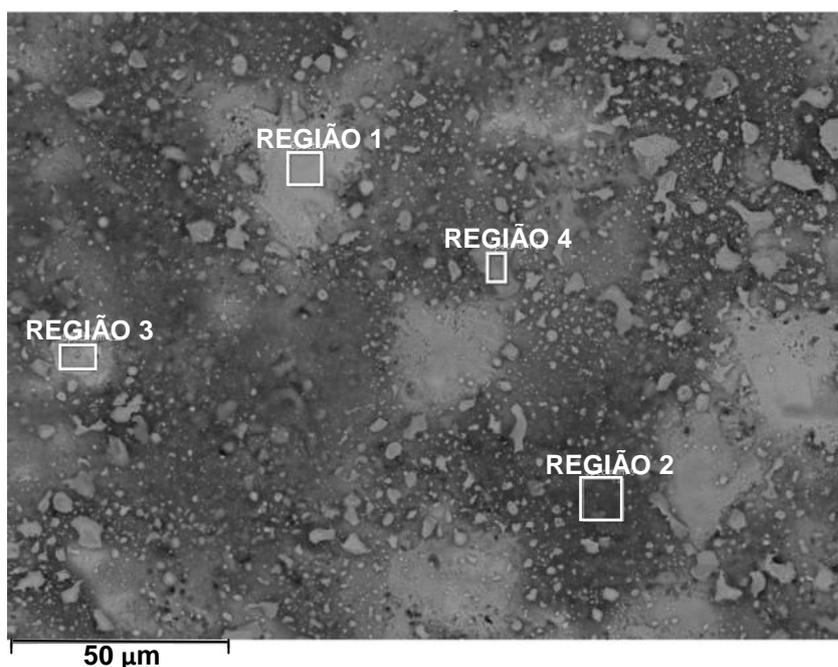


Figura 43 - Imagem obtida por MEV do eletrodo de cobre após usinagem do aço AISI H13.

Tabela 10 - Espectro da superfície do eletrodo de cobre eletrolítico após usinagem do aço AISI H13.

Região\Elemento	Cu	Fe	Cr	Si	Mo	Al	V
1	70,5	8,5	0,7	0,2	-	-	-
2	22,3	69,1	4,5	1,2	-	1,0	0,8
3	87,8	11,1	0,9	-	-	-	0,2
4	4,2	80,1	7,3	0,6	5,0	-	2,8

b) Eletrodo de cobre tungstênio: no diagrama do XRD realizado na superfície do eletrodo de cobre tungstênio, na usinagem do aço ferramenta AISI H13, mostrado na Figura 44, destaca que surgiram novos compostos químicos além do cobre e do tungstênio inicialmente presentes no eletrodo. Dois tipos de carbonetos de tungstênio são evidenciados e a causa mais provável é a pirólise do dielétrico (hidrocarboneto) na superfície do eletrodo, devido à alta temperatura durante a remoção de material.

O difratograma na Figura 44, mostra a presença de carboneto de tungstênio, sob a forma de WC ou W<sub>2</sub>C. Esse novo elemento tem como característica principal o aumento da dureza da camada branca, influenciando também na taxa de desgaste do eletrodo, conforme mencionado no trabalho de Marafona, (2007) e Amorim et al., (2010).

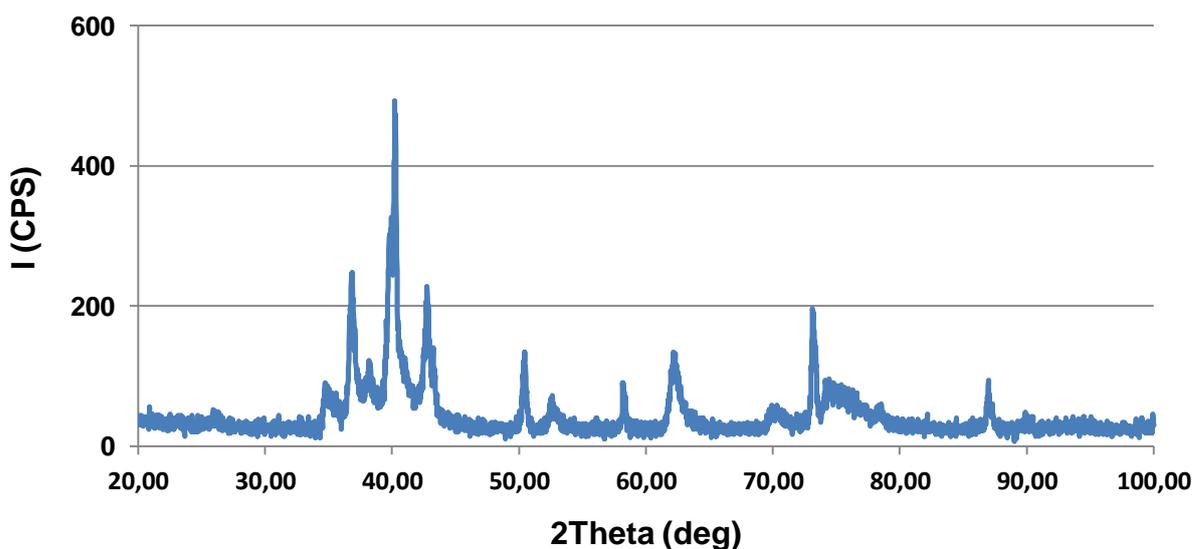


Figura 44 – Difratograma do eletrodo de cobre tungstênio após usinagem do AISI H13.

Com a análise de espectrometria (Figura 45), comprova-se a ocorrência de outros elementos químicos que, após serem removidos do material da peça, aderiram na superfície do eletrodo. Os resultados desta análise estão detalhados na Tabela 11, que apresenta os elementos e suas respectivas concentrações observadas em valores percentuais.

