

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE MICROFURAÇÃO POR
ELETROEROSÃO POR FAÍSCAS DE BICOS INJETORES**

Mestrando: ALEXANDRE DE SOUZA
Orientador: Prof. Dr.-Ing. WALTER L. WEINGAERTNER

Florianópolis, novembro de 2000

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE MICROFURAÇÃO POR ELETROEROSÃO POR FAÍSCAS DE BICOS INJETORES

ALEXANDRE DE SOUZA

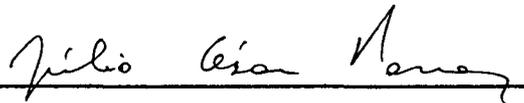
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner

Orientador



Prof. Júlio César Passos, Dr.

Coordenação da Pós-Graduação

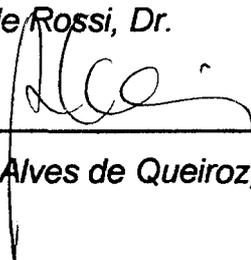
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Wagner de Rossi, Dr.



Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr.Eng



Prof. Abelardo Alves de Queiroz, Ph.D

Dedico este trabalho aos meus pais a quem devo hoje grande parte das minhas vitórias conquistadas.

Agradecimentos

À minha noiva **Taciana**, por sua compreensão, companheirismo e apoio durante este período.

Ao prof. **Walter L. Weingaertner**, por sua amizade, compreensão e orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao prof. **Rolf Schroeder**, pela sua amizade.

Ao prof. **Júlio César Passos**, por sua compreensão.

Ao **Sr. Heinz Heber**, por permitir a realização deste trabalho.

Um agradecimento especial ao **Sr. Klaus Braeuer**, por todo apoio prestado durante a realização deste trabalho.

Ao **Sr. Elizeu dos Santos da Cruz** e ao **Sr. Sérgio R. O. Rangel Silveira**, pelo pronto apoio prestado na realização das medições dos Bicos Injetores.

Meus sinceros agradecimentos a todos os colegas da **FEB 1 e outros departamentos da empresa Robert Bosch Ltda.** que contribuíram para a realização deste trabalho.

Sumário

Agradecimentos	iv
Sumário	v
Lista de figuras.....	ix
Simbologia.....	xii
Resumo	xvii
Abstract.....	xviii
Zusammenfassung.....	xix
1- Introdução.....	1
2- Objetivos.....	2
3- Estado da arte	4
3.1- Definição do processo de eletroerosão por faíscas	4
3.2- Princípio de remoção de material por eletroerosão por faíscas	4
3.3- Grandezas do processo que influenciam o resultado do trabalho.....	5
3.3.1- Parâmetros de regulação e parâmetros de trabalho.....	7
3.3.2- Critério para avaliação do resultado de trabalho.....	10
3.4- Princípio físico da descarga elétrica em um meio líquido.....	12
3.5- Histórico sobre a natureza física da remoção por eletroerosão	15
3.6- Princípio básico construtivo de uma máquina de eletroerosão por faíscas.....	16
3.7- Geradores	16
3.7.1- Geradores de relaxação.....	16
3.7.2- Geradores de pulso estático	17
3.8- Máquinas de eletroerosão por faíscas	18
3.8.1- Máquina de eletroerosão por faíscas para microfuração em bicos injetores.....	20
3.8.2- Sistema de posicionamento do eletrodo	21

3.9- Dielétrico	22
3.9.1- Formas de aplicação do dielétrico.....	22
3.9.2- Funções principais do dielétrico no processo de eletroerosão por faíscas	23
3.10 – Material do eletrodo e da peça no comportamento da erosão	25
3.10.1- Eletrodo de tungstênio	28
3.11- Variantes do processo de eletroerosão por faíscas	29
3.12- Características da superfície eletroerodida.....	30
3.13- Unidades para controle e supervisão do processo	33
3.13.1- Controle adaptativo do processo "AC"	33
4- Materiais e métodos.....	36
4.1- Material do corpo de prova.....	36
4.2- Corpo de prova	37
4.3- Eletrodo utilizado nos experimentos.....	38
4.4- Máquina-ferramenta utilizada nos experimentos.....	38
4.4.1- Cabeçote de erosão da máquina AGIE QUADRATON 1	40
4.5- Equipamentos utilizados para ajuste e monitoramento do processo	43
4.6- Equipamentos utilizados para avaliação dos resultados.....	45
4.7- Comportamento da vazão "interna" do dielétrico	45
4.8- Avaliação dos equipamentos	46
4.9- Parâmetros do programa de furação do gerador da máquina AGIE QUADRATON 1	47
4.10- Parâmetros de ajuste (parâmetros não-elétricos)	52
4.10.1- Dielétrico utilizado nos experimentos.....	52
4.11- Parâmetros geométricos do furo de injeção.....	53
4.12- Metodologia dos Experimentos	54
5- Desenvolvimento experimental	55

5.1- Ensaio preliminares.....	55
5.2- Influência da vazão "interna" do dielétrico, número de furos e ângulo axial....	56
5.2.1- Influência da vazão "interna" do dielétrico.....	56
5.2.2- Influência do número de furos.....	57
5.2.3- Influência do ângulo axial.....	58
5.3- Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com").....	58
5.4- Ensaio comparativos.....	60
5.5- Procedimento para a medição do diâmetro d_e e diâmetro d_i do furo de injeção.....	61
5.6- Procedimento para a medição do tempo de usinagem/furo.....	62
5.7- Procedimento para a determinação do fluxo hidráulico.....	62
5.5- Avaliação da qualidade de canto.....	62
6- Análise dos resultados.....	64
6.1- Generalidades.....	64
6.2- Influência da vazão "interna" do dielétrico, número de furos e ângulo axial....	65
6.2.1- Influência da vazão "interna" do dielétrico.....	65
6.2.2- Influência do número de furos de injeção.....	67
6.2.3- Influência do ângulo axial no diâmetro d_e do furo de injeção.....	68
6.3- Influência da fenda de trabalho e da regulagem de posicionamento do eletrodo.....	69
6.3.1- Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de furação "Nr" 1.....	71
6.3.2- Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de furação "Nr" 2.....	73

6.3.3- Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de furação "Nr" 3.....	76
6.3.4- Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de furação "Nr" 4.....	80
6.3.5- Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de furação "Nr" 5.....	83
6.4- Análise dos ensaios comparativos	86
6.4.1- Análise do fluxo hidráulico	87
6.4.2- Análise do diâmetro d_j	88
6.4.3- Análise do diâmetro d_e	89
6.4.4- Análise da conicidade	91
6.4.5- Análise do tempo de usinagem/furo.....	92
7- Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	93
7.1- Conclusões	93
7.2- Sugestões para trabalhos futuros	94
8-Referências bibliográficas	96
9- Anexos	101
9.1- Comportamento da vazão "interna" do dielétrico	101
9.2- Avaliação dos equipamentos utilizados nos experimentos	102
9.3- Valores de regulagem dos parâmetros do gerador	104

Lista de figuras

Figura 1.1 - Esquema de um furo de injeção de um bico injetor	3
Figura 2.1 - Fenda de trabalho s entre eletrodo e peça.....	4
Figura 3.1 - Grandezas do processo de eletroerosão por faíscas [10, 11].....	6
Figura 3.2 - Características elétricas do gerador de pulso estático [4, 11].....	8
Figura 3.3 - Representação esquemática das fases de descarga [4].....	12
Figura 3.4 - Representação microscópica das fases de descarga segundo Mironoff [13].....	14
Figura 3.5 - Esquema básico de uma máquina de eletroerosão por faíscas [4].....	16
Figura 3.6 - Forma do pulso de descarga de um gerador de relaxação [4].....	17
Figura 3.7 - Forma do pulso de descarga de um gerador de pulso estático [4].....	18
Figura 3.8 - Estrutura de uma máquina de eletroerosão por faíscas [43].....	19
Figura 3.9 - Eixos principais do cabeçote de uma máquina de eletroerosão por faíscas para bicos injetores (Máquina AGIE/CHARMILLES)	21
Figura 3.10 - Formas de aplicação do dielétrico na fenda de trabalho [4].....	22
Figura 3.11 - Variantes do processo de eletroerosão por faíscas [4]	29
Figura 3.12 - Fatores que influenciam a qualidade da superfície eletroerodida [10]	30
Figura 3.13 - Qualidade da superfície eletroerodida [33].....	31
Figura 3.14 - Metalurgia da camada termicamente afetada [33]	32
Figura 3.15 - Esquema básico de funcionamento "ACO" e "ACC" [10].....	33
Figura 3.16 - Circuito de controle para otimização da eletroerosão [4]	35
Figura 4.1 - Características do corpo de prova	37
Figura 4.2 - Máquina de eletroerosão por faíscas AGIE QUADRATON 1	38
Figura 4.3 - Representação esquemática mostrando as partes principais da máquina AGIE QUADRATON 1	39
Figura 4.4 - Corpo de prova fixado no pino posicionador	39
Figura 4.5 - Esquema do cabeçote de erosão da máquina AGIE QUADRATON 1 ..	41
Figura 4.6 - Esquema do prisma e tampa do prisma utilizado nos experimentos.....	41
Figura 4.7 - Visualização da vazão "externa" e "interna" do dielétrico	42
Figura 4.8 - Claridade originada no início do processo de erosão	43

Figura 4.9 - Bomba reguladora IKA de vazão "interna" do dielétrico utilizada nos experimentos.....	46
Figura 4.10 - Esquema do pino posicionador mostrando a vazão "interna" do dielétrico.....	52
Figura 5.1 - Contorno do furo e a "expulsão" de material no contorno do furo.....	63
Figura 6.1 - Influência da vazão "interna" v_i do dielétrico sobre o diâmetro d_i do furo de injeção.....	67
Figura 6.2 - Influência do número de furos de injeção n_f sobre o diâmetro d_i do furo de injeção.....	68
Figura 6.3 - Influência do ângulo axial β sobre o diâmetro d_e do furo de injeção.....	69
Figura 6.4 - Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo sobre a taxa de remoção V_w e sobre o desgaste relativo ϑ [12]	70
Figura 6.5 - Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de programa "Nr" 1	71
Figura 6.6 - Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de programa "Nr" 2.....	73
Figura 6.7 - Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de programa "Nr" 3.....	77
Figura 6.8 - Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de programa "Nr" 4.....	80
Figura 6.9 - Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de programa "Nr" 5.....	83
Figura 6.10 - Distribuição de frequência relativa para o fluxo hidráulico Q	88
Figura 6.11 - Distribuição de frequência relativa para o diâmetro d_i do furo	89
Figura 6.12 - Distribuição de frequência relativa para o diâmetro d_e do furo	90
Figura 6.13 - Distribuição de frequência relativa para a conicidade k do furo	91
Figura 6.14 - Distribuição de frequência relativa para o tempo de usinagem/furo t_u	92

Figura 9.1 - Rotação da bomba X vazão "interna" do dielétrico 101

Simbologia

SÍMBOLO	UNIDADE	DENOMINAÇÃO
Letras maiúsculas		
Q	cm ³ /30 s	Fluxo hidráulico
E	mm	Comprimento do furo injetor
X	mm	Distância entre a base do prisma e o pino posicionador
Nr		Sequência de programa de furação
W	mm	Caminho percorrido pelo eletrodo
U		Regulagem da polaridade do eletrodo
I	A	Corrente de descarga
T	μs	Tempo de descarga
S	nF	Capacitância do capacitor
P	μs	Tempo entre duas descargas elétricas
Com	%	Distância entre eletrodo e peça
Gain	%	Velocidade de posicionamento do eletrodo
U-I	volt	Tensão nominal do gerador
C1		Cabeçote de erosão 1
C2		Cabeçote de erosão 2
C3		Cabeçote de erosão 3
C4		Cabeçote de erosão 4
U	volt	Tensão de trabalho
W _e	mJ	Energia de descarga
P _e	watt	Potência de descarga
U _D	volt	Tensão de "ruptura" do dielétrico
V _R	m/s	Velocidade de avanço do eletrodo
V _W	mm ³ /min	Taxa de remoção de material na peça

V_E	mm^3/min	Taxa de remoção de material no eletrodo
R_a	μm	Rugosidade média aritmética
R_{max}	μm	Rugosidade máxima
R_t	μm	Profundidade máxima de rugosidade
R	Ω	Resistência elétrica
L	mH	Indutância
C	nF	Capacitância
D		Diodo
$\pm X$		Direção do eixo X
$\pm Y$		Direção do eixo Y
$\pm Z$		Direção do eixo Z
XY		Plano de posicionamento da peça
$\pm A$		Direção do eixo A
$\pm B$		Direção do eixo B
$\pm C$		Direção do eixo C
$\pm B$		Direção do eixo B
$\pm W$		Direção do eixo W
$\pm U$		Direção do eixo U
$\pm V$		Direção do eixo V
$DSL A P$		Denominação do corpo de prova (Bosch)
A	mm	Medida A
C_{gm}		Índice de repetibilidade do meio de medição
$D_{\text{m}95\%}$		Dispersão da medição com probabilidade de 95 %

Letras minúsculas

d_i	mm	Diâmetro do furo no lado interno do corpo do do bico injetor
-------	-------------	--

d_e	mm	Diâmetro do furo no lado externo do corpo do bico injetor
t_u	s	Tempo de usinagem/furo
t_d	s	Tempo de retardo de ignição
t_e	s	Tempo de descarga
t_i	s	Tempo de pulso
t_o	s	Tempo de pausa
t_p	s	Tempo de período
k	$\mu\text{m}/1,05 \text{ mm}$	Conicidade do furo de injeção
u	volt	Tensão ajustada no gerador
\hat{U}_i	volt	Tensão em vazio
s	mm	Fenda de trabalho
\hat{i}_e	volt	Corrente de descarga máxima
f_e	Hz	Frequência de descarga
f_p	Hz	Frequência de período
f_i	Hz	Frequência de pulsos em vazio
f_s	Hz	Frequência curto-circuitos
i_e	A	Corrente de descarga
\bar{U}_e	volt	Tensão média de descarga
\bar{I}_e	A	Corrente média de descarga
S_F	mm	Espaço frontal
S_L	mm	Espaço lateral
v_e	g/s	Vazão do dielétrico aplicada externamente no bico injetor
v_i	g/s	Vazão do dielétrico aplicada internamente no bico injetor
q	mm^3/s	Vazão do dielétrico
p	bar	Pressão do dielétrico
ϑ	%	Desgaste relativo
u_s	volt	Tensão de curto-circuito
f_s	Hz	Frequência de curto-circuitos

Letras gregas

τ		Relação de contato
φ	%	Rendimento de uma descarga elétrica
λ	%	Relação de frequências
η	%	Grau de eficiência
χ	$\mu\text{S/cm}$	Condutividade elétrica do dielétrico
α	graus	Ângulo radial do furo injetor
β	graus	Ângulo axial do furo injetor

Abreviaturas e símbolos químicos

EDM	Electrical Discharge Machining
CNC	Comando numérico computadorizado
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
SN	Schweizer Norm
DIN	Deutscher Institut für Normung
VS 18 066-VI	Aço para cementação (Norma Bosch)
SM 94	Especificação da resina deionizadora
AC	Adaptative control
ACC	Adaptative control constraint
ACO	Adaptative control optimization
C	Carbono
Si	Silício
Mn	Manganês
P	Fósforo
S	Enxofre
Al	Alumínio
Mo	Molibdênio
Cr	Cromo
Ni	Níquel

Cu

Cobre

Sn

Estanho

O₂

Oxigênio

Resumo

Uma importante aplicação do processo de eletroerosão por faíscas por penetração é a usinagem de furos de injeção de diâmetros pequenos em bicos injetores para motores que utilizam sistemas de injeção a diesel. Atualmente, há uma grande tendência para a produção em série de furos de injeção com diâmetros cada vez menores e com tolerâncias mais estreitas, de modo que os bicos injetores atendam às exigências internacionais de controle de emissão de poluentes e, ainda, favoreçam que o motor trabalhe com um baixo consumo de combustível e elevado rendimento.