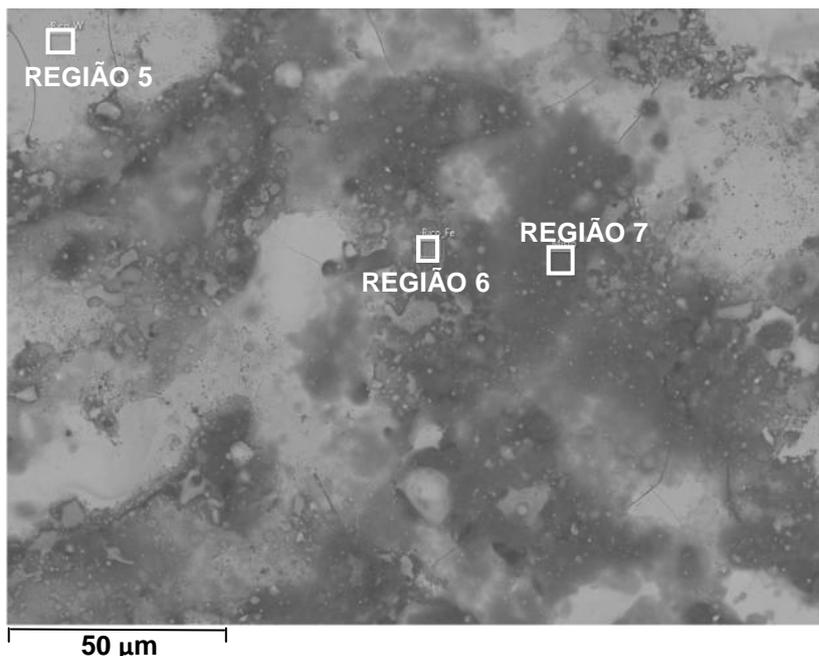


Figura 45 - Imagem obtida por MEV do eletrodo de cobre tungstênio após usinagem do aço AISI H13.

Tabela 11 - Espectro da superfície do eletrodo de cobre tungstênio após usinagem do aço AISI H13.

Região\Elemento	W	Fe	Cu	Cr	Si	Mo	V
5	74,9	21,7	1,1	1,8	-	-	0,5
6	2,5	88,4	-	6,2	0,7	-	1,5
7	35,4	53,3	5,0	3,7	-	2,1	0,6

c) Eletrodo de Grafite: no diagrama XRD realizado na superfície do eletrodo de grafite, na usinagem do aço ferramenta AISI H13, mostrado na Figura 46, assim como no caso do eletrodo de cobre eletrolítico, não foram observados nenhum tipo de alteração na microestrutura cristalina do grafite.

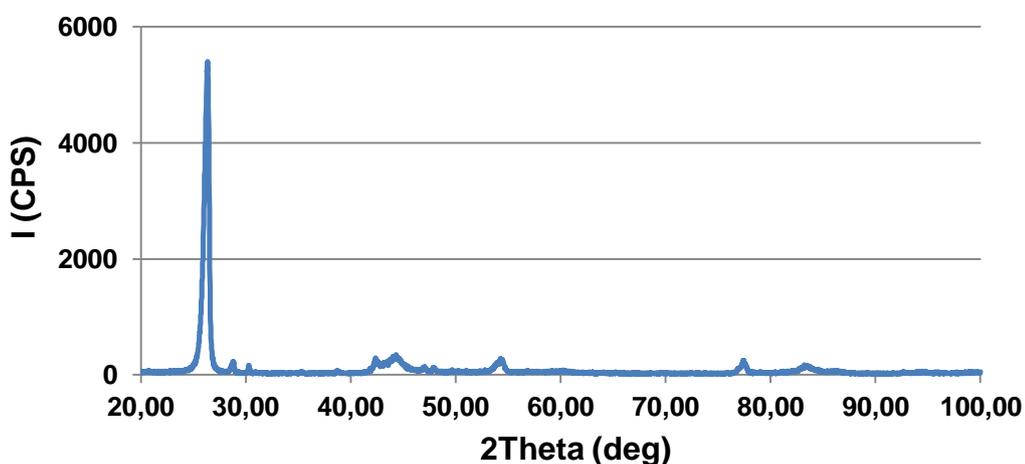


Figura 46 - Difratograma do eletrodo de grafite após usinagem do AISI H13.

Em seguida, assim como nos dois casos anteriores, o eletrodo foi submetido à análise por espectrometria com o intuito de se verificar a presença de outros elementos aderidos a sua superfície, como por exemplo o ferro, conforme pode ser notado em distintas regiões ressaltadas na Figura 47. Os resultados dessa análise estão detalhados na Tabela 12, que apresenta os elementos e suas respectivas concentrações observadas em valores percentuais.

Apesar de a análise EDS não ser recomendada para a verificação da concentração de carbono, essa mesma foi mantida com o intuito de se ter valores mais corretos sobre a concentração dos outros elementos. Caso contrário, por exemplo, na região 8, a concentração de Ferro seria algo em torno de 98,76%, o que está muito afastado do valor exato.

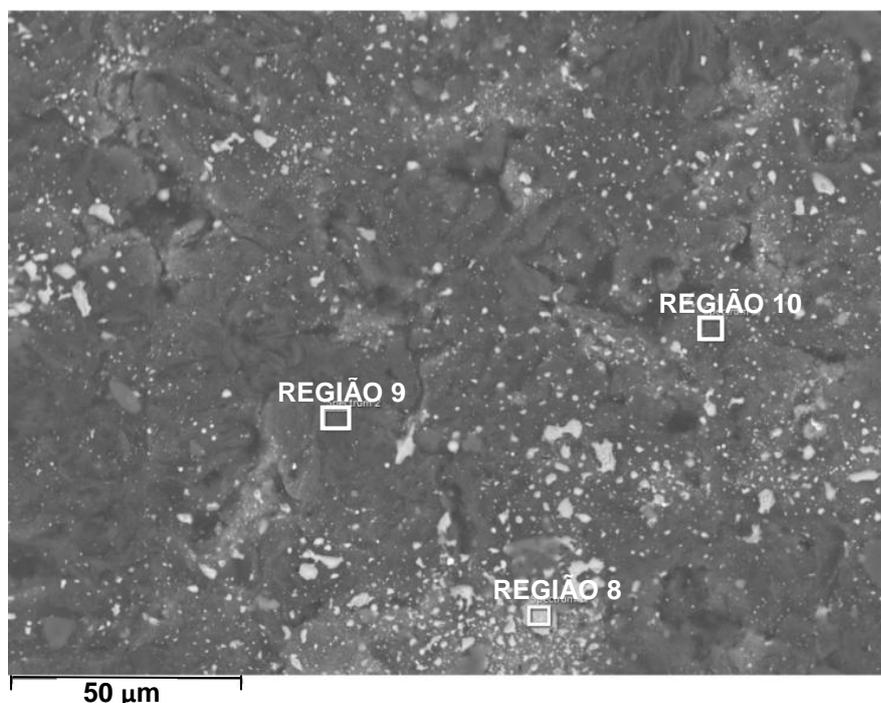


Figura 47 - Imagem obtida por MEV do eletrodo de grafite após usinagem do aço AISI H13.

Tabela 12 - Espectro da superfície do eletrodo de grafite após usinagem do aço AISI H13.

Região\Elemento	C	Fe	Cr	Mo	V	Si
8	30,2	58,9	4,3	2,1	1,4	0,7
9	95,4	4,3	0,3	-	-	-
10	94,0	4,8	0,6	0,4	0,2	-

Os resultados da seção 4.2, gerados da espectroscopia de energia dispersiva (EDS), mostram que existem elementos de composição da peça de trabalho em quantidades significativas na superfície do eletrodo ferramenta. A camada branca é formada por grandes quantidades de carbono e ferro. Porém essa técnica não é adequada para definir o percentual de carbono na superfície em análise.

No entanto, os elementos de composição da peça de trabalho, tais como cromo, molibdênio e vanádio são conhecidos como bons catalisadores para a precipitação de carbonetos (MOHRI et al., 1995; MARAFONA, 2007).

## 5 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados apresentados neste trabalho relativos a ensaios de EDM, verificando o dimensional do desgaste de canto e a composição química dos eletrodos após usinagem do aço AISI H13, pode-se concluir que:

- Os eletrodos ensaiados apresentam um valor expressivo do desgaste de canto, nos primeiros cinco minutos comparado com os demais tempos de usinagem.
- O ângulo de superfície frontal influencia diretamente no valor de desgaste de canto do eletrodo, sendo que quanto maior o ângulo de superfície frontal, menor o desgaste de canto, ou seja, menor o raio de canto no final da vida do eletrodo.
- Na análise dos eletrodos de grafite, até os 20 minutos de usinagem, há um arredondamento do canto, com crescimento gradativo do raio, após esse tempo de usinagem, começa a ocorrer degradação da superfície frontal gerando instabilidade do arredondamento. Na espectrometria do eletrodo de grafite há grande concentração de material da peça agregada, levando a crer que esse material fragiliza a região da quina do eletrodo. Nos eletrodos com ângulo de superfície frontal de  $60^\circ$  é mais evidenciado esse fenômeno.
- Os eletrodos de menor ângulo de superfície frontal apresentaram maior taxa de arredondamento, com valores de expressivos nos primeiros cinco minutos de usinagem, devido ao grande valor dimensional de desgaste de canto e baixa remoção de material da peça.
- O material com menor taxa de arredondamento até os dez minutos de usinagem foi o cobre eletrolítico, sendo este material de ideal escolha para usinagem de acabamento rápido para todos os ângulos de superfície ensaiado. Para os demais tempo, ou seja, dos vinte minutos a cem minutos de usinagem, os eletrodos de cobre-tungstênio obtiveram menor taxa de arredondamento, podendo este material, ser usado como eletrodo para usinagem em geral de acabamento.
- Foi constatado grande presença de material da peça nos eletrodos ensaiados, o que tem grande influência no desgaste de canto do eletrodo.

Estes resultados possibilitaram a implantação no processo de EDM, no projeto da quantidades de eletrodos para usinar uma determinada cavidade, na usinagem da empresa Artiz Matriz. A redução do número de eletrodos já foi observado em dois projetos após a implantação da taxa de arredondamento no processo. Estes fatores possibilitaram a redução do custo do produto na operação de eletroerosão na usinagem de cavidades de moldes.

### **5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Durante os testes realizados, foram identificadas algumas possibilidades de novos trabalhos. A seguir, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros, julgados importantes para a continuidade desta pesquisa

- Avaliar o comportamento do eletrodo de grafite no desgaste de canto, com outras condições de usinagem.
- Criar outros métodos para medir o desgaste de canto do eletrodo, de maneira a acompanhar o desgaste durante a usinagem sem retirar o eletrodo da máquina.
- Verificar a integridade da superfície em outros tempos de usinagem e em diversas regiões no desgaste de canto, para assim acompanhar o comportamento metalúrgico do material do eletrodo.
- Avaliar o comportamento do desgaste de canto em eletrodos utilizando a suspensão de pós no dielétrico, surgindo assim novos valores para taxa de arredondamento.