O objetivo deste trabalho é a otimização do processo de furação por eletroerosão por faíscas de furos de injeção de diâmetros menores do que 0,13 mm para bicos injetores utilizando eletrodo de tungstênio de 0,085 mm de diâmetro. Neste trabalho é verificada a influência da variação de parâmetros de entrada na eletroerosão por faíscas (distância entre eletrodo e peça, velocidade de posicionamento do eletrodo, vazão do dielétrico, números de furos do bico injetor e ângulo de inclinação da peça a ser erodida em relação ao eletrodo) sobre as principais características do furo de injeção, tais como: diâmetro do furo, conicidade do furo, tempo de usinagem/furo e fluxo hidráulico do bico injetor. Através dos experimentos será definido, de forma sistemática, quais os parâmetros e suas respectivas faixas de trabalho que otimizam estas características em estudo.

Abstract

An important electric spark machining by penetration application is the machining of small diameter injection holes in injection nozzles for motors which use diesel injection systems. Now, there is a great tendency for the production in series of smaller injection holes and with more narrow tolerances, making the injection nozzles assist to the international demands of pollution emission control, and still, the injection nozzles should make the motor work with a low fuel consumption and high efficiency.

The goal of this work is the optimization of electric spark machining of injection hole diameters smaller than 0,13 mm for injection nozzles using electrode of tungsten (0,085 mm diameter). In this work the influence of the variation of entrance parameters is verified in the erosion by sparks (distance between electrode and part, speed of positioning of the electrode, flow rate of the dielectric, numbers of holes on the injection nozzle and inclination angle of the piece to be eroded in relation to the electrode) on the main characteristics of the injection hole, such as: diameter, cone-shaped of the hole, time of machining/hole and hydraulic flow of the injection nozzle) It will be defined through the experiments, in a systematic way, which parameters and their respective work ranges optimize these characteristics in study.

Zusammenfassung

Als eine wichtige Anwendung des funkenerosiven Senkens gilt Spritzlochfertigung von Einspritzdüsen, die in Dieseleinspritzsystemen zum Einsatz kommen. Gegenwärtig geht die Tendenz bei der Serienbearbeitung der Spritzlöcher hin zu kleineren Durchmessern mit der Forderung die Formgenauigkeit der Bohrungen in zunehmend engeren Toleranzen einzuhalten. Damit soll den zukünftigen internationalen Anforderungen an die Schadstoffemissionen Rechnung getragen werden, wobei die Motoren immer weniger Kraftstoff bei gleicher Leistung verbrauchen.

Ziel dieser Arbeit ist die Optimierung der funkenerosiven Einarbeitung der Spritzlöcher mit Durchmessern kleiner als 0,13 mm, wobei Wolframelektroden mit Durchmessern von 0,085 mm benutzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss der Parameteränderungen (Abstand zwischen Elektrode und Werkstück, Zustellgeschwindigkeit der Elektrode, Durchfluss des Dielektrikums, Anzahl der Spritzlöcher und Winkel zwischen Elektrode und Werkstückoberfläche) auf das Bearbeitungsergebnis (Konizität, Erodierzeit und hydraulischer Durchfluss) untersucht. Mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung wird nachgewiesen, welche Parametereinstellungen das Bearbeitungsergebnis optimieren.

1- Introdução

O grande desenvolvimento tecnológico está gerando produtos continuamente melhores, aumentando com isto as exigências feitas a um componente de um determinado produto em relação à qualidade e custos. Assim, torna-se necessária a busca de novas ferramentas e processos que satisfaçam estas exigências.

Na área de processos de fabricação, a eletroerosão por faíscas (EDM), definida como um processo não convencional de usinagem, se manteve desde algum tempo como um processo inovativo e restrito para a fabricação de peças condutoras de eletricidade com geometrias complexas e/ou com elevada dureza.

Com o desenvolvimento dos semicondutores a partir dos anos 60 e 70, o processo de eletroerosão teve um rápido desenvolvimento. Este fato possibilitou com que os pulsos de erosão (descargas elétricas que provocam a remoção de material) fossem aplicados com elevadas potências e frequências de descargas, favorecendo a remoção de material. Neste período, utilizou-se quase exclusivamente o gerador de pulso "estático" para gerar os pulsos de erosão.

Uma importante aplicação do processo de eletroerosão por faíscas é a usinagem de furos de injeção em bicos injetores para motores com sistemas de injeção a diesel. Atualmente, o processo é dominado tecnicamente para a fabricação em grande série de bicos injetores que utilizam furos de injeção na faixa de diâmetros de 0,15 mm até 0,2 mm. Nesta dissertação de mestrado é apresentada uma metodologia de trabalho para a otimização da usinagem de furos de injeção por eletroerosão por faíscas com diâmetros menores do que 0,15 mm, onde as exigências de qualidade de canto, rugosidade e precisão do diâmetro do furo, são importantes, e quando a relação comprimento/diâmetro do furo é grande.

Uma gama de ensaios é necessária para determinar os parâmetros de usinagem mais importantes do processo em estudo. A estratégia experimental em conjunto com o conhecimento teórico e prático do processo devem ser conduzidos de modo a reduzir o número de experimentos e verificar quais os parâmetros do processo e suas respectivas faixas de trabalho que são realmente importantes [1, 2, 3].

2- Objetivos

O objetivo desta dissertação de mestrado é a otimização do processo de furação por eletroerosão por faíscas de furos de injeção de diâmetros menores do que 0,13 mm para bicos injetores. Neste trabalho será verificado a influência da variação de parâmetros de entrada na eletroerosão por faíscas (distância entre eletrodo e peça, velocidade de posicionamento do eletrodo, vazão do dielétrico, número de furos do bico injetor e ângulo de inclinação da peça a ser usinada em relação ao eletrodo), onde serão avaliadas as principais características do furo de injeção (**figura 1.1**):

- **Diâmetro d_i do furo de injeção** - é o diâmetro do lado interno do corpo do bico injetor;
- **Diâmetro d_e do furo de injeção** - é o diâmetro do lado externo do corpo do bico injetor;
- **Fluxo hidráulico Q** - é uma medida do volume de óleo que passa através dos furos de injeção na unidade de tempo;
- **Conicidade k** - é a diferença entre o diâmetro d_i e o diâmetro d_e do furo de injeção;
- **Tempo de usinagem/furo t_u** .

Com os experimentos a serem realizados, objetiva-se identificar os valores dos parâmetros de usinagem em estudo que otimizam o processo de furação por eletroerosão por faíscas de furos de injeção, de modo a garantir que a usinagem em grande série de furos de injeção seja realizada com qualidade e baixo custo.

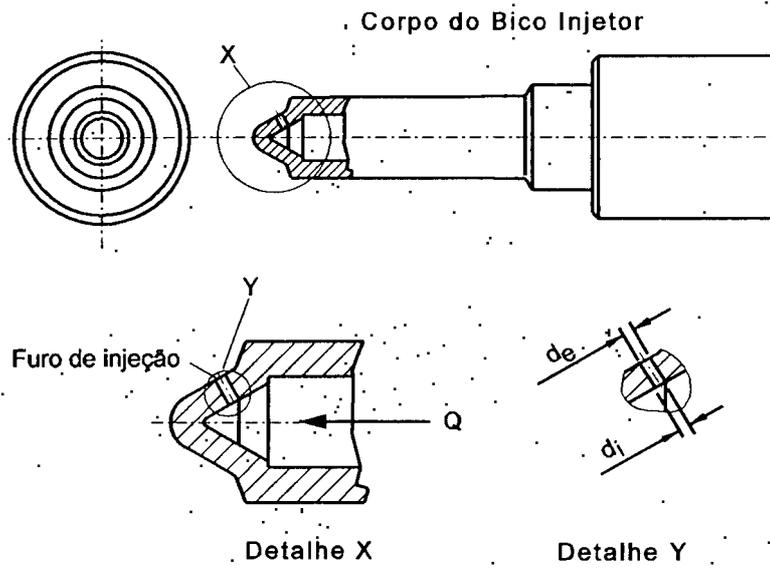


Figura 1.1 - Esquema de um furo de injeção de um bico injetor.

3- Estado da arte

3.1- Definição do processo de eletroerosão por faíscas

A eletroerosão por faíscas (EDM) compreende a remoção de material em um meio de trabalho (dielétrico) através de processos de descargas elétricas entre o eletrodo e a peça com o objetivo de usinagem. A erosão por faíscas é caracterizada por descargas elétricas, não-estacionárias, aplicadas em pequeníssimos intervalos de tempo e em locais diferentes [4, 14, 15].

3.2- Princípio de remoção de material por eletroerosão por faíscas

O processo de eletroerosão por faíscas é um processo de conformação, em que o eletrodo produz a sua imagem na peça. Este processo ocorre através de descargas elétricas para a remoção de material em materiais condutores elétricos. O processo de remoção acontece geralmente em um dielétrico líquido. Peça e eletrodo são conduzidos pelo sistema de posicionamento da máquina-ferramenta até a posição de trabalho, de modo que permaneça entre eles uma fenda de trabalho s , conforme mostra a **figura 2.1** [4, 11, 14, 15].

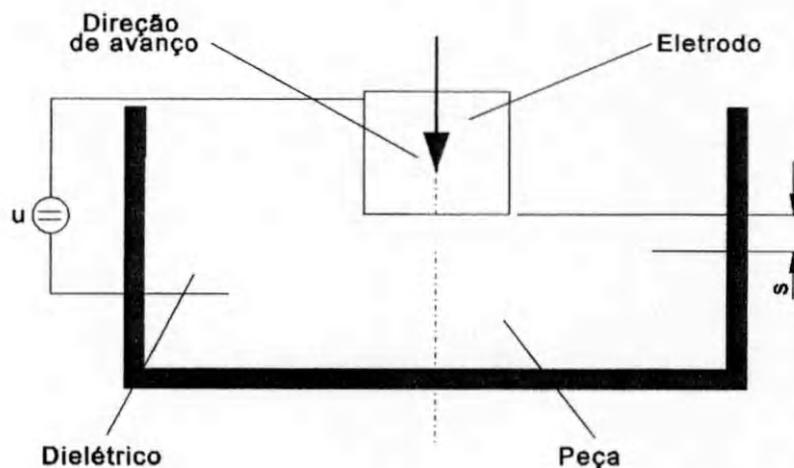


Figura 2.1 - Fenda de trabalho s entre eletrodo e peça

Peça e eletrodo são conectados a uma fonte de energia (gerador), onde é aplicada entre eles uma tensão u (**figura 2.1**). A diferença de potencial estabelecida pelo gerador provoca para pequenas distâncias entre eletrodo e peça, nos pontos de mais alta intensidade de campo elétrico (picos de rugosidades mais elevados da superfície do eletrodo e da peça), a "ruptura" do dielétrico, promovendo a descarga elétrica [4, 11, 13]. Assim, forma-se através de um processo de ionização um "canal de descarga" na forma de um cilindro condutor elétrico, cujo diâmetro aumenta com o tempo da descarga elétrica [4, 11]. Após a "ruptura" do dielétrico, estabelece-se uma tensão de descarga entre os eletrodos de 15 a 30 V aproximadamente (valor que depende da combinação do par eletrodo/peça), e correntes entre alguns décimos de ampères a mais de uma centena de ampères, na microerosão por faíscas e na eletroerosão por desbaste, respectivamente [4, 11], que levam à elevadas densidades de energias elétricas na superfície do eletrodo e da peça (10^6 a 10^7 A/cm²). O tempo de descarga é limitado e termina após a interrupção da energia fornecida pelo gerador. Como consequência da elevada densidade de energia local, uma determinada quantidade de material da peça e do eletrodo é aquecida, fundida e evaporada. Ao mesmo tempo, o efeito de forças de origem elétricas, magnéticas e térmicas removem o material fundido do ponto de descarga [4, 6, 7, 11, 13, 18, 19, 20].

O tamanho da cratera resultante na superfície da peça e do eletrodo, após uma descarga elétrica, está relacionado à quantidade e a variação temporal da energia elétrica na superfícies dos eletrodos e também é influenciada pelas propriedades físicas do material da peça e do eletrodo [6, 11]. A superfície usinada por eletroerosão por faíscas apresenta um aspecto "opaco", diferente dos processos convencionais de usinagem por corte [4, 11].

3.3- Grandezas do processo que influenciam o resultado do trabalho

Na **figura 3.1** são mostrados esquematicamente os diferentes fatores que influenciam o resultado de trabalho no processo de eletroerosão por faíscas [10, 11].

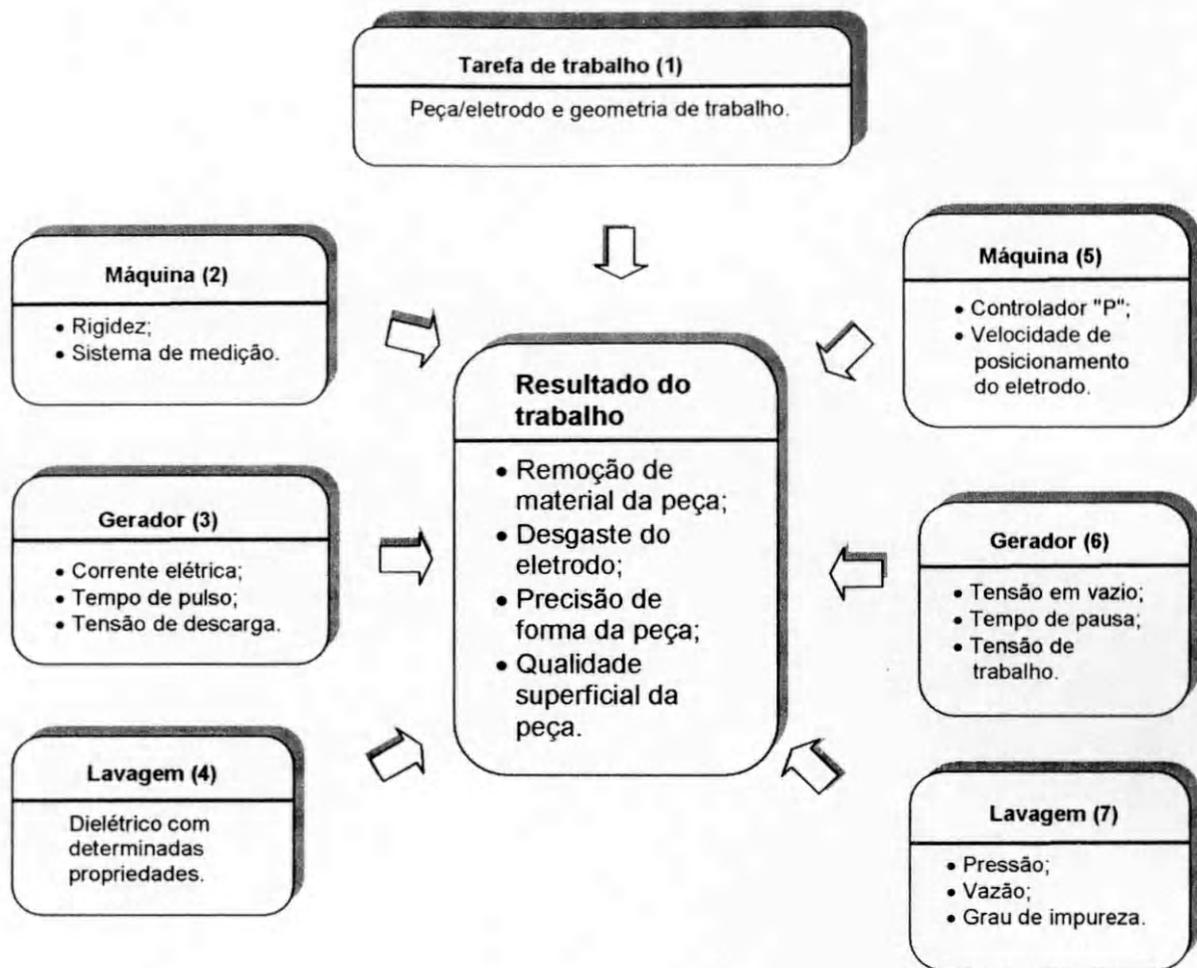


Figura 3.1 - Grandezas do processo de eletroerosão por faíscas [10, 11]

Segundo Kurr [11], cada fator que influencia o resultado de trabalho (**figura 3.1**) pode ser ordenado da seguinte forma:

- para uma determinada tarefa de usinagem e para uma determinada máquina de eletroerosão por faíscas, são antecipadamente definidos os seguintes parâmetros: tarefa de trabalho (grupo 1), máquina (grupo 2) e lavagem (grupo 4). A influência exercida sobre o resultado de trabalho pela geometria da peça a ser usinada, pela combinação do par peça/eletrodo e pelas características da máquina de erosão e do dielétrico, são de grande importância para o processo. Estes parâmetros são fixos antes do início do trabalho de erosão e não podem ser alterados durante o processo de erosão, como também após o processo;

- os parâmetros do gerador (grupo 3) determinam a potência do pulso de erosão, desgaste do eletrodo, qualidade superficial, precisão de forma e a região termicamente afetada na peça erodida. Estes parâmetros são fixos no início da erosão para se atingir um determinado resultado de trabalho. Caso o resultado de trabalho desejado não for atingido, os parâmetros de erosão podem ser alterados após o término da erosão até que o resultado de trabalho seja satisfatório. Estes parâmetros podem também ser alterados durante a erosão (sistema de controle e supervisão do processo), mas, neste caso, o resultado de trabalho não pode ser avaliado de imediato;
- os parâmetros da máquina (grupo 5), do gerador (grupo 6) e da lavagem (grupo 7) abrangem as características mais importantes da máquina, do gerador e do dielétrico, os quais são de grande importância para a estabilidade do processo. Uma regulagem adequada destes parâmetros (regulagem do sistema de controle e supervisão do processo) possibilita conduzir a erosão a uma condição ótima de trabalho, com isto aumenta-se a remoção de material na peça e conseqüentemente um aumento da produtividade.