## REFERÊNCIAS

- AAS, K. L. Performance of two graphite electrode qualities in EDM of Seal slots in jet engine turbine vane. **Journal of Materials Processing Technology**, v.149, p.152–156, 2004.
- ALBANO, A. E. **Análise comparativa entre os processos de fresamento 3 e 5 eixos para a fabricação de moldes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Sociedade Educacional de Santa Catarina - SOCIESC, Joinville, Brazil, p. 95, 2008.
- AMORIM, F.L. **Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga de Cobre CuBe para Ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, Brazil, p.147, 2002.
- AMORIM, F.L.; WEINGAERTNER, W.L. The behavior of graphite and copper electrodes on the finish die-Sinking electrical discharge machining (EDM) of AISI P20 tool Steel. **J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng**, v.29, p.366-371, 2007.
- AMORIM, F.L.; SCHAFER, G.; STEDILE, L.J.; BASSANI, I.A. On the behavior of parameters and copper-tungsten electrode edge radius wear when finish sinking edm of tool steel. **IMW – Institutsmitteilung**, v.35, p.121-140, 2010.
- AÇOS FAVORIT. **Sequência de processamento do aço AISI H13**. Disponível em <http://www.favorit.com.br>. Acesso em maio de 2013.
- BLEYS, P.; Kruth, J.-P.; Lauwers, B. Sensing and compensation of tool wear in milling EDM. **Journal of Materials Processing Technology**, v.149, p.139–146, 2004.
- BOUAZIZ, Z.; BEN YOUNES, J.; ZGHAL, A., Cost estimation system of dies manufacturing based on the complex machining features, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 28, p.262–271, 2006.
- BRUYN, H.E. Some aspects of the influence of gap flushing on the accuracy in finishing by spark erosion. **Annals of CIRP**, Great Britain, v.18, p.147-151, 1970.
- CHEN, D. C.; WANG, Y. K.; LIN, G. F. Effect of electrode route motion on electrode wear in EDM machining of mold steel. **Journal Sci Eng**, v.38, p.2793-2800, 2013.

CHEN, Y.; MAHDAVIAN, S.M. Parametric study into erosion wear in a computer numerical controlled electro-discharge machining process. **Wear** **236**, p.350–354, 1999.

COGUN, C.; AKASLAN, S. The effect of machining parameters on tool electrode wear and machining performance in electric discharge machining. **KSME Int J**, v.16, n.1, p.46–59, 2002.

COGUN, C.; POYRAZOGLU, O. The variation of machining performance with machining parameters in EDM. In: **Proceedings of the 2nd International Conference on Design and Production of Dies and Molds**, Kusadası, Turkey, 2001.

CROOKALL, J.R. A theory of planar electrode face wear in EDM. **Ann CIRP**, v.28, n.1, p.125–129, 1979.

CROOKALL, J.R.; FEREDAY, R.J. An experimental determination of the degeneration of electrode shape in EDM (part 1). **Microtecnic**, v.17, n.4, p.197–200, 1973.

CROOKALL, J.R.; FEREDAY, R.J. An experimental determination of the degeneration of electrode shape in EDM (part 2). **Microtecnic**, v.17, n.2, 1997-1999.

DIBITONTO, D. D. et al. Theoretical models of the electrical discharge machining process I: a simple cathode erosion mode. **Journal of Applied Physics**, USA, v.66, n.9, p.4095-4103, 1989.

DROZDA, T. J. **Tool and manufacturing engineers handbook: machining**. USA: Society of Mechanical Engineers, v.5, 1983.

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

ENGEMAQ. **Manual de instalação, operação e manutenção: EDM 200 NC e EDM 440 NC**. Caxias do Sul: Engemaq, 2002

EUBANK, P. T. et al. Theoretical models of the electrical discharge machining process III: the variable mass, cylindrical plasma mode. **Journal of Applied Physics**, USA, v.73, n.11, p.7900-7909, 1993.

- FUKUZAWA , Y. et al., Electrical discharge machining properties of noble crystals. **Journal of Materials Processing Technology**, v.149, p.393–397, 2004.
- GUITRAU, E. P. **The EDM Handbook**. 1. ed. USA: Hanser Gardner Publications, v.305, 1997.
- HAN, Fuzhu; KUNIEDA, Masanori., Development of parallel spark electrical discharge machining., **Precision Engineering**, v.28, p.65–72, 2004.
- HO, K. H.; NEWMAN, S. T. State of the art electrical discharge. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.43, p.1287–1300, 2003.
- JESWANI, M.L. Dimensional analysis of tool wear in electrical discharge machining. **Wear**, v.55, p.153–161, 1979.
- JHA, B.; RAM, K. ; RAO, M. An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining. **Journal of Engineering Science and Technology**, v.12, p.118 – 130, 2011.
- KERN, R. Sinker electrode material selection. **EDM Today**, July/August, p.0-6, 2008.
- KIYAK, M.; ÇAKIR, O. Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v.191, p.141–144, 2007.
- KLOCKE, F. et al; The effects of powder suspended dielectrics on the thermal influenced zone by electrodischarge machining with small discharge energies. **Journal of Materials Processing Technology**, v.149, p.191-197, 2004.
- KLOCKE, F.; SCHWADE, M.; KLINK, A.; VESELOVAC, D. Analysis of material removal rate and electrode wear in sinking EDM roughing strategies using different graphite grades, **Ann CIRP**, v.6, p.163-167, 2013.
- KOENIG, W.; WEILL, R.; WERTHEIM, R.; JUTZLER, W.I. The flow fields in the working gap with electro-discharge-machining. **Ann CIRP**, v.25, n.1, p.71–76, 1977.
- KÖNIG, W.; KLOCKE, F.; LENZEN, R., The electrical machining processes - what demands will they face in the future, **International Journal of Electrical Machining**, v.1, n.1, p.3-7, 1996.
- KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren - 3: abtragen und generieren**. Berlin: Springer, 1997.

- LEE, H. T.; TAI, T. Y. Relationship between EDM parameters and surface crack formation. **Journal of Materials Processing Technology**, v.142, p.676–683, 2003.
- 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, p.344–358, 2001.
- LEVY, G. N., The proper choice of hydrocarbon dielectric fluid for EDM applications: a comprehensive comparison, **The Japan Society of Electrical-Machining Engineers**, v.1, p.9-13, 1989.
- LONGFELLOW, J.; WOOD, J.D.; PALME, R.B. The effects of electrode material properties on the wear ratio in spark-machining. **J Inst Met**, v.96, p.43–48, 1968.
- MACIEL, J. C. **Aços para molde**. Villares Metals S/A - Grupo Sidenor, O Mundo da Usinagem, 2003.
- MALLOY, R.A., **Plastic part design for injection molding**, 1. ed. USA: Hanser Publication, v.1, 1994.
- MASUZAWA, T.; HEUVELMAN, C.J. A self flushing method with spark erosion machining. **Ann CIRP**, v.32, n.1, p.109–111, 1983.
- MOHRI, N.; SUZUKI, M.; FURUYA, M.; SAITO, N. Electrode wear process in electrical discharge machining. **Ann CIRP**, v. 44, n.1, p.165–168, 1995.
- MOHRI, N.; TAKEZAWA, H.; SAITO, N. On-the-machine measurement in EDM process by a calibration system with polyhedra. **Ann CIRP**, v.43, n.1, p.203–206, 1994.
- MÜLLER, H., Beitrag zur klärung funkenerosivervorgänge. **Elektrowärme, Deutschland**, v.23, n.3, 1965.
- MURRAY, J.; ZDEBSKI, D.; CLARE, A. T. Workpiece debris deposition on tool electrodes and secondary discharge phenomena in micro-EDM. **Journal of Materials Processing Technology**, v.212, p.1537-1547, 2012.
- NARASIMHAN J.; YU Z. Y.; RAJURKAR, K. P. Tool wear compensation and path generation in micro and macro EDM. **Journal of Materials Processing Technology**, v.7, p.75–82, 2005.
- NGUYEN, M. D.; WONG, Y. S.; RAHMAN, M. Profile error compensation in high

precision 3D micro-EDM milling. **Journal Precision Engineering**, v.37, p.399-407, 2012.

OLINIKI, Ricardo, **Influência da combinação entre os parâmetros de usinagem por eletroerosão na integridade superficial do aço AISI H13 temperado e revenido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UTFPR, PPGEM, Curitiba, p.127, 2009.

OZGEDIK, A.; COGUN, C. An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining. **Int. J. Adv. Manuf. Technol**, v.27, p.488 – 500, 2006.

PELLICER, N.; CIURANA, J.; DELGADO, J. Tool electrode geometry and process parameters influence on different feature geometry and surface quality in electrical discharge machining of AISI H13 steel. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v.22, p.575-584, 2009.

PHAM D. T.; DIMOV S. S.; BIGOT S.; IVANOV A.; POPOV K., Micro-EDM—recent developments and research issues. **Journal of Materials Processing Technology**, v.149, n.1–3, p.50–57, 2004.

RAJURKAR K.P.; YU Z.Y. 3D micro-EDM using CAD/CAM. **Ann CIRP**, v.49, n.1, p.127–130, 2000.

SAMUEL, M.P.; PHILIP, P.K. Power metallurgy tool electrodes for electrical discharge machining. **Int J Mach Tools Manuf**, v.37, n.11, p.1625–1633, 1997.

SANTOS, Irapuan, **Análise dos parâmetros de entrada na eletroerosão de penetração da liga de titânio Ti-6Al-4V.**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UTFPR, PPGEM, Curitiba, p.126, 2010.

SCHUMACHER, B. M., About de role of debris in the gap during electrical discharge machining, **Ann CIRP**, v.39, n.1, p.197-190, 1990.

SILVA, N. H., **Usinagem de furos de pequenos diâmetros na liga de titânio Ti6Al4v em máquina de eletroerosão por penetração**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica, Curitiba, p.109, 2006.

SOUZA, A. F., **Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem em altas velocidades**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - EESC/USP - Universidade de São Paulo, São Carlos, p.171, 2004.

Stedile, Leandro José, **Avaliação de classes de eletrodo de grafita na eletroerosão por penetração da liga Ti6Al4V**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica, Curitiba, p.71, 2009.

SNOEYS, R.; STAELENS, F.; DEKEYSER, W. Current trends in non-conventional machining techniques. **Ann. CIRP**, v.35, n.2, p.467–480, 1986.

TOMLINSON, W. J.; ADKIN, R., Microstructure and properties of electrodischarge machined surfaces. **Surface Engineering**, v.8, n.4, p.283-288, 1992.

TRIOLA, Mário F. **Introdução à estatística**. 7ª edição. Rio de Janeiro, LTC, 1999.

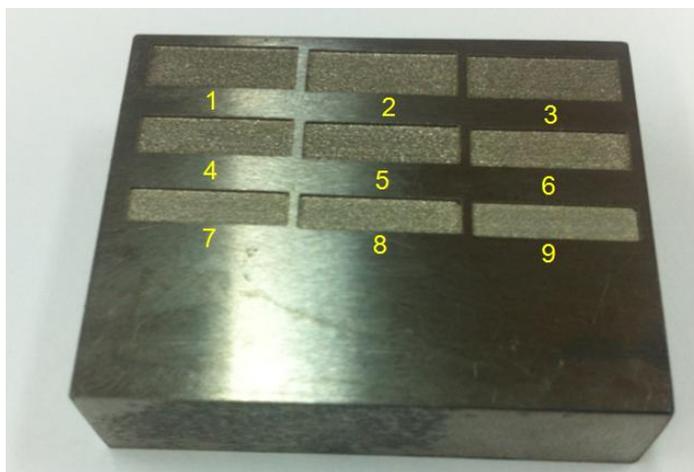
TSAI, Y.-Y., Masuzawa, T., An Index to Evaluate the Wear Resistance of the Electrode in Micro-EDM, **Journal of Materials Processing Technology**, v.149, n.1-3, p.304-309, 2004.