3.3.1- Parâmetros de regulagem e parâmetros de trabalho

Os mais importantes parâmetros de regulagem e de trabalho, os quais descrevem o processo de descarga elétrica, são as grandezas elétricas. A **figura 3.2** mostra a descrição das grandezas elétricas de um gerador de pulso estático de modo a facilitar a visualização das grandezas [4, 11].

As grandezas elétricas, as quais podem ser ajustadas independentemente umas das outras, mostradas na **figura 3.2**, são a tensão em vazio \hat{u}_i , o tempo de pulso t_i e o tempo de pausa t_0 . A relação entre estas grandezas e o tempo de período t_p resulta a relação de contato τ , a qual é representada da seguinte forma [4, 11, 14, 15]:

$$\tau = \frac{t_i}{t_p} \quad (I)$$

A variação temporal da tensão e corrente elétrica no "canal de descarga" caracterizam o correspondente "estado" na fenda de trabalho s. Em condições ótimas da fenda de trabalho, a cada pulso de tensão corresponde uma descarga elétrica, cuja forma do pulso é representada na **figura 3.2-a**.

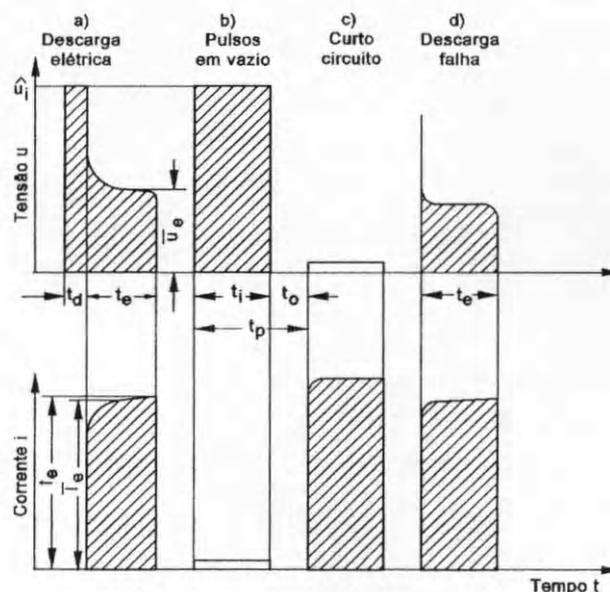


Figura 3.2 - Características elétricas do gerador de pulso estático [4,11]

A descarga elétrica pode ser caracterizada pela tensão de descarga u_e , um tempo de descarga t_e , um tempo de retardo de ignição t_d e uma corrente de descarga i_e . Um aumento do tempo de retardo de ignição t_d conduz a uma diminuição do tempo de descarga t_e e, com isto, uma variação do grau da rendimento da descarga. Descargas elétricas com tempos de retardo de ignição nulos são decorrentes de contatos pontuais entre eletrodos e cadeias de partículas removidas, estabelecendo um contato galvânico inicial e descarga com refusão das partículas envolvidas (**figura 3.2-d**) [4, 11].

Para situações de contato entre eletrodo e peça ocorrem curto-circuitos, os quais não contribuem para a remoção de material na peça e levam a danificações no

eletrodo. Com o aumento da fenda de trabalho s , aumenta o tempo de retardo de ignição. No limite, não é formada mais uma descarga e, define-se, desta forma o pulso em vazio \hat{u}_i (**figura 3.2-b**) [4, 11].

A distância entre eletrodo e peça também é dependente da tensão u ajustada no gerador. Na fenda de trabalho resulta uma tensão de trabalho U que pode ser expressa pela equação 2 [11]:

$$U = \sum_1^{f_p} \int_0^{t_o} u_o . dt + \sum_1^{f_c} \left(\int_{t_o}^{t_d} u_i . dt + \int_{t_o + t_d}^{t_p} u_e . dt \right) + \sum_1^{f_i} \int_{t_o}^{t_p} u_i . dt + \sum_1^{f_s} \int_{t_o}^{t_p} u_s . dt \quad (2)$$

Pausa
Arco voltaico e
descarga normal
Tensão
em vazio
Curto
circuito

A frequência de descarga f_e , a frequência dos pulsos em vazio f_i e a frequência de curto-circuito f_s dão, respectivamente, o número por unidade de tempo de descargas, dos pulsos em vazio e do número de curto-circuitos. A energia de descarga W_e é determinada pela equação 3 [4, 11, 14, 15]:

$$W_e = \int_{t_d}^{t_p} u_e(t) . i_e(t) . dt \quad (3)$$

A potência de descarga P_e é expressa pela equação 4 [4, 11, 14, 15] ;

$$P_e(t) = u_e(t) . i_e(t) \quad (4)$$

Uma medida para se verificar o rendimento de uma descarga elétrica é a relação de descargas φ , que é determinada pela equação 5 [4, 11, 14, 15]:

$$\varphi = \frac{t_e}{t_i} \quad (5)$$

Outra possibilidade para avaliar o andamento do processo é a relação de frequências λ , expressa pela equação 6 [4, 11, 14, 15]:

$$\lambda = \frac{f_e}{f_p} \quad (6)$$

O grau de eficiência η é uma medida do grau da utilização temporal dos pulsos entregues pelo gerador e é determinado pela equação 7 [11, 14, 15]:

$$\eta = \frac{\sum_{x=1}^n t_{ex}}{\sum_{x=1}^n t_{ix}} \quad (7)$$

Outras grandezas elétricas são a condutividade elétrica χ e a tensão de "ruptura" U_D do dielétrico, as quais dependem por um lado das propriedades do dielétrico e, por outro, são influenciadas através do processo de erosão [11].

As grandezas mecânicas mais importantes são a vazão do dielétrico q e a velocidade de avanço do sistema de posicionamento do eletrodo V_R . Os parâmetros de trabalho resultantes durante a usinagem são a pressão do dielétrico p , a regulação de posicionamento (controlador "P") do eletrodo e as características geométricas, como por exemplo, a superfície a ser usinada e a profundidade de penetração do eletrodo [4, 11].

3.3.2- Critério para avaliação do resultado de trabalho

O resultado de trabalho é avaliado conforme a relação entre o desgaste do eletrodo e a remoção de material na peça, propriedades da superfície erodida e

precisão de forma e funcionalidade da peça. Isto depende, em primeira linha, da tarefa de trabalho a ser executada e dos parâmetros de ajuste [4, 10, 11].

Na erosão com várias descargas elétricas resulta uma taxa de remoção V_W e uma taxa de desgaste V_E na unidade de tempo na peça e no eletrodo respectivamente.

Outra grandeza de importância é o desgaste relativo ϑ , que é definido como sendo a relação entre o desgaste do eletrodo e a remoção de material na peça [4, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 30]:

$$\vartheta = \frac{V_E}{V_W} \quad (10)$$

As propriedades da superfície eletroerodida abrangem além da rugosidade, mudanças estruturais do material erodido [4, 21, 33]. A condição da superfície eletroerodida é descrita da seguinte forma [11, 21, 33]:

- **Qualidade superficial** – aqui, a análise engloba a microtopografia da superfície, pela verificação dos parâmetros verticais de rugosidade, como por exemplo, R_a , R_{max} , e R_t ;
- **Mudanças estruturais na zona afetada** – por se tratar de uma remoção térmica, pode-se observar uma mudança de textura, mudança na composição química, através da difusão de impurezas contidas no dielétrico para a superfície erodida da peça, deformação plástica, além de macro e microfissuras na superfície;
- **Propriedades mecânicas** – a resolidificação de uma parcela de material fundido pela descarga leva a tensões residuais de tração na camada superficial. No limite, teremos a formação de micro e microfissuras na superfície do componente, levando a uma diminuição de sua resistência a solicitações mecânicas alternantes.

A funcionalidade da peça eletroerodida é caracterizada através da resistência à fadiga, capacidade de carga e resistência a corrosão [11, 21, 33].

A precisão de forma da peça usinada pode ser descrita através do desgaste de canto, do espaço frontal s_F , do espaço lateral s_L , além da conicidade e do ângulo de inclinação na região do espaço frontal [9, 11].

3.4- Princípio físico da descarga elétrica em um meio líquido

O processo físico durante a descarga elétrica em um meio líquido pode ser dividido em 3 fases principais, através da combinação dos efeitos "Pinch" e "Skin". Estas três fases estão representadas na **figura 3.3**, onde é mostrado a variação da corrente elétrica e tensão com o tempo [4, 5, 6, 13].

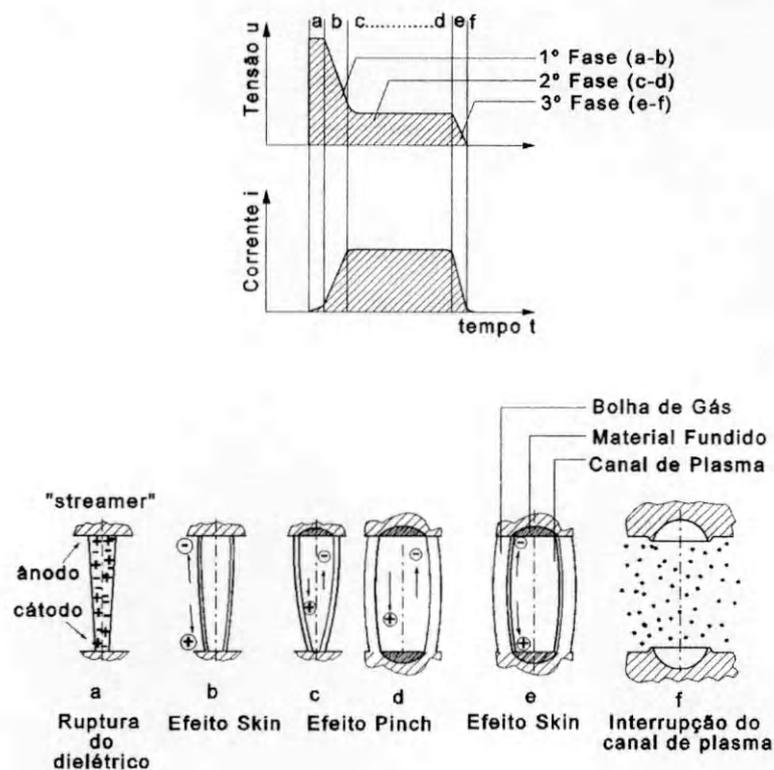


Figura 3.3 - Representação esquemática das fases de descarga [4]

Durante a primeira fase, a qual conduz a formação do "canal de descarga" (também denominado canal de plasma), predomina uma grande variação da corrente e tensão com o tempo. Esta característica de corrente elétrica causa, após

a "ruptura" do dielétrico, por motivo do efeito "Skin", um fluxo de corrente na superfície do "canal de descarga" (**figura 3.3-b**) [4, 5, 6, 13].

Na segunda fase de descarga, a corrente elétrica permanece aproximadamente constante com o tempo e se concentra em uma secção transversal mínima ao fluxo de corrente (efeito "Pinch") (**figuras 3.3-c e 3.3-d**). O trabalho de absorção de elétrons na superfície anódica e o trabalho de emissão de elétrons da superfície catódica levam a um aumento localizado da temperatura, que durante o curto intervalo de duração da descarga, em combinação com efeitos de transmissão de calor para os eletrodos e para o dielétrico, levam a evaporação e fusão de material da peça. Durante a descarga, o diâmetro do "canal de descarga" e, com ele, as regiões atingidas no cátodo e no ânodo, apresentam um aumento contínuo, reduzindo a densidade de energia na superfície anódica e catódica. A partir do momento em que a quantidade de energia fornecida pela descarga por unidade de área nas superfícies dos eletrodos for menor que a energia dissipada, a poça liquefeita inicia sua solidificação [4, 5, 6, 13, 45].

Durante a terceira fase, durante a interrupção do fornecimento da energia elétrica e, devido aos elevados gradientes de tensão e corrente, predomina novamente o efeito "Skin" no "canal de descarga" (condução da corrente pela superfície do "canal de descarga") (**figura 3.3-e**), finalizando com o colapso do mesmo. A implosão concêntrica do canal de plasma conduz a formação de uma onda de choques com expansão radial sobre a (s) poça (s) líquida (s) do (s) eletrodo (s), resultando na expulsão de boa parte do material líquido da (s) região (ões) de descarga [4, 5, 6, 13, 45] (**figura 3.3-d**).

Mironoff [13] descreveu o princípio físico de uma descarga elétrica em um meio líquido, citado anteriormente, sob o contexto microscópico da descarga elétrica. O início do processo de descarga elétrica ocorre nos pontos mais salientes da superfície do eletrodo e da peça, onde ocorre uma intensificação do campo elétrico, o que provoca uma polarização e orientação das moléculas, dos íons e das partículas em suspensão no dielétrico (**figura 3.4-a**). Em uma segunda etapa, o dielétrico atinge um determinado grau de ionização em consequência do denominado fluxo de íons ("streamer") (**figura 3.4-b**).

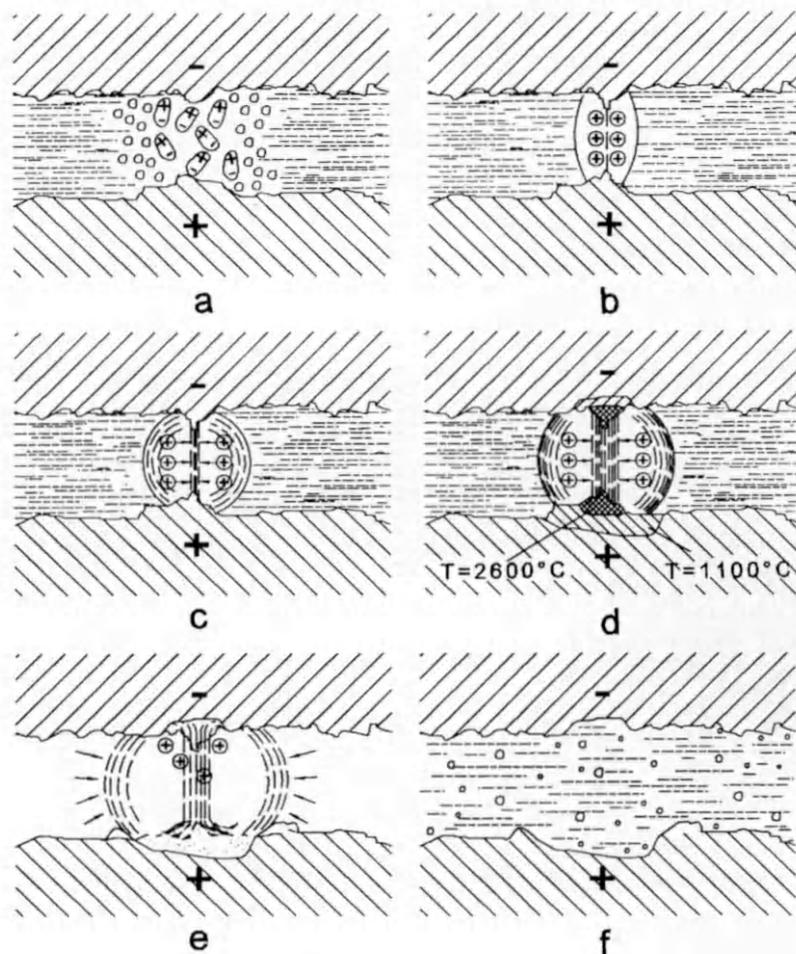


Figura 3.4 - Representação microscópica das fases de descarga segundo Mironoff [13]

Este fluxo de íons favorece a passagem da corrente elétrica e, neste caso, a intensidade de corrente elétrica pode atingir valores de até 1000 A (**figura 3.4-c**). O fluxo em massa de corrente (**figura 3.4-d**) provoca ainda um maior efeito de ionização do "canal de descarga" e um efeito magnético que comprime o fluxo de corrente elétrica em torno do seu eixo, com isto, a densidade de energia aumenta (efeito "Pinch"). Forma-se uma bolha de gases que aumenta de tamanho e exerce uma pressão "positiva" sobre o líquido que está ao seu redor. Através do aumento da densidade de energia resulta em um aumento da quantidade de calor que provoca a fusão e a evaporação do material do eletrodo e da peça. Por causa do choque dos íons positivos contra a superfície catódica (eletrodo), a qual também é influenciada pelo efeito térmico da descarga (**figura 3.4-e**), é removido um

determinado volume de material, o que provoca o desgaste da superfície catódica. No final da descarga, por causa da interrupção do fornecimento da energia elétrica, a pressão na bolha de gases assume um valor "negativo", ocasionando a implosão do canal de plasma. Pode-se observar um fenômeno semelhante a uma cavitação que favorece a remoção do material fundido e evaporado do "canal de descarga". O material removido do "canal de descarga" apresenta-se na forma de pequenas esferas (figura 3.4-f).