VDI – VEREIN DEUTSCHER INGENIEUR. **Elektroersive bearbeitung: definitionenund terminologie**. 3402. Dusseldorf: VDI, 1990.

YU, Z. Y.; MASUZAWA, T.; FUJINO, M. 3D micro-EDM with simple shape electrode, part 1: machining of cavities with sharp corners and electrode wear compensation. **Journal Electr. Mach.**, v.3, p.7–12, 1998.

## APÊNDICE A

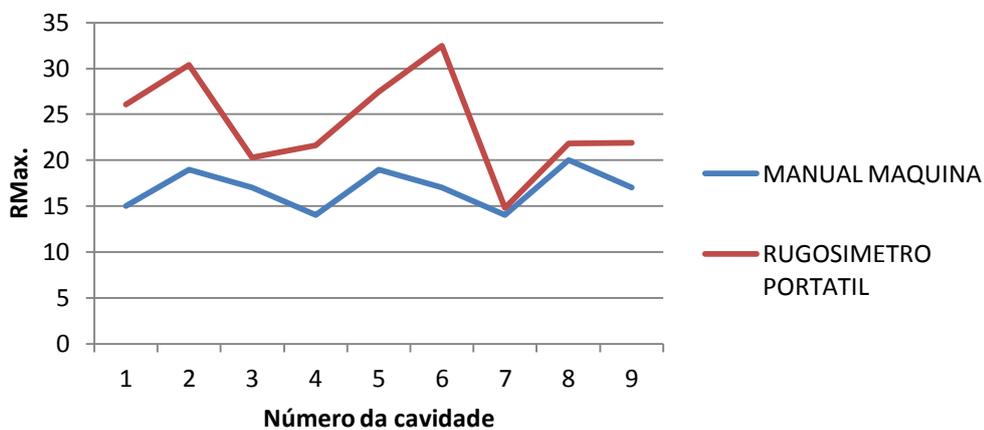
### Pré ensaio - Rugosidade x Parâmetros elétricos



Comparativo com valores de Ry do catálogo do fabricante da máquina e valores de rugosidade máxima medidas após usinagem no pré ensaio

1	Ry	2	Ry	3	Ry
Catálogo	15	Catálogo	19	Catálogo	17
Rugosímetro	26,1	Rugosímetro	30,4	Rugosímetro	20,3
4	Ry	5	Ry	6	Ry
Catálogo	14	Catálogo	19	Catálogo	17
Rugosímetro	21,6	Rugosímetro	27,5	Rugosímetro	32,5
7	Ry	8	Ry	9	Ry
Catálogo	14	Catálogo	20	Catálogo	17
Rugosímetro	14,8	Rugosímetro	21,8	Rugosímetro	21,9

### Rugosidade em Rmax.



## APÊNDICE B

Valores das médias e desvio padrão para o raio de arredondamento (R.média) e profundidades de usinagem (P.média) com eletrodos de cobre eletrolítico.

Ang. Sup. F.	T. usin (min)	R.média (µm)	R.desvio	P.média (mm)	P.desvio
15_Cu	0	25,00	6,36		
15_Cu	5	80,50	23,85	0,68	0,08
15_Cu	10	99,50	11,13	1,06	0,05
15_Cu	20	117,00	6,36	1,57	0,07
15_Cu	30	127,00	9,54	1,82	0,11
15_Cu	45	137,00	6,36	2,33	0,07
15_Cu	60	146,00	3,18	2,85	0,10
15_Cu	80	151,00	0,00	3,41	0,13
15_Cu	100	155,50	7,95	3,69	0,22

Ang. Sup. F.	T. usin (min)	R.média (µm)	R.desvio	P.média (mm)	P.desvio
30_Cu	0	20,00	3,18		
30_Cu	5	79,50	1,59	0,93	0,09
30_Cu	10	102,00	6,36	1,45	0,11
30_Cu	20	110,50	7,95	2,27	0,14
30_Cu	30	115,50	4,77	2,67	0,09
30_Cu	45	124,00	9,54	3,49	0,14
30_Cu	60	134,00	6,36	4,27	0,17
30_Cu	80	133,00	3,18	4,99	0,07
30_Cu	100	148,00	3,18	5,48	0,11

Ang. Sup. F.	T. usin (min)	R.média (µm)	R.desvio	P.média (mm)	P.desvio
45_Cu	0	21,00	6,36		
45_Cu	5	79,50	7,95	1,20	0,14
45_Cu	10	85,50	1,59	1,86	0,11
45_Cu	20	94,50	4,77	2,90	0,16
45_Cu	30	106,00	9,54	3,82	0,28
45_Cu	45	115,50	14,31	4,77	0,18
45_Cu	60	124,50	7,95	5,70	0,26
45_Cu	80	132,00	12,72	6,67	0,18
45_Cu	100	143,50	4,77	7,41	0,27

Ang. Sup. F.	T. usin (min)	R.média (µm)	R.desvio	P.média (mm)	P.desvio
60_Cu	0	18,50	1,59		
60_Cu	5	67,00	3,18	1,52	0,06
60_Cu	10	71,50	1,59	2,47	0,21
60_Cu	20	81,50	1,59	3,64	0,14
60_Cu	30	82,50	1,59	4,80	0,20
60_Cu	45	96,00	3,18	5,54	0,15
60_Cu	60	90,00	6,36	7,04	0,15
60_Cu	80	101,00	6,36	8,29	0,25
60_Cu	100	119,00	6,36	9,60	0,35

## APÊNDICE C

Valores das médias e desvio padrão para o raio de arredondamento (R.média) e profundidades de usinagem (P.média) com eletrodos de cobre-tungstênio.