3.5- Histórico sobre a natureza física da remoção por eletroerosão

A teoria **eletro-mecânica**, citada por Mironoff [13], se baseia em dados apresentados por Williams e consiste no princípio de arrancamento de partículas de material devido a um forte campo elétrico concentrado e exclui os efeitos térmicos.

De acordo com esta teoria, por consequência da elevada densidade de campo elétrico e, com a aproximação entre peça e eletrodo, aplicando-se uma tensão entre eles, são geradas forças de campo elétrico entre os pontos mais salientes da superfície da peça e do eletrodo, que ultrapassam as forças interatômicas do material, provocando o seu arrancamento.

A teoria **termo-mecânica** foi citada por Kurr [14] e é embasada em dados experimentais de Hinnüber e Obacio. Estes constataram que devido aos elevados gradientes de temperaturas nos pontos de descarga, formam-se no material elevadas tensões residuais, que podem fazer saltar um simples cristal do material, como também um conjunto inteiro de cristais. Obacio também percebeu um mecanismo que ocorre em materiais frágeis, os quais são aquecidos através do efeito "Joule", onde as diferentes condutividades térmicas da matriz e dos elementos desta matriz levam a formação de concentrações de calor locais. A dilatação térmica e o rápido resfriamento após o pulso de erosão têm como consequência a formação de fissuras intercristalinas no material. Por um lado, o material pode ser removido mecanicamente e, por outro, as fissuras resultantes contribuem para um melhor isolamento térmico de uma respectiva quantidade de material, possibilitando com que esta possa ser localmente fundida mais facilmente [10].

A teoria **eletro-térmica**, também citada por Mironoff [13], se baseia em observações experimentais de Mandelstamm e Raisky. Estes observaram as denominadas "faixas de fogo" que saíam da superfície do material do eletrodo ou da peça no "canal de descarga". Conforme a opinião desses pesquisadores, trata-se aqui de partículas de material, como também de vapor de material que possuem elevada energia cinética, os quais removem material da superfície do eletrodo e da peça [10, 18, 19, 20].

3.6- Princípio básico construtivo de uma máquina de eletroerosão por faíscas

De um modo geral, uma máquina de eletroerosão por faíscas é dividida em três partes principais, conforme mostra o esquema da **figura 3.5**:

- Gerador;
- Máquina;
- Agregado para o dielétrico.

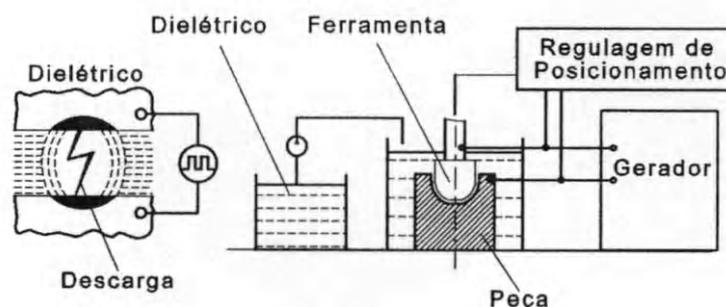


Figura 3.5 - Esquema básico de uma máquina de eletroerosão por faíscas [4]

3.7- Geradores

3.7.1- Geradores de relaxação

Estes geradores podem ser divididos em um circuito de carga e descarga com uma fonte de corrente contínua e componentes eletrônicos, tais como: resistências,

capacitores, indutores ou combinações destes elementos (RC, RLC, LC). Em circuitos de descarga elétricas não-controladas, a fenda de trabalho exerce a função de uma "chave", isto é, só ocorre uma descarga elétrica quando a tensão de "ruptura" do dielétrico é ultrapassada. Desta forma, a energia acumulada no capacitor é consumida e o pulso de descarga é oscilante, conforme mostra **figura 3.6** [4, 8, 9, 10].

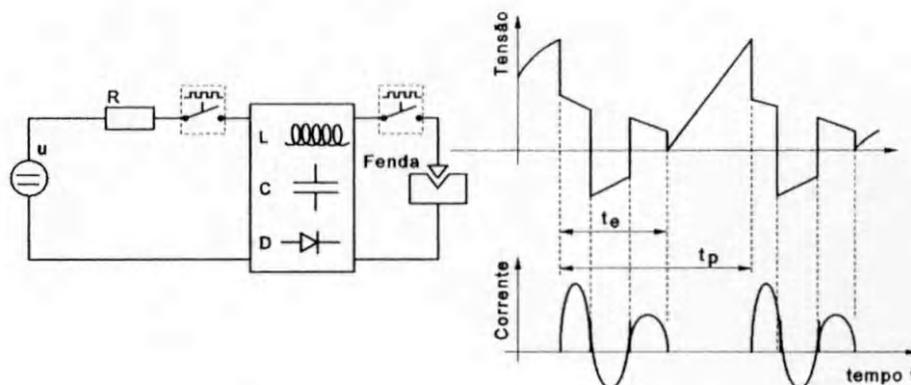


Figura 3.6 - Forma do pulso de descarga de um gerador de relaxação [4]

Disto pode-se concluir que as condições elétricas e geométricas na fenda de trabalho exercem uma função de "chave" não adequada sobre o processo. Estas condições influenciam a frequência de descarga elétrica, como também a energia do pulso. Através da ligação de determinados componentes no circuito de descarga pode-se conseguir uma melhoria no processo. Para trabalhos de precisão com baixa potência, baixa relação de contato (vide **equação 1**) e pequena superfície a ser usinada, os geradores de relaxação ainda são muito utilizados [4, 8, 9, 10].

3.7.2- Geradores de pulso estático

O desenvolvimento destes geradores só foi possível com o desenvolvimento dos transistores de potência. O princípio básico de construção destes geradores e o decurso da tensão e corrente com o tempo são mostrados na **figura 3.7**. Geradores deste tipo possuem uma ampla faixa de regulação para os mais variados tipos de

trabalho. Assim, podem ser regulados o tempo de pulso t_i entre 1 a 2000 μs e a relação de contato τ (vide **equação 1**) entre 0,1 a 0,9 [4, 8, 9, 10].

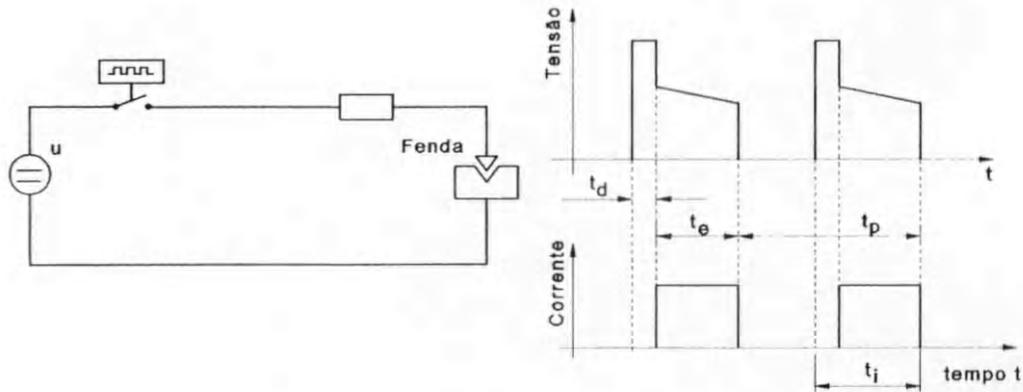


Figura 3.7 - Forma do pulso de descarga de um gerador de pulso estático [4]

3.8- Máquinas de eletroerosão por faíscas

O desenvolvimento das máquinas para usinagem por eletroerosão por faíscas é uma consequência do constante desenvolvimento dos setores de construção de máquinas e equipamentos, sendo que as primeiras aplicações das máquinas de eletroerosão por faíscas foram para a produção de ferramentas em pequenas quantidades.

Exigi-se destas máquinas uma ampla capacidade de realizar determinadas tarefas de usinagem, tanto para microusinagem, como para trabalhos de grande porte. Em paralelo existe uma tendência cada vez maior em utilizar as máquinas de eletroerosão por faíscas nas linhas de produção para fabricação de grandes lotes de peças. [10, 17, 28, 29, 31].

As características das máquinas de eletroerosão por faíscas exercem uma grande influência sobre a qualidade da peça produzida, já que são máquinas de elevada precisão. Por este motivo, são exigidas destas máquinas características extremas, tais como: estabilidade térmica, rigidez, precisão de forma e de posicionamento dos eixos. Existe ainda um constante desenvolvimento das máquinas de eletroerosão por faíscas para melhoria dos sistemas de avanço do eletrodo e posicionamento da peça [10, 17, 28, 29, 31].

No sistema de posicionamento do eletrodo nas máquinas de eletroerosão por faíscas por penetração (direção $\pm Z$ e giro em $\pm C$) emprega-se o comando hidráulico ou servo motor hidráulico. A mesa sobre a qual é fixada a peça a ser usinada tem normalmente movimento nas direções $\pm X$ e $\pm Y$. As características básicas para estes sistemas são normalizados segundo VDI e SN [43] (**figura 3.8**)

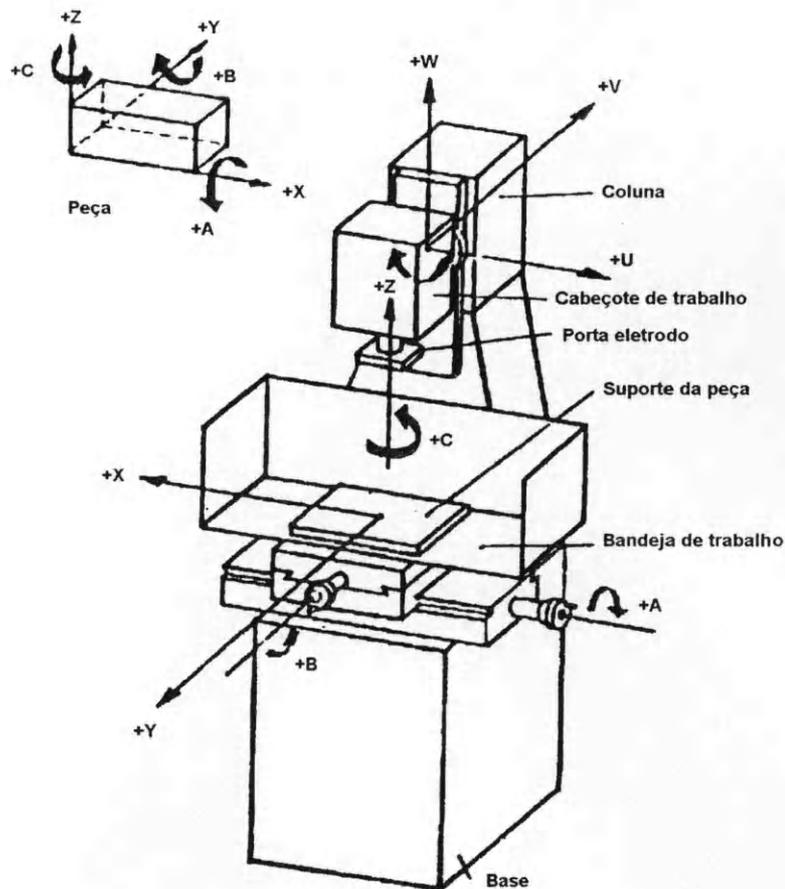


Figura 3.8 - Estrutura de uma máquina de eletroerosão por faíscas [43]

Para aumentar a precisão de posicionamento empregam-se guias lineares com esferas recirculantes e fusos de esferas recirculantes, tanto da mesa XY, como do cabeçote porta eletrodo. Alguns modelos são construídos com a mesa fixa e movimentação do portal [43].

Estas máquinas são denominadas de "gantry" e normalmente são de grande porte. Outros modelos têm a mesa de granito, aumentando de grande forma a precisão da máquina [43].

3.8.1- Máquina de eletroerosão por faíscas para microfuração em bicos injetores

A máquina de eletroerosão por faíscas para fabricação de bicos injetores consiste de uma máquina-ferramenta e um gerador como elemento de controle dos pulsos de erosão.

Para a usinagem de furos entre 0,08 mm até 1 mm são utilizadas descargas de baixa energia e de curto tempo de descarga, ocasionando uma remoção de material na peça e um desgaste no eletrodo. Para compensar este desgaste a máquina deve ser equipada com um sistema automático de compensação do desgaste do eletrodo. O gerador é construído basicamente com um circuito RC (podendo ter outras variações) e atinge descargas na faixa de 4 até 400 μJ [31]. Um sistema de controle completamente transistorizado controla as diferentes operações do sistema. Primeiramente, ocorre o posicionamento da peça, seguido do avanço do eletrodo após o gerador ter sido ligado. O sistema de fixação do eletrodo conduz o mesmo em direção à peça a ser usinada até que a distância eletrodo/peça favoreça a "ruptura" do dielétrico (primeira descarga elétrica), e desta forma inicie o processo de erosão até o término do processo de furação [31].

A precisão de furação atingida com estas máquinas depende teoricamente da precisão do eletrodo. Tolerâncias de 2 a 5 % do diâmetro do eletrodo são normais, conforme a aplicação, são atingidas tolerâncias de $\pm 0,003$ mm [31].

O sistema de posicionamento da peça e do eletrodo nas máquinas de eletroerosão para bicos injetores é dotado de movimentos nas direções $\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$ para o posicionamento da peça, e movimentos nas direções $\pm W$, $\pm V$ e $\pm U$ para o posicionamento do eletrodo, sendo que nas direções $\pm X$ e $\pm Z$ são movimentos rotacionais e nas demais direções são movimentos lineares (**figura 3.9**).



Figura 3.9 - Eixos principais do cabeçote de uma máquina de eletroerosão por faíscas para bicos injetores (Máquina AGIE/CHARMILLES)

3.8.2- Sistema de posicionamento do eletrodo

O sistema de avanço do eletrodo é equipado com um controlador "P" que tem a tarefa de ajustar a condição ótima da fenda de trabalho através do controle do posicionamento do eletrodo (com uma velocidade que pode ser ajustada) de acordo com a tensão nominal u ajustada no gerador, e reagir a qualquer influência indesejável na fenda de trabalho. A velocidade de posicionamento do eletrodo é de importância decisiva para a estabilidade do processo [6, 16]. Ao apresentar um desvio entre a tensão nominal ajustada no gerador e o valor da tensão real na fenda de trabalho, por motivo de tensões em vazio u_i , curto-circuitos e arcos voltaicos, o controlador "P" reposiciona o eletrodo para minimizar completamente o desvio ou, pelo menos reduzir este desvio. Quando a fenda de trabalho é muito grande, nenhuma descarga elétrica acontece (tensão em vazio), o controlador "P", neste caso, deve reposicionar o eletrodo de modo diminuir a fenda de trabalho. Ao contrário, quando a fenda de trabalho está muito pequena, ocorre a formação de

descargas falhas e curto-circuitos, e o controlador "P", neste caso, tem a tarefa de aumentar a fenda de trabalho [4, 6, 10, 16].