Ang. Sup. F.	T. usin (min)	R.média (µm)	R.desvio	P.média (mm)	P.desvio
15_CuW	0	18,00	3,18		
15_CuW	5	87,00	6,36	0,27	0,04
15_CuW	10	123,50	1,59	1,57	0,05
15_CuW	20	168,00	3,18	2,27	0,16
15_CuW	30	213,00	3,18	3,05	0,14
15_CuW	45	226,00	3,18	4,40	0,23
15_CuW	60	237,00	0	5,55	0,18
15_CuW	80	241,50	1,59	7,27	0,12
15_CuW	100	268,00	6,36	8,75	0,26

Ang. Sup. F.	T. usin (min)	R.média (µm)	R.desvio	P.média (mm)	P.desvio
30_CuW	0	15,50	4,77		
30_CuW	5	50,50	4,77	0,14	0,04
30_CuW	10	114,50	4,77	1,55	0,12
30_CuW	20	156,50	7,95	3,77	0,18
30_CuW	30	182,50	20,67	4,85	0,13
30_CuW	45	196,50	1,59	6,32	0,17
30_CuW	60	212,00	6,36	7,27	0,19
30_CuW	80	222,00	6,36	8,45	0,10
30_CuW	100	249,00	0	10,85	0,24

Ang. Sup. F.	T. usin (min)	R.média (µm)	R.desvio	P.média (mm)	P.desvio
45_CuW	0	15,50	1,59		
45_CuW	5	52,50	1,59	0,17	0,06
45_CuW	10	99,50	1,59	1,70	0,14
45_CuW	20	133,00	6,36	4,25	0,14
45_CuW	30	148,00	3,18	5,75	0,20
45_CuW	45	161,50	7,95	7,95	0,07
45_CuW	60	175,00	6,36	9,20	0,24
45_CuW	80	184,00	3,18	10,85	0,25
45_CuW	100	200,00	9,54	12,37	0,42

Ang. Sup. F.	T. usin (min)	R.média (µm)	R.desvio	P.média (mm)	P.desvio
60_CuW	0	18,00	0		
60_CuW	5	69,50	7,95	0,16	0,05
60_CuW	10	93,50	4,77	1,20	0,12
60_CuW	20	113,00	6,36	4,27	0,12
60_CuW	30	125,00	6,36	6,29	0,10
60_CuW	45	141,50	4,77	8,30	0,20
60_CuW	60	147,00	6,36	10,51	0,21
60_CuW	80	153,00	6,36	12,47	0,12
60_CuW	100	165,50	1,59	14,05	0,29

## APÊNDICE D

Valores das médias e desvio padrão para o raio de arredondamento (R.média) e profundidades de usinagem (P.média) com eletrodos de grafite.

Ang. Sup. F.	T. usin (min)	R.média (µm)	R.desvio	P.média (mm)	P.desvio
15_Gr	0	15,50	1,59		
15_Gr	5	80,00	3,18	0,20	0,05
15_Gr	10	109,00	3,18	0,37	0,05
15_Gr	20	86,00	6,36	0,58	0,07
15_Gr	30	72,00	3,18	0,77	0,05
15_Gr	45	74,00	9,54	0,92	0,11
15_Gr	60	181,00	3,18	1,07	0,11
15_Gr	80	178,50	11,13	1,24	0,13
15_Gr	100	191,50	4,77	1,45	0,10

Ang. Sup. F.	T. usin (min)	R.média (µm)	R.desvio	P.média (mm)	P.desvio
30_Gr	0	11,00	3,18		
30_Gr	5	75,50	4,77	0,20	0,04
30_Gr	10	96,00	9,54	0,38	0,04
30_Gr	20	73,00	6,36	0,70	0,15
30_Gr	30	67,00	19,08	0,96	0,15
30_Gr	45	58,00	9,54	1,30	0,08
30_Gr	60	66,00	9,54	1,41	0,12
30_Gr	80	87,50	4,77	1,69	0,06
30_Gr	100	186,50	7,95	1,97	0,10

Ang. Sup. F.	T. usin (min)	R.média (µm)	R.desvio	P.média (mm)	P.desvio
45_Gr	0	13,00	6,36		
45_Gr	5	78,00	9,54	0,19	0,04
45_Gr	10	100,00	3,18	0,37	0,03
45_Gr	20	75,00	6,36	0,81	0,11
45_Gr	30	55,50	14,31	1,27	0,11
45_Gr	45	39,50	7,95	1,49	0,11
45_Gr	60	47,00	6,36	1,82	0,08
45_Gr	80	70,00	9,54	2,09	0,16
45_Gr	100	180,00	9,54	2,41	0,18

Ang. Sup. F.	T. usin (min)	R.média (µm)	R.desvio	P.média (mm)	P.desvio
60_Gr	0	16,00	9,54	0	
60_Gr	5	62,50	4,77	0,25	0,04
60_Gr	10	97,00	12,72	0,47	0,10
60_Gr	20	82,50	7,95	0,90	0,11
60_Gr	30	67,00	6,36	1,50	0,13
60_Gr	45	59,00	12,72	1,95	0,07
60_Gr	60	171,50	11,13	2,29	0,25
60_Gr	80	177,00	12,72	2,52	0,14
60_Gr	100	216,00	15,9	2,73	0,06

## APÊNDICE E

**Modelo de formulário para preencher a profundidade atingida pelo eletrodo de grafite em EDM, para uso no laboratório de fabricação.**

ÂNGULO DA SUPERFÍCIE FRONTAL: 15								
Mat.	Ton (sµ)	TS	DT%	Rmax	Vw%	Vv%	Ap (mm)	Te (min.)
1 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		5
2 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		10
3 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		20
4 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		30
5 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		45
6 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		60
7 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		80
8 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		100

ÂNGULO DA SUPERFÍCIE FRONTAL: 30								
Mat.	Ton (sµ)	TS	DT%	Rmax	Vw%	Vv%	Ap (mm)	Te (min.)
1 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		5
2 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		10
3 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		20
4 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		30
5 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		45
6 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		60
7 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		80
8 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		100

ÂNGULO DA SUPERFÍCIE FRONTAL: 45								
Mat.	Ton (sµ)	TS	DT%	Rmax	Vw%	Vv%	Ap (mm)	Te (min.)
1 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		5
2 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		10
3 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		20
4 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		30
5 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		45
6 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		60
7 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		80
8 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		100

ÂNGULO DA SUPERFÍCIE FRONTAL: 60								
	Ton (sµ)	TS	DT%	Rmax	Vw%	Vv%	Ap (mm)	Te (min.)
1 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		5
2 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		10
3 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		20
4 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		30
5 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		45
6 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		60
7 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		80
8 Grafite	50	1	91	15	2,6	18		100

Data do ensaio:
Observações:

## ANEXO A



Fone: (41) 3283 4556  
(41) 3059 8286

TRATAMENTOS TÉRMICOS LTDA.

CERTIFICADO DE QUALIDADE DE TRATAMENTO TÉRMICO		NR 29221	
São José dos Pinhais, 25 de Fevereiro de 2013			
Cliente <b>UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ</b>			
<b>ESPECIFICADO</b>		<b>NF/N OS/N</b>	<b>22 29221</b>
NOME: <b>BLOCO</b>			
Trat. Solicitado	TÊMPERA/REVENIM	Material	SAE H13
Profundidade camada	X-X-X	Dureza	45 – 48 HRC
Conforme sua solicitação, indicamos o tipo de tratamento efetuado segundo vossas indicações, enviadas com a NF de referência, e os resultados obtidos estatisticamente.			
<b>RESULTADO DO TRATAMENTO TÉRMICO</b>			
Tratamento térmico	TEMPERA/REVENIMENTO		
Profundidade de camada	X-X-X		
Dureza superficial	47 – 48 HRC		
Dureza núcleo	X-X-X-X		
Quantidade lote	16 PEÇAS		
Confirmamos que o tratamento térmico foi executado de acordo com as suas instruções e normas de trabalho de nossa empresa			
<b>N O R M A T I C</b> DEPARTAMENTO DE CONTROLE DE QUALIDADE FEDERICO			

F1404-1

**ANEXO B**

GDRW COMERCIO METAIS NAO FERROSOS LTDA

S.PAULO, 18 de Abril de 2013

**CERTIFICADO DE QUALIDADE**Cliente: **COMERCIO DE METAIS METAL TROM LTDA**

Nota Fiscal: 42.480

Descrição: BC COBRE ELETROLITICO 1 X 1/8

Liga: C 110

Têmpera: DURO

**Composição Química**

Característica	Especificado Min.	Especificado Máx.
Cu (Cobre) + Ag (Prata)	99,9%	-

**Propriedades Físicas e Mecânicas**

Característica	Especificado Min.	Especificado Máx.
Resistencia a Tração	230 MPa	345 MPa
Dureza Rockwell F	80 HRF	-

MATERIAL FABRICADO CONFORME NORMA ASTM B-187 ATENDENDO AOS LIMITES  
ESPECIFICADOS

GDRW COMERCIO METAIS NAO FERROSOS LTDA

CNPJ: 10.616.554/0001-71 Inscrição Estadual: 148.480.485.115  
FORTE DOS FRANCESES 322 - PRQ S LOURENCO - S.PAULO - SP  
CEP: 08340-150 Telefone: 11 2100-8090

## ANEXO C

 <b>BRASSINTER S.A.</b> INDÚSTRIA E COMERCIO <small>AVENIDA DAS NAÇÕES UNIDAS, 21.344 - SÃO PAULO - S.P. - BRASIL          CEP 04795-911 - TELEFONE: (11) 5696-4822 - FAX: (11) 5696-4820          SITE: www.brassinter.com.br</small>		<b>DIVISÃO DE CONTATOS</b>	
<b>CERTIFICADO DE ANÁLISE</b>			<b>Nº 5205</b>
CLIENTE: METAL TROM LIGA: 30 C-I		DESENHO CLIENTE: 3,5 X 15 X 70mm DESENHO BRASSINTER: 3,5 X 15 X 70mm	
<b>ANÁLISES</b>			
DIMENSIONAL		FÍSICA	
ESPECIFICADO	ENCONTRADO		DUREZA: 93 (RB)
	MÁXIMO	MÍNIMO	DENSIDADE: (g/cm <sup>3</sup> )
			CAMADA Ag: (μ)
			CONDUTIBILIDADE ELÉTRICA: (%IACS)
QUÍMICA			
		ELEMENTO	%
		W	70,12
		Ag	OUTROS
		Cu	29,88
APROVADO <input checked="" type="checkbox"/>		APROVADO CONDICIONAL <input type="checkbox"/>	
REPROVADO <input type="checkbox"/>			
DATA: 20 / 05 / 2013		ANALISADO POR: WLADIMIR	
		VISTO: MORANDINI	