3.9- Dielétrico

3.9.1- Formas de aplicação do dielétrico

De acordo com o trabalho a ser executado, o dielétrico é conduzido à fenda de trabalho por diferentes modos: por um jato, succionado por orifícios adequadamente posicionados, ou pelas duas formas citadas anteriormente. A **figura 3.10** mostra as possibilidades de conduzir o dielétrico à fenda de trabalho. O jato lateral (**figura 3.10-a**) só é utilizado com eficiência em trabalhos poucos profundos. A grande parte dos trabalhos exigem uma lavação sob pressão ou succionada, ou uma combinação das duas condições. Como a forma de aplicação do dielétrico influi consideravelmente na forma do desgaste do eletrodo e na remoção de material da peça, bem como na estabilidade do processo, a vazão e a pressão do dielétrico devem ser rigorosamente controlados e adequados à tarefa de trabalho a ser executada [4].

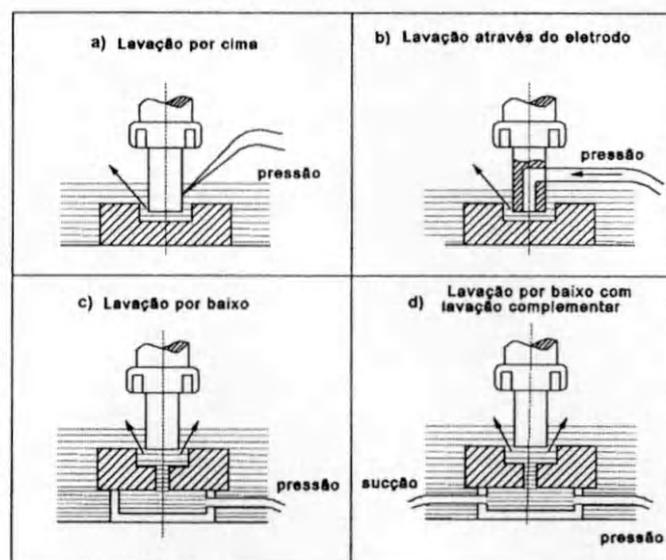


Figura 3.10 - Formas de aplicação do dielétrico na fenda de trabalho [4]

3.9.2- Funções principais do dielétrico no processo de eletroerosão por faíscas

O dielétrico deve isolar o eletrodo e peça, e com isto fazer com que a descarga ocorra em uma menor distância possível entre eletrodo e peça. Desta forma é aumentado o aproveitamento da energia de descarga, melhorando a precisão de forma do eletrodo na peça [4, 6, 7, 27].

O dielétrico deve comprimir o "canal de descarga" e, assim, permitir que se atinja uma alta densidade de energia, e diminuir ainda o calor dissipado através do transporte de calor na peça e no eletrodo, de modo que o grau de eficiência da descarga seja aumentado. O dielétrico deve ser facilmente ionizável, favorecendo a formação do "canal de descarga" e, ao mesmo tempo, após a interrupção do fornecimento de energia elétrica pelo gerador, possuir uma rápida deionização, para que seja atingida uma elevada relação de contato (vide **equação 1**) e elevada taxa de remoção com baixo desgaste do eletrodo. Além disso, o dielétrico deve garantir um resfriamento da peça e do eletrodo, evitando um sobrecarregamento térmico. O dielétrico deve também garantir o transporte de partículas de remoção resultante da descarga elétrica para fora da fenda de trabalho [4, 6, 7, 27].

As funções principais do meio dielétrico estão descritas abaixo de maneira mais detalhada [4, 6, 7, 27]:

- **Função dielétrica** - a distância entre peça e eletrodo, definida pela tensão aplicada entre eles, em que ocorre a descarga elétrica, depende da resistência à "ruptura" do dielétrico U_D . Para iniciar uma descarga elétrica, um simples posicionamento do eletrodo e peça em uma pequena distância, e a resistência a "ruptura" do dielétrico, junto com uma tensão de nominal ajustada no gerador, não é teoricamente possível. Só é possível o início da descarga elétrica se o dielétrico apresentar bolhas de gases e impurezas que não foram completamente removidas através da filtração do dielétrico. Outro ponto importante é que a resistência a "ruptura" do dielétrico é reduzida bruscamente já com pequenas adições de umidade. A resistência ótima à "ruptura" do dielétrico é atingida propriamente pelas características do dielétrico. Existe um compromisso entre elevada resistência à "ruptura" do dielétrico (consequências: pequena distância entre eletrodo e peça,

elevada precisão de forma e diminuição de curto-circuitos) e baixa resistência à "ruptura" (consequências: grande distância entre eletrodo e peça e baixa precisão de forma);

- **Comprimir o "canal de descarga"** – durante a descarga elétrica, a expansão do "canal de descarga" deve vencer a deformação elástica e a aceleração do dielétrico em sua volta. Tanto maior o módulo de elasticidade (incompressibilidade do dielétrico líquido), e tanto maior for a densidade do dielétrico, tanto menor será o diâmetro do "canal de descarga". Com isto teremos uma densidade de energia maior nas superfícies catódica e anódica. Este aumento de densidade de energia favorece a formação de menores crateras (pouco profundas) de erosão, com pouca área superficial, com isto é reduzida a perda de energia térmica na peça, melhorando a remoção de material;
- **Ionização/deionização** - a formação do "canal de descarga" e, com isto, a formação de íons elétricos condutores, é influenciada através da condutividade do dielétrico. Por isto é vantajoso o dielétrico possuir uma condutividade elétrica na faixa de 1 até $1000 \cdot 10^{-13}$ S/m. O grau de impurezas do dielétrico influencia fortemente a condutividade elétrica. Através de uma melhoria da condutividade elétrica do dielétrico pode ser diminuído o tempo para a formação do "canal de descarga" e uma melhoria do grau de eficiência (vide **equação 7**). Após a término da descarga o dielétrico deve sofrer uma rápida deionização para garantir a formação otimizada da descarga seguinte;
- **Resfriamento** - a energia elétrica que é transformada em calor através de uma descarga elétrica deve ser removida da fenda de trabalho por meio do dielétrico. Deve-se fornecer uma quantidade suficiente de dielétrico para remover este calor. Pouca quantidade de dielétrico poderia causar um forte aquecimento do dielétrico, e com isto favorecer a sua própria evaporação e formação de gases. Neste caso existe o perigo de causar um

superaquecimento do eletrodo ou da peça, provocando danificações. Também é recomendável que se utilize o dielétrico no reservatório com temperaturas que atingem no máximo 15° C abaixo do seu ponto de fulgor;

- **Transporte de partículas** – grandes quantidades de partículas no dielétrico podem provocar perturbações que provocam curto-circuitos. A vazão do dielétrico deve garantir o transporte destas partículas para fora da fenda de trabalho.

Como dielétrico utilizam-se normalmente hidrocarbonetos, como por exemplo, benzina de teste, querosene, óleo de transformador, etc. Para trabalhos de precisão a água deionizada é utilizada. Para limpar o dielétrico dos produtos remoção e de decomposição do mesmo é utilizado um filtro ou um equipamento de centrifugação e, para as máquinas que trabalham com água como dielétrico, é necessário uma resina deionizadora para manter a sua condutividade elétrica χ constante [4, 6, 7, 27].

3.10 – Material do eletrodo e da peça no comportamento da erosão

Os materiais empregados para o eletrodo e o material a ser erodido exercem uma influência considerável sobre o comportamento da erosão [4].

A erodibilidade de um material é independente de suas propriedades mecânicas, porém, a composição química e, com isto, as propriedades físicas, têm influência considerável sobre o processo [4, 22].

Muitas pesquisas feitas sobre a erodibilidade de metais puros levaram ao conhecimento da dependência entre as características físicas de alguns elementos, por exemplo, uma diminuição da taxa de remoção V_w com o aumento da temperatura de fusão [4].

Alguns modelos demonstraram que o comportamento da erosão é determinado pelas características térmicas do material: calor específico, condutividade, temperatura de ebulição e a grandeza mecânica da densidade [4, 22, 23, 26]. Além

disso, outros pesquisadores sustentam o fato de que o comportamento da erosão é função da resistência elétrica específica, da relação entre temperatura de fusão e energia de ligação do material [4, 22, 23, 26], mas, em uma série de outras pesquisas, ainda não foi possível relacionar a erodibilidade de todos os metais puros com as suas características físicas [4].

A mesma complexidade é enfrentada para determinar a influência dos elementos de liga na erodibilidade das ligas metálicas. Devido a uma grande variedade dos elementos de ligas presentes nas ligas metálicas e, também devido as influências mútuas entre estes elementos entre si, ainda não é possível prever exatamente se este elemento apresenta uma certa tendência a aumentar ou diminuir a taxa de remoção de material [4].

Resultados de pesquisas realizadas mostraram que materiais de eletrodos distintos erodindo o mesmo material e os mesmos parâmetros do processo levam à taxas de remoção V_w diferentes e se distingue de forma marcante no comportamento de desgaste do eletrodo [4].

Em princípio pode-se empregar todos os materiais condutores de eletricidade como materiais para eletrodos. Entre os materiais mais utilizados pode-se citar o zinco, alumínio, liga cobre-zinco, cobre-eletrolítico, aço, liga cobre-tungstênio, molibdênio, tungstênio, grafite, etc [4, 22, 23, 26]. A maior frequência de utilização encontramos no grafite e no cobre-eletrolítico. Para a erosão com mínimo desgaste, principalmente, na erosão do metal duro, ligas sinterizadas de tungstênio e cobre, mostraram ser altamente eficazes. Além disso, na erosão de ligas de titânio são empregados o eletrodo de latão. A utilização de eletrodos de ligas de alumínio ou de aço estão restritas a algumas aplicações especiais, devido ao desgaste elevado dos eletrodos. O grafite é mais adequado para trabalhos de desbaste com elevadas correntes de descargas i_e , ao passo que o cobre é mais adequado para trabalhos de acabamentos com tempos e correntes de descargas pequenos [4].

Uma das grandes aplicações do processo de eletroerosão é a eletroerosão por faíscas por "penetração" para microfuração, sendo que os materiais utilizados neste tipo de aplicação devem satisfazer às seguintes exigências [6, 22, 23, 26]:

- **Elevado módulo de elasticidade e baixo coeficiente de dilatação térmica** – estas duas propriedades têm influência direta na precisão de forma do furo. O módulo de elasticidade elevado permite ao material sofrer maiores solicitações mecânicas decorrentes do processo de erosão, como também reduz as vibrações do eletrodo durante o processo erosão. O baixo coeficiente de dilatação térmica exigido destes materiais faz com que o eletrodo sofra menores dilatações decorrentes das descargas elétricas que aquecem o eletrodo. Assim, menores dilatações favorecem a precisão de forma do furo;

- **Alto ponto de fusão** – elevado ponto de fusão faz com que o material do eletrodo sofra menores desgastes, melhorando a precisão dimensional do furo;

- **Elevada condutividade elétrica e térmica** – estas propriedades também são importantes para diminuir o desgaste do eletrodo. Elevada condutividade elétrica do material permite uma diminuição do aquecimento localizado do material (um superaquecimento do material provocaria a fusão rápida do material do eletrodo e, desta forma, um rápido desgaste) do eletrodo devido ao efeito "Joule". O material do eletrodo com elevada condutividade térmica faz com que o calor originado no processo de erosão seja rapidamente transportado para o interior do eletrodo, evitando uma concentração local de calor no material, diminuindo assim o desgaste do eletrodo;

- **Elevada densidade** – o material do eletrodo com elevada densidade implica em um alto fator de empacotamento e uma elevada força de coesão entre os átomos que o compõem. Assim, o desgaste por fusão do material é diminuído. Uma elevada densidade também favorece uma rigidez contra solicitações mecânicas durante o processo de erosão.

3.10.1- Eletrodo de tungstênio

Neste ponto será dado ênfase ao tungstênio como material para o eletrodo, pois este material será utilizado nos experimentos deste trabalho.

O tungstênio tem o mais alto ponto de fusão de todos os elementos, a mais alta densidade e um elevado módulo de elasticidade. Além disto, apresenta um baixo coeficiente de dilatação térmica e boa condutividade térmica e sua baixa pressão de vapor favorece uma boa estabilidade dimensional em uma grande faixa de temperaturas de trabalho. Conseqüentemente, o eletrodo de tungstênio é um metal que sofre baixo desgaste, possui uma elevada resistência a deformação e elevada estabilidade dimensional, e por isto é utilizado para trabalhos de precisão. O tungstênio só é utilizado para determinadas aplicações devido ao seu elevado preço e a dificuldade de obtenção do eletrodo [26]. Para a produção de pequenos furos é, na maioria das vezes, utilizado o eletrodo de tungstênio, como por exemplo, na obtenção de furos para canais de resfriamento em pás de turbinas de avião e para bicos injetores. Para furos menores que 0,4 mm de diâmetro é recomendado quase sempre a utilização de eletrodos de tungstênio.

Os eletrodos de tungstênio são normalmente fornecidos da seguinte forma: na faixa de diâmetros de 0,125 a 0,50 mm, graduados de 0,025 mm, na faixa de diâmetros de 0,5 a 1 mm, graduados de 0,05 mm, e na faixa de diâmetros 1 a 1,5 mm, graduados de 0,125 mm. O eletrodo é fornecido no comprimento de 300 mm. Algumas das principais propriedades do tungstênio são citadas abaixo [26] :

- Condutividade elétrica → $18 \text{ m}/\Omega.\text{mm}^2$;
- Condutividade térmica → 167 W/m.K ;
- Ponto de fusão → $3410 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Módulo de elasticidade → 360 kN/mm^2
- Densidade → $19,2 \text{ g/cm}^3$
- Coeficiente de dilatação linear de 20 a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ → $10^{-6}/\text{K}$

3.11- Variantes do processo de eletroerosão por faíscas

Os diferentes processos de usinagem por eletroerosão por faíscas (**figura 3.11**) são, em analogia com os processos convencionais de usinagem, divididos em: eletroerosão por faíscas por penetração, retificação por eletroerosão por faíscas e corte por eletroerosão por faíscas. Enquanto que a retificação por eletroerosão por faíscas (o eletrodo executa um movimento de rotação) é utilizada na prática em casos especiais, o corte por eletroerosão por faíscas a fio tem grande aplicação. Por meio de um apropriado controle, o fio (eletrodo), semelhante ao princípio de uma serra fita, é conduzido através da peça e, desta maneira, é atingido o perfil desejado. Este processo tem uma vantagem na fabricação de aberturas de seção irregular em relação a eletroerosão por faísca por penetração, onde os custos de fabricação dos eletrodos são elevados. A remoção de material ocorre sobre uma região liniforme e num determinado tempo e apenas em uma linha, por isto as superfícies de trabalho são muito pequenas com este processo [10].

O processo mais difundido é a eletroerosão por faíscas por penetração. O processo é empregado para obtenção de gravuras com um eletrodo devidamente preparado, bem como na perfuração com eletrodos de forma [4, 16]. O presente trabalho trata-se do processo de eletroerosão por faíscas por penetração.

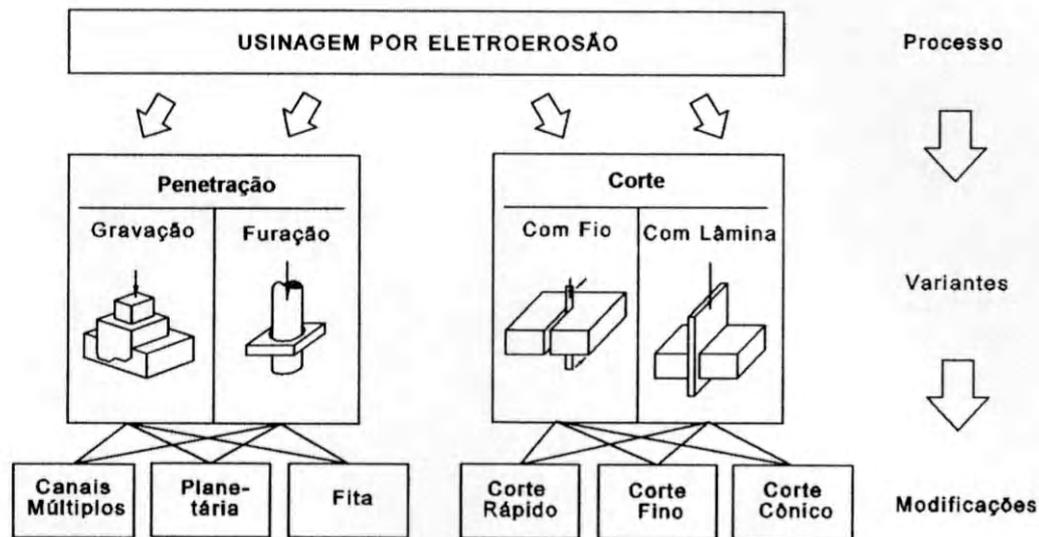


Figura 3.11 - Variantes do processo de eletroerosão por faíscas [4]

3.12- Características da superfície eletroerodida

As características da superfície eletroerodida dependem de quatro fatores em conjunto: peça, eletrodo, dielétrico e do processo de descarga elétrica (**figura 3.12**) [4, 10, 21, 33].

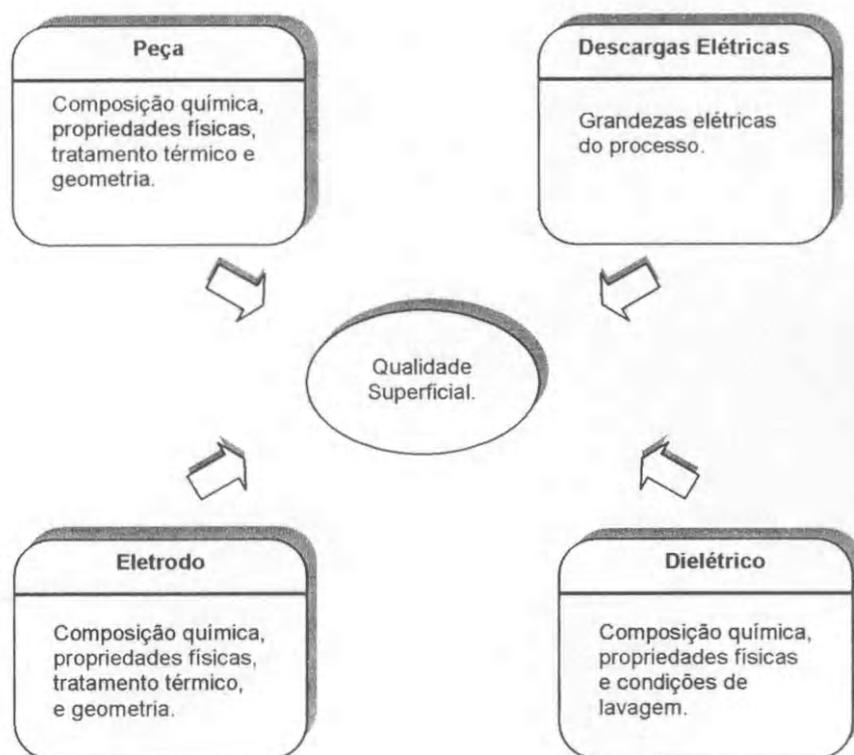


Figura 3.12 - Fatores que influenciam a qualidade da superfície eletroerodida [10]

No momento da descarga elétrica apresentam-se na peça e no eletrodo gradientes de temperatura da ordem de 10^5 a 10^6 °C/s. Este fenômeno físico pode provocar esforços mecânicos nas camadas superficiais e, com isto, soltar partes de material do eletrodo ou da peça. A influência térmica e mecânica que sofre o eletrodo e a peça é tanto maior, quanto maior é o conteúdo energético da descarga elétrica. As propriedades da superfície eletroerodida dependem da composição química, das propriedades físicas, do tratamento térmico sofrido pela peça, como também da geometria da peça. O processo de descarga elétrica também provoca a decomposição do dielétrico. Os elementos desta decomposição podem se difundir ou se precipitarem na superfície eletroerodida, provocando mudanças metalúrgicas

na superfície erodida. A qualidade da superfície eletroerodida pode ser vista conforme mostra a **figura 3.13** [4, 10, 21, 33].

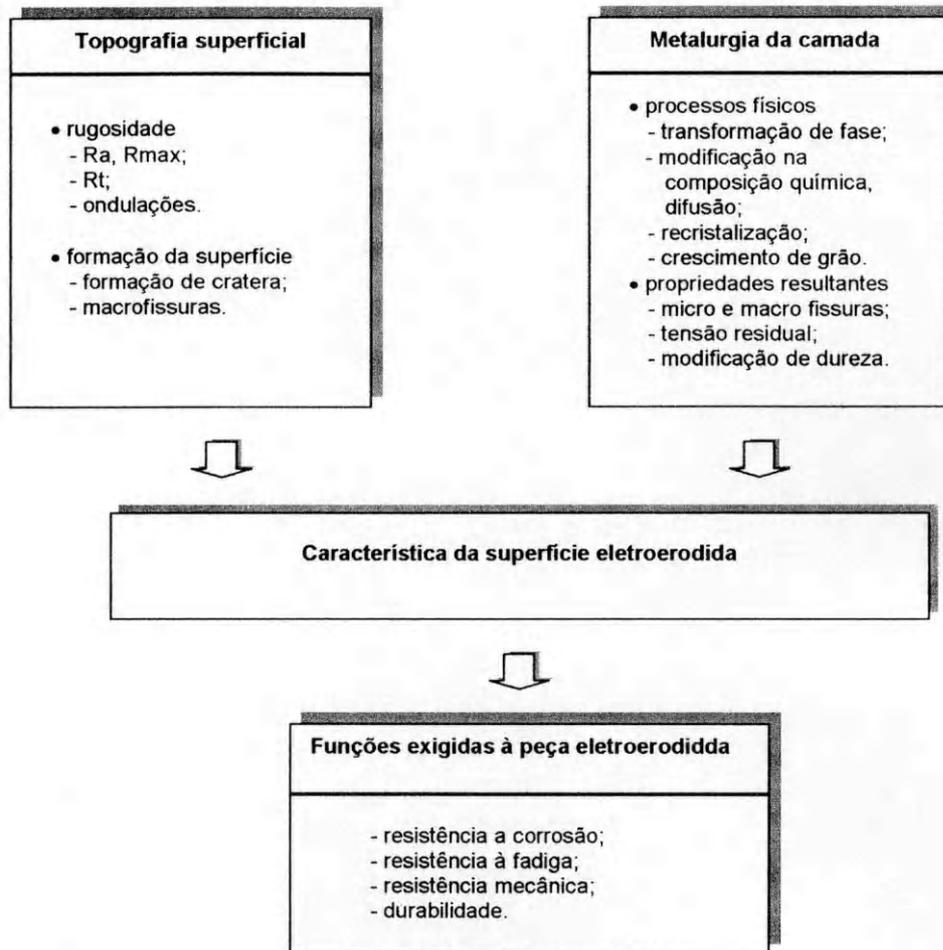


Figura 3.13 - Qualidade da superfície eletroerodida [33]

- **Topografia da superfície** - o processo de eletroerosão provoca uma superfície em forma de pequenas "crateras", resultando em uma superfície com aspecto "opaco", diferente das obtidas nos processos convencionais de usinagem por corte. A forma e o aspecto destas "crateras" estão ligados às grandezas elétricas do processo de eletroerosão e dependem também do material que está sendo usinado [4, 10, 21, 33];

- **Metalurgia da camada** - a **figura 3.14** mostra a metalurgia da camada térmicamente afetada. Acima da estrutura de base formam-se uma zona de transformação e uma camada branca. Estas regiões são decorrentes da elevada densidade de energia presente no processo durante a descarga. Uma pequena quantidade de material fundido resolidifica de forma muito rápida (por auto resfriamento) e se apresenta de forma coquilhada na superfície. Devido a contração volumétrica de solidificação, em materiais de média e alta liga, ocorrem tensões residuais de tração que chegam ao limite de ruptura, trincando a camada branca. Como entre a camada branca e a estrutura de base ocorrem temperaturas que variam todo o espectro, desde a temperatura de solidificação até a temperatura ambiente, as transformações metalúrgicas observadas correspondem às temperaturas e ao tempo em que as diversas regiões foram submetidas às respectivas temperaturas. A espessura da camada branca e da zona de transformação crescem com energia de descarga W_e . A influência de tempo de descarga t_e mais longo é menor do que um aumento da corrente de descarga i_e , porque com um crescente aumento do tempo de descarga ocorre um pequeno aumento da superfície da "cratera", mas nenhum aumento da profundidade da camada afetada. Ao lado das transformações de fase, a zona branca (**figura 3.14**) em conjunto com a zona de transformações, apresentam tensões residuais de tração [4, 10, 21, 33].

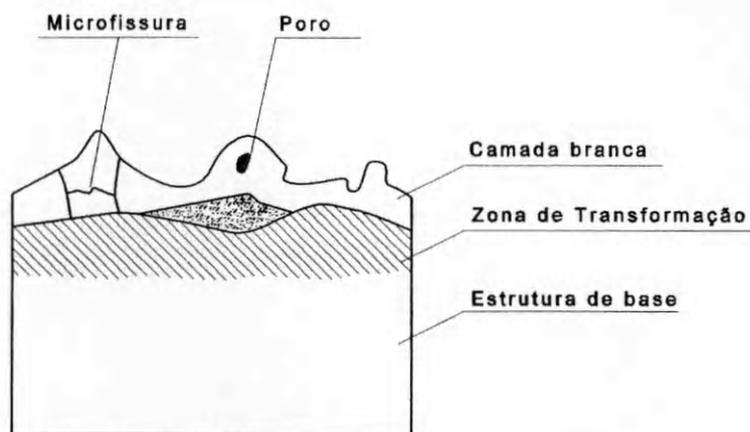


Figura 3.14 - Metalurgia da camada termicamente afetada [33]

3.13- Unidades para controle e supervisão do processo

Atualmente, as máquinas de eletroerosão por faíscas são equipadas por unidades automáticas para o controle e supervisão do processo para a correção dos parâmetros que variam durante a usinagem. Para evitar condições não desejadas no processo, como formação de arcos voltaicos, curto-circuitos, provocando danificações na peça e no eletrodo, são empregados controles adaptativos que em parte já são integrados em máquinas de eletroerosão por faíscas fabricadas em série [4].

3.13.1- Controle adaptativo do processo "AC"

A idéia do controle adaptativo é compreendida como uma ferramenta de "conduta do processo" que é aplicada para se atingir um objetivo de um determinado trabalho de erosão. Correspondentemente a sua construção, seu modo de atuação e seu objetivo de atuação, o controle adaptativo é dividido em "regulagem de limite" (adaptive control constraint) "ACC" e "regulagem de otimização" (adaptive control optimization) "ACO". A **figura 3.15** mostra o esquema básico de funcionamento da regulagem "ACC" e "ACO" [10, 12, 24, 25].

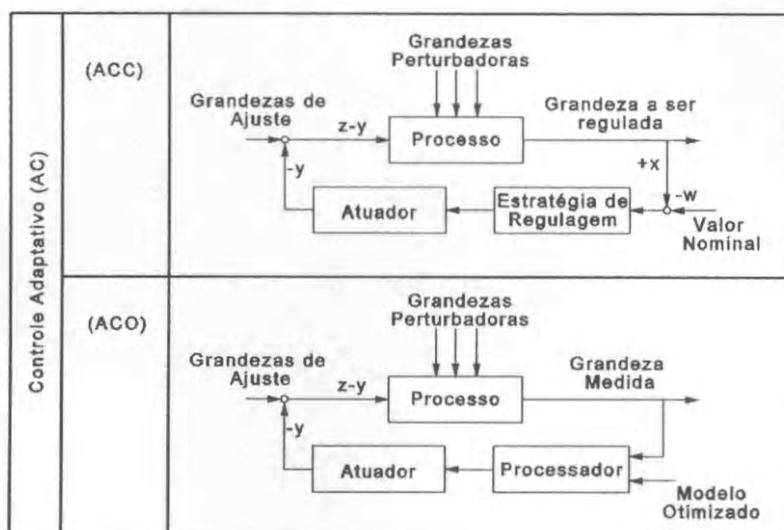


Figura 3.15 - Esquema básico de funcionamento "ACO" e "ACC" [10]

No sistema "ACC" a grandeza que está sendo controlada no processo é medida através de sensores e é comparada com o valor nominal ajustado para esta grandeza, sendo influenciada (quando apresenta um desvio) pelo atuador.

O objetivo de uma regulação "ACO" pode ser através de valores tecnológicos e geométricos, os quais são determinados através do eletrodo, peça e da eficiência da máquina-ferramenta. A regulação "ACO" conduz o processo sem que sejam ultrapassados os valores limites de uma grandeza pré-definida [10, 12, 24, 25]. O sistema "ACO" é influenciado automaticamente de modo que os valores pré-definidos da grandeza fiquem entre os valores máximos e mínimos definidos. Este objetivo da função abrange uma independência entre a grandeza medida realmente na fenda de trabalho, as grandezas de regulação e o objetivo desejado. Após a definição de um modelo de otimização matemático ou empírico é determinado um modo de atuação no processo, de maneira que o objetivo seja atingido o mais próximo possível do desejado [10, 12, 24, 25].

O processo de erosão com ajuda do sistema "AC" para automatização e otimização do processo pode ser definido sob diferentes estratégias [4, 10]:

- Redução do tempo de ciclo de usinagem;
- Custos de usinagem;
- Estabilidade do processo.

A **figura 3.16** mostra um sistema "AC" desenvolvido na Universidade Técnica de Aachen (Alemanha) que utiliza e aproveita a alta flexibilidade dos microprocessadores na determinação e teste de estratégias de controle [4].

Inicialmente vários sensores determinam o estado atual do processo. O microprocessador analisa os sinais dos sensores de acordo com uma estratégia pré-determinada que objetiva uma determinada condição, como por exemplo, tempo de descarga curto ou pequeno desgaste do eletrodo. No caso de uma perturbação no processo, os parâmetros dominantes são controlados e ajustados por um sistema automático. A grande vantagem deste sistema é que por um lado as perturbações do processo podem ser evitadas e, devido ao monitoramento constante, o trabalho é realizado em condições otimizadas de maneira mais rápida e eficiente [4].

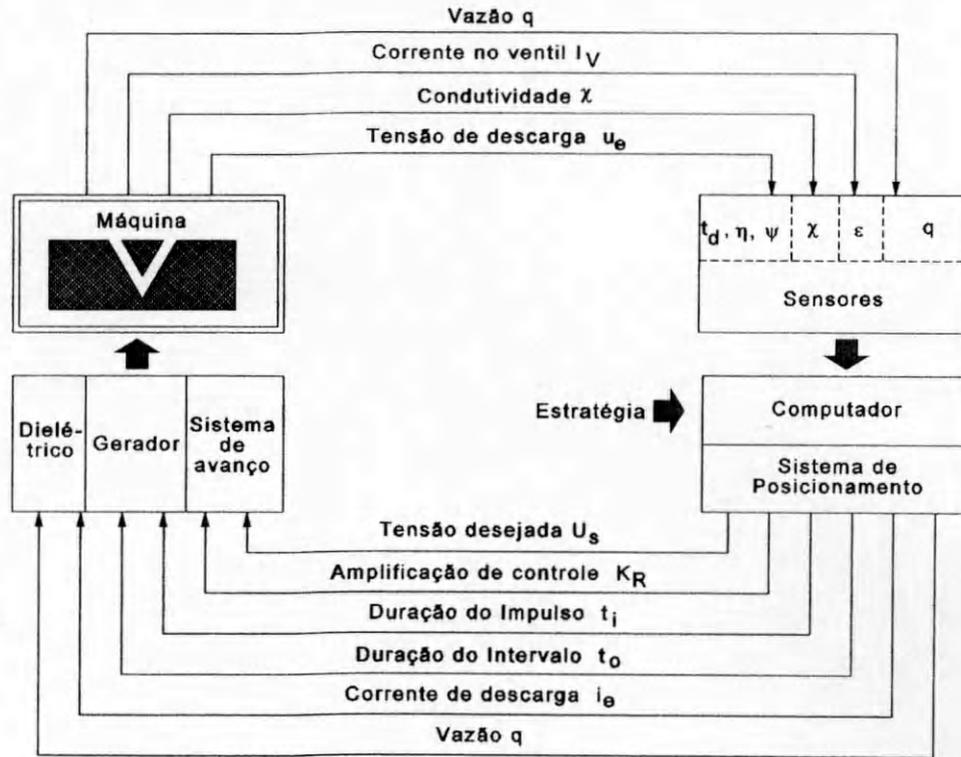


Figura 3.16 - Circuito de controle para otimização da eletroerosão [4]

4- Materiais e métodos

4.1- Material do corpo de prova

Os experimentos foram realizados em aço para cementação (18 Cr Ni 8) norma **VS 18 066-SI** (norma Bosch), o qual é fornecido em barras redondas laminadas a quente. Além do ferro, há em sua composição química (% em peso), os seguintes elementos:

C: 0,13 - 0,22

Mo: máx. 0,15

Si: máx. 0,20

Ni: 1,7 - 2,15

Mn: 0,36 - 0,64

Cu: máx. 0,30

P: máx. 0,025

Sn: máx. 0,030

S: 0,015 - 0,035

O₂: máx. 25 ppm

Al: 0,015 - 0,040

Cr: 1,7 - 2,1

O material acima é fornecido com as seguintes propriedades mecânicas:

- Resistência à tração: 610 até 760 N/mm²;
- Dureza: 180 até 225 HB 5/750.

O material 18 Cr Ni 8 é um aço de baixo carbono, devendo ser cementado para possibilitar, com o tratamento térmico posterior, a obtenção da dureza exigida de 695 ± 45 HV10 em 0,1 mm (medido perpendicularmente a partir da sede) (**figura 4.1**)

Após a "usinagem mole" (estado recozido) o material é cementado, temperado e revenido, e a profundidade da camada endurecida é de $0,60 \pm 0,15$ mm (medido perpendicularmente a partir da sede) (**figura 4.1**).

4.2- Corpo de prova

Como corpo de prova será utilizado o "corpo" do bico injetor **DSLA P** (denominação Bosch), cujas principais características são mostradas na **figura 4.1**.

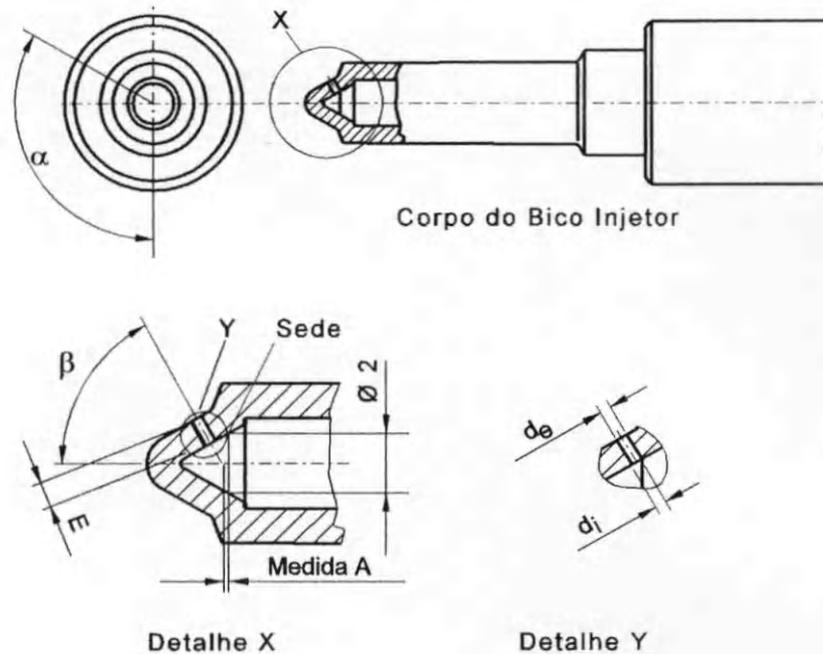


Figura 4.1 - Características do corpo de prova

Para a determinação da posição e comprimento do furo injetor no corpo de prova são definidas as seguintes características, conforme mostra a **figura 4.1**:

- Ângulo radial do furo injetor (α);
- Distância entre o ponto em que a linha central do furo de injeção "corta" a linha de centro do corpo do bico injetor até o diâmetro de 2 mm medido na sede (Medida "A")
- Ângulo axial do furo injetor (β),
- Comprimento do furo de injeção (E), que para este corpo de prova é de $1,05 \pm 0,05$ mm.

4.3- Eletrodo utilizado nos experimentos

Na microfuração por eletroerosão de bicos injetores são empregados eletrodos de tungstênio ou de prata. O eletrodo de prata tem melhores propriedades elétricas do que o eletrodo de tungstênio. Neste trabalho as exigências de precisão de forma do furo são mais importantes e, por isto, empregou-se o eletrodo de tungstênio. O módulo de elasticidade e temperatura de fusão elevados (conforme citado no **item 3.10.1**) favorecem a precisão de forma do furo. As vibrações do eletrodo e o seu desgaste são menores durante o processo de erosão [26]. O diâmetro do eletrodo utilizado nos experimentos possui $0,085^{+0,001}$ mm. O fabricante (firma OSRAM) fornece o eletrodo de tungstênio no comprimento de 300 mm, conforme norma DIN 46399.

4.4- Máquina-ferramenta utilizada nos experimentos

A máquina de eletroerosão por faíscas utilizada nos experimentos é do fabricante AGIE/CHARMILLES, modelo AGIE QUADRATON 1 (**figura 4.2**).



Figura 4.2 - Máquina de eletroerosão por faíscas AGIE QUADRATON 1

Na **figura 4.3** é mostrado uma representação esquemática da máquina AGIE QUADRATON 1 com suas partes principais.

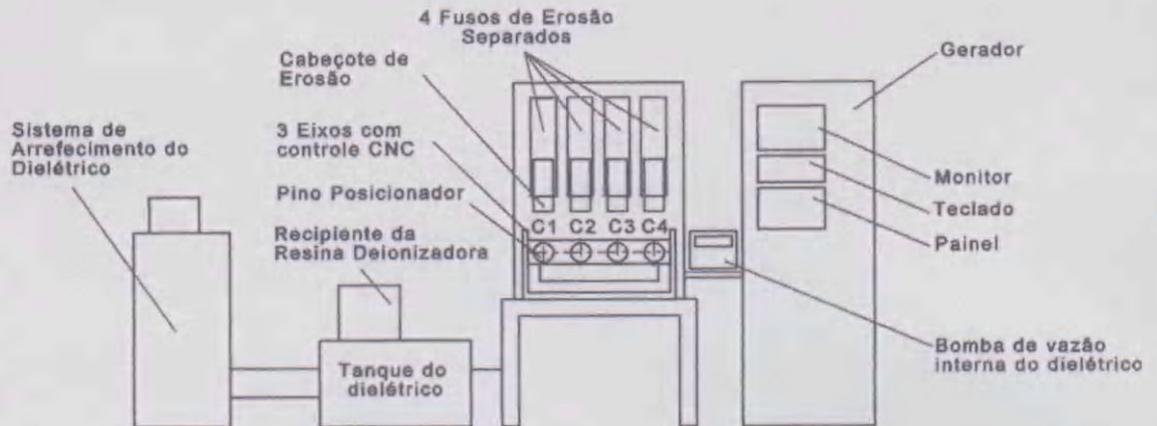


Figura 4.3 - Representação esquemática mostrando as partes principais da máquina AGIE QUADRATON 1

Os cabeçotes de erosão usinam independentemente uns dos outros, o que possibilita uma fenda de trabalho "ótima" para cada cabeçote de erosão. O corpo de prova é fixado no pino posicionador (**figura 4.4**), cuja posição de usinagem é dada pelos eixos $\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$ (vide **figura 3.9**) e comandada (pela qual é dada a posição geométrica do furo) através de um controlador CNC.



Figura 4.4 - Corpo de prova fixado no pino posicionador

A entrada dos dados pode ser efetuada manualmente ou diretamente de um microcomputador. Para a entrada manual, os dados são visualizados na tela, facilitando a programação. No monitor pode ser acompanhado graficamente o decorrer do processo de erosão em relação à estabilidade, avanço do eletrodo e energia de descarga W_e .

Devido às elevadas exigências de precisão e baixas energias de descargas com elevadas frequências requeridas na furação de bicos injetores, a máquina possui um gerador de relaxação (conforme descrito anteriormente) com descargas controladas.

Outra unidade importante da máquina é o agregado do dielétrico, que é composto do sistema de arrefecimento, tanque do dielétrico, recipiente da resina deionizadora e sistema de fornecimento do dielétrico para o eletrodo e para a peça.

Neste trabalho define-se a vazão "externa" do dielétrico v_e como sendo a vazão do dielétrico fornecida coaxialmente com o eletrodo, atingindo a lado externo do corpo do bico injetor. De forma semelhante, é definida a vazão "interna" v_i como sendo a vazão fornecida pelo lado interno do corpo do bico injetor.

4.4.1- Cabeçote de erosão da máquina AGIE QUADRATON 1

As funções principais do cabeçote de erosão são assegurar o correto posicionamento do eletrodo nos eixos $\pm U$ e $\pm V$ (vide **figura 3.9**) e também conduzir o eletrodo em direção à peça para o início da usinagem (**eixo $\pm W$**).

Os elementos principais do cabeçote de erosão são (**figuras 4.5-a e 4.5-b**): o suporte do prisma, prisma, tampa do prisma, contrapeso, encosto e pino posicionador (apoio e fixação do corpo do bico injetor).

O prisma e o suporte do prisma são os elementos de fixação do eletrodo no cabeçote de erosão, os quais permitem o posicionamento preciso do eletrodo nos eixos $\pm U$, $\pm V$, $\pm W$ (vide **figura 3.9**) A **figura 4.6** mostra o prisma e a tampa do prisma, ambos são de material cerâmico (fabricante Bangerter). O prisma é de material cerâmico para garantir um pequeno desgaste e para resistirem às elevadas temperaturas que são geradas no processo de eletroerosão, as quais podem

provocar a fusão da extremidade do prisma e, com isto, dificultar o correto posicionamento do eletrodo. Para cada diâmetro do eletrodo são definidas as dimensões do prisma. Nos experimentos neste trabalho foi utilizado o prisma nº 6.

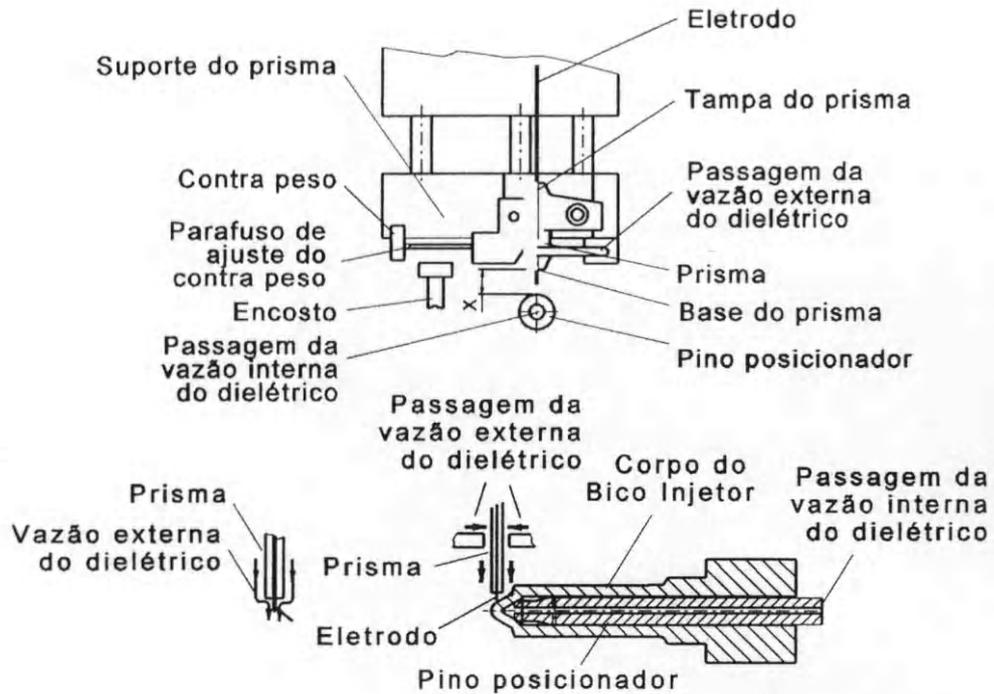


Figura 4.5 - Esquema do cabeçote de erosão da máquina AGIE QUADRATON 1

A ranhura em "V" do prisma, juntamente com a tampa do prisma, permitem a fixação do eletrodo dentro da ranhura. A pressão aplicada sobre a tampa do prisma é definida pelo peso e a posição do contrapeso, e é de fundamental importância para o correto posicionamento do eletrodo.

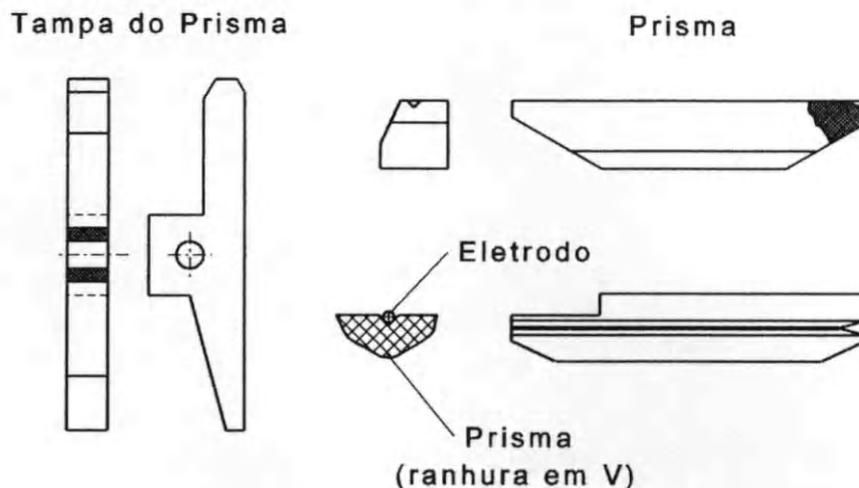


Figura 4.6 - Esquema do prisma e tampa do prisma utilizado nos experimentos

Outras características importantes do cabeçote de erosão, mostradas nas **figuras 4.5-a e 4.5-b**, são a medida "X", que é a distância entre a base do prisma e o pino posicionador, passagem da vazão "externa" do dielétrico e a passagem da vazão "interna" do dielétrico através do pino posicionador. Nas **figuras 4.7-a e 4.7-b** podem ser também visualizadas a vazão "externa" e a vazão "interna" do dielétrico no cabeçote de erosão da máquina AGIE QUADRATON 1.



Figura 4.7 - Visualização da vazão "externa" e "interna" do dielétrico

Antes do início do processo de erosão (início da primeira descarga elétrica) o suporte do prisma move-se até o encosto (**figura 4.5**), ao mesmo tempo que o gerador permanece ligado. O cabeçote de erosão (que suporta o eletrodo) é movido pelo servomotor em direção ao corpo de prova até o contato do eletrodo/corpo de prova. No momento do contato eletrodo com o corpo de prova é enviado um sinal elétrico para o gerador para o início do processo de erosão. Após o sinal ter sido enviado, o eletrodo retorna e parte novamente em direção ao corpo de prova até que ocorra a "ruptura" do dielétrico e inicie a primeira descarga elétrica. A medida "X" é mantida constante durante todo o processo de erosão. A **figura 4.8** mostra o início do processo de erosão, onde pode ser visto que, para pequenas profundidades de penetração do eletrodo, uma forte claridade é originada das descargas elétricas.

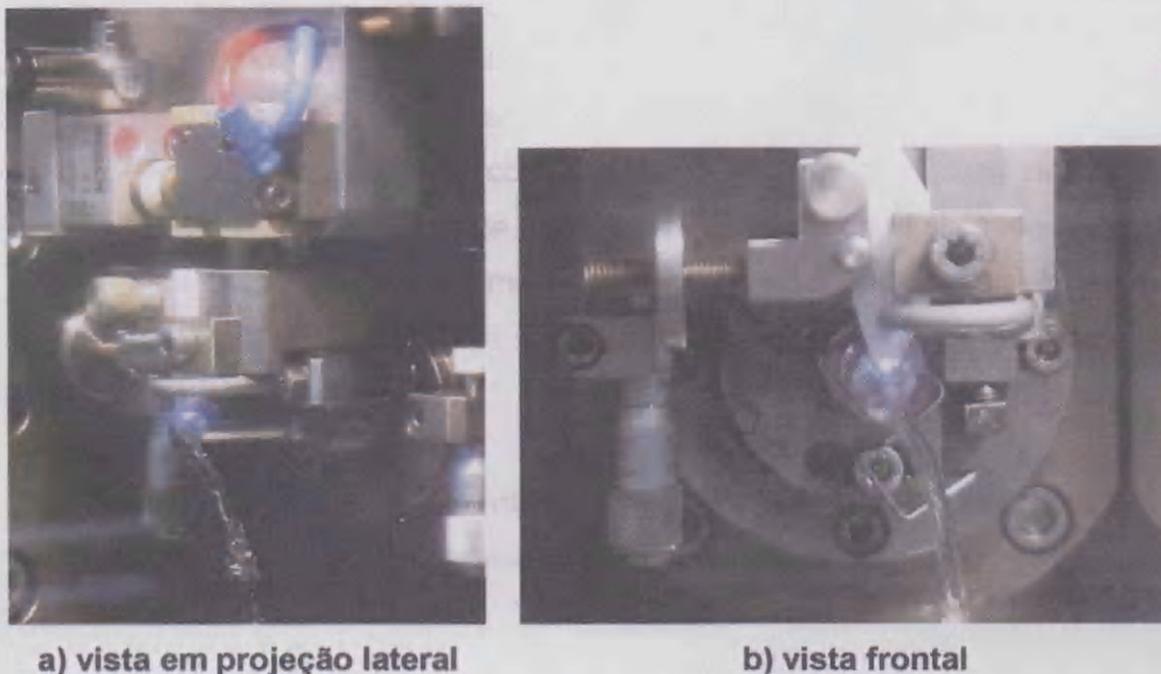


Figura 4.8 - Claridade originada no início do processo de erosão

4.5- Equipamentos utilizados para ajuste e monitoramento do processo

Para controlar e ajustar o processo de maneira segura são utilizados os seguintes equipamentos:

- **Calibrador (dispositivo) de ajuste do comprimento em balanço do eletrodo "X"** (vide figura 4.5) – este dispositivo é apoiado sobre o pino posicionador para o ajuste da medida "X";

- **Condutímetro: Aparelho de medir a condutividade elétrica e temperatura da água Bürkert modelo 8225** – ajuste e controle da condutividade elétrica da água (dielétrico) dentro da faixa desejada de trabalho, como também monitora a temperatura da água.

A condutividade elétrica da solução que se deseja medir é definida como a capacidade desta solução de conduzir a corrente elétrica. Os transportadores de carga são os íons. Para medir a condutividade o aparelho está equipado com dois eletrodos de aço inoxidável que são

imersos na solução em que se deseja medir a condutividade. Estes eletrodos possuem uma distância definida entre eles e também áreas superficiais definidas. É aplicada então entre eles uma tensão alternada, o que permite a passagem de corrente elétrica através do circuito eletrônico do equipamento, ou seja, este fluxo de corrente é a condutividade elétrica da solução. Este equipamento também possui um sistema de compensação de temperatura da solução para evitar leituras errôneas da condutividade elétrica;

- **Equipamento de arrefecimento do dielétrico Termogamma modelo WG 20a TPS** – ajuste da temperatura do dielétrico dentro da faixa desejada de trabalho. No processo de erosão são geradas temperaturas elevadas, que provocam um aquecimento indesejado do dielétrico. Assim, o sistema de arrefecimento do dielétrico remove o calor do dielétrico para que a temperatura fique dentro da faixa desejada de trabalho;
- **Balança para medição de massa G-LIBRON modelo 210** - medição da vazão (em massa) "externa" e "interna" do dielétrico;
- **Equipamento para controle da temperatura e umidade relativa do ar THERM modelo 6290-7K** – monitoramento da temperatura e umidade relativa da sala climatizada onde os experimentos foram realizados;
- **Equipamento para medição do diâmetro dos eletrodos (ferramenta) a laser ZYGO modelo 3010** – com este equipamento são controlados os diâmetros dos eletrodos (se os valores estão dentro das especificações do fabricante) através da medição de 12 pontos escolhidos aleatoriamente ao longo do comprimento de 300 mm. O equipamento determina matematicamente o valor médio das medições dos 12 pontos.

4.6- Equipamentos utilizados para avaliação dos resultados

Com o objetivo de assegurar a qualidade dos resultados dos experimentos, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- **Máquina de medição de diâmetros Mycrona modelo Altera** - avaliação do diâmetro d_e e o diâmetro d_i do furo de injeção

- **Bancada de medição de fluxo hidráulico Danfoss modelo Mass 2100** - avaliação do fluxo hidráulico Q , que é uma medida do volume de óleo que passa através dos furos de injeção na unidade de tempo;

- **Tempo de usinagem** – a máquina AGIE QUADRATON 1 está equipada com um cronômetro que permite uma leitura do tempo de usinagem no final de cada ciclo de erosão;

- **Microscópio óptico Leica Wild modelo 650** – este equipamento permite avaliar a qualidade de canto. Este é um critério visual que permite verificar se houve uma "expulsão" de material no canto do diâmetro d_e do furo. Esta "expulsão" de material será mostrada no **item 5.5**

4.7- Comportamento da vazão "interna" do dielétrico

Foi levantada a curva da vazão "interna" do dielétrico como função da rotação da bomba (bomba de rolos IKA). Foi pesado o fluido coletado em um tempo de 30 segundos para as rotações de 5, 10 e 15 RPM (faixa de trabalho dos experimentos). Esta bomba foi adaptada à máquina de eletroerosão, pois conforme experiência prática, permitia um processo de erosão mais estável, tanto devido ao controle constante da vazão do dielétrico, como também devido a uma remoção melhor dos produtos de erosão. A curva é mostrada no **anexo 9.1**.



Figura 4.9 - Bomba reguladora IKA de vazão "interna" do dielétrico utilizada nos experimentos

4.8- Avaliação dos equipamentos

Todos os equipamentos, máquinas e instrumentos necessários para a realização dos experimentos passaram por uma avaliação, onde foram verificadas as condições de funcionamento, precisão, repetibilidade, folgas, desvios, batimentos, ajustes, e necessidade ou não de manutenção. Neste etapa foram determinadas também as incertezas dos equipamentos utilizados, conforme Gonçalves [35], cujos valores se encontram no **anexo 9.2**.

4.9- Parâmetros do programa de furação do gerador da máquina AGIE QUADRATON 1

O exemplo do **quadro 1** mostra o programa de furação, no qual são mostrados os valores dos parâmetros (parâmetros não-elétricos) que controlam o gerador da máquina AGIE QUADRATON 1. Para cada sequência de programa de furação "Nr" corresponde um conjunto de parâmetros para a regulagem do gerador. Para os valores das variáveis corrente de descarga I (t_e), tensão nominal do gerador U-I (u), tempo de descarga T (t_e), capacitância do capacitor S e tempo de pausa entre descargas P (t_0), são definidas determinadas posições que correspondem a um determinado valor físico real. Estes valores físicos reais se encontram no **anexo 9.3**.

Nr	W	U	I	U-I	T	S	P	Com	Gain	ACO
Sequência de programa de furação	Percurso Do Eletrodo	Polaridade De do Eletrodo	Corrente de descarga	Tensão Nominal do Gerador	Tempo de descarga	Capacitância do capacitor	Tempo de pausa entre descargas	Distância entre eletrodo e peça	Velocidade de posicionamento do eletrodo	Função de Monitoramento do processo
[-]	[mm]	[+/-]	[A]	[V]	[μ s]	[nF]	[μ s]	[%]	[%]	[-]
1	-0,2	+	1	9	1	30	8	10	8	0
2	-0,6	-	1	27	1	44	8	25	8	65
3	-1,6	-	1	21	1	44	8	30	8	65
4										
5										

Quadro 1 – Programa de furação da máquina AGIE QUADRATON 1

Cada coluna do programa de furação do gerador da máquina AGIE QUADRATON 1 (Quadro 1), corresponde aos seguintes parâmetros:

- Nr (sequência de programa de furação)

Nesta coluna são numeradas as sequências dos programas de furação. É possível no máximo 15 sequências de programas de furação. Nos experimentos definiu-se 5 programas de furação para a erosão de cada furo de injeção.

- W (Percurso do eletrodo)

Representa o caminho percorrido pelo eletrodo (em mm) até o final da erosão. Conforme experimentos anteriores e experiência prática, definiu-se a seguinte sequência de penetração do eletrodo (coluna hachurada), conforme **quadro 2**:

Nr	W	U	I	U-I	T	S	P	Com	Gain	ACO
Sequência de programa de furação	Percurso Do Eletrodo	Polaridade De do Eletrodo	Corrente de descarga	Tensão Nominal do Gerador	Tempo de descarga	Capacitância Do Capacitor	Tempo de pausa entre descargas	Distância Entre eletrodo E peça	Velocidade de posicionamento do eletrodo	Função de Monitoramento do processo
[-]	[mm]	[+/-]	[A]	[V]	[μ s]	[nF]	[μ s]	[%]	[%]	[H]
1	-0,2	+	1	9	1	30	8	10	8	0
2	-1,3	-	1	27	1	44	8	25	8	65
3	-1,6	-	1	27	1	44	8	30	8	65
4	-2,2	-	1	27	1	44	8	25	8	65
5	-2,55	-	1	27	1	44	8	30	8	65

Quadro 2 – Percurso percorrido pelo eletrodo até o final da erosão

- U (Polaridade do eletrodo)

Regulagem: + ou -

+ significa que o eletrodo está polarizado positivamente, e então a remoção ocorre no eletrodo.

- significa que o eletrodo está polarizado negativamente, e então ocorre a remoção na peça.

Para a sequência de programa de furação "Nr" 1 foi empregado a polaridade positiva, e para as demais sequências, a polaridade negativa. O eletrodo polarizado positivamente elimina parcialmente as irregularidades superficiais da sua "ponta" e, com isto, provoca uma melhoria na precisão de forma do diâmetro d_e do furo injeção e elimina praticamente a possibilidade de "expulsão" de material no contorno do diâmetro d_e (como será mostrado no **item 5.5**), conforme experimentos já realizados com eletrodos de tungstênio.

- I (Corrente de descarga i_e)

Regulagem: 0 - 5,6 A

Nestes experimentos foi utilizada uma corrente de descarga i_e de 0,8 A (posição1). Este valor é normalmente utilizado na microfuração por eletroerosão, pois elevados valores de corrente de descarga, conforme experimentos realizados e conhecimento

teórico, aumentam a frequência da corrente de descarga, o que juntamente com condições de lavagem não favoráveis, aumenta a probabilidade de descargas-falhas.

- U-I (Tensão nominal do gerador u)

Regulagem: 66 - 255 V

Determina a tensão nominal na qual o capacitor é carregado e tem uma influência na fenda de trabalho s. Nos experimentos foi utilizada, para a sequência de programa de furação "Nr" 1, uma tensão de 228 V (posição 9). Este valor foi definido conforme resultados de experimentos anteriores. Para os demais sequências de programas de furação "Nr", definiu-se, nos ensaios preliminares, uma tensão de 192 V (posição 21). Este valor foi determinado pela experiência prática e conhecimento teórico, e baixos valores de tensão, juntamente com boas condições de lavagem, favorecem os trabalhos de furação por eletroerosão onde são exigidas maiores precisões de forma e um melhor acabamento superficial do furo.

- T (Tempo de descarga t_e)

Regulagem: 0,4 – 7500 μ s

Determina o tempo de descarga t_e de uma descarga elétrica. Tempos de descargas maiores aumentam o valor médio da corrente de descarga i_e , o que pode influenciar a estabilidade do processo. Nos experimentos foi utilizado um tempo de descarga de 0,4 μ s (posição 1). Este valor tem como vantagem maiores taxas de remoção V_w e, como desvantagem, maior desgaste relativo ϑ , porém, experimentos anteriores mostram que este valor melhora a estabilidade do processo.

- S (Capacitância do capacitor)

Regulagem: 20 - 35 ("sem diodo") e 40 - 55 ("com diodo")

Determina a capacitância do capacitor, a qual define a quantidade de energia acumulada no capacitor. A regulagem "com diodo" elimina a parte negativa da descarga (vide **figura 3.6**), com isto aumenta-se a remoção de material na peça e minimiza o desgaste no eletrodo. Foi empregada, nos experimentos, a capacitância de 2,7 nF (posição 30 "com diodo") para a sequência programa de furação "Nr" 1.

Este valor foi definido conforme experimentos já realizados. Utilizando-se um valor da capacitância do capacitor de 2,7 nF, juntamente com o eletrodo polarizado negativamente, favorece uma remoção desejada de aproximadamente 50 a 70% no eletrodo e, assim, as irregularidades da ponta do eletrodo são removidas. Para as demais sequências de programas de furação "Nr" foram utilizados valores de capacitância de 1,2 nF (posição 44) como valores ótimos encontrados em experimentos anteriores. Elevados valores de capacitância "com diodo" (posição 40 a 50) provocam elevadas taxas de remoção V_w , mas, elevada rugosidade no furo de injeção, o que é indesejado neste processo.

- P (Tempo de pausa entre duas descargas t_0)

Regulagem: 0,4 – 7500 μ s

Determina o tempo de pausa t_0 entre duas descargas elétricas. O tempo de pausa de 13 μ s (posição 9) foi utilizado nos experimentos. Este valor é o normalmente empregado na microfuração por eletroerosão, conforme resultados de experimentos anteriores. O tempo de pausa tem grande influência na taxa de remoção V_w e no desgaste relativo \mathcal{Q} . Tempos de pausa curtos favorecem a taxa de remoção e o desgaste relativo. Deve-se buscar um valor ótimo de trabalho, de modo que a deionização do dielétrico ocorra em tempo suficiente para restabelecer novamente sua condutividade elétrica e que os produtos de erosão possam ser removidos da fenda de trabalho.

- Com (Regulagem da fenda de trabalho s)

Regulagem: 0 - 55%

Regula a distância entre eletrodo e peça (fenda de trabalho). Nos experimentos foi verificada a influência deste parâmetro para as posições 5, 10, 15 % para a sequência de programa de furação "Nr" 1 e, para as demais sequências de programas de furação "Nr", as posições 20, 30, 40 % serão estudadas. Quanto menor o valor da regulagem da fenda de trabalho (parâmetro "Com"), maior é o valor da fenda de trabalho. Para a usinagem com o eletrodo polarizado negativamente empregam-se normalmente fendas de trabalho menores, ou seja, menores distâncias entre eletrodo e peça. Assim, diminui-se a probabilidade de ocorrer a

descarga lateral ("laterales ausfunken"), isto é, o valor da tensão de descarga u_e (que normalmente é de 15 a 30 V), atinge momentaneamente o valor da tensão do capacitor, com o qual o circuito eletrônico do gerador de relaxação está equipado. Esta condição pode provocar o arrancamento de material da parede do furo prejudicando sua qualidade superficial.

- Gain (Regulagem da velocidade de posicionamento do eletrodo)

Regulagem: 0 - 99%

Este parâmetro refere-se ao controlador "P" (conforme mencionado no **item 3.8.2**) que posiciona o eletrodo (com uma determinada velocidade) de acordo com as condições da fenda de trabalho. Maiores valores da regulagem da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain"), implicam em maiores velocidades de posicionamento do eletrodo. Nos experimentos foi estudada a influência deste parâmetro para as posições 4, 8 e 12 %.

- ACO (Estratégia de monitoramento e otimização do processo)

Regulagem: ACO 0, ACO 1, ACO 8, ACO 64, ACO 128, ACO 65

Trata-se de uma estratégia de monitoramento e otimização do processo (conforme citado no **item 3.13**). Nos experimentos foi utilizada a variável "ACO" na posição 0 para a sequência de programa de furação "Nr" 1 e, para as demais sequências de programas "Nr", a variável "ACO" na posição 65, conforme experiência prática e resultados de trabalhos anteriores para eletroerosão por faíscas utilizando eletrodo de tungstênio. Utilizando-se a variável "ACO" na posição 0, a função de monitoramento do processo está desligada. A variável "ACO" na posição 65 desliga o gerador quando alguma descarga anormal ocorre e, ao mesmo tempo, favorece que a frequência do pulso de descarga elétrica seja mais estável.

4.10- Parâmetros de ajuste (parâmetros não-elétricos)

Entre os parâmetros de ajuste (não-elétricos) são controlados a medida "X" (vide **figura 4.5**) ($0,5 - 0,05$ mm para todos os experimentos, definidos conforme experiência prática e teórica), a condutividade elétrica da água χ , e a vazão "externa" v_e e "interna" v_i do dielétrico (**figura 4.10**).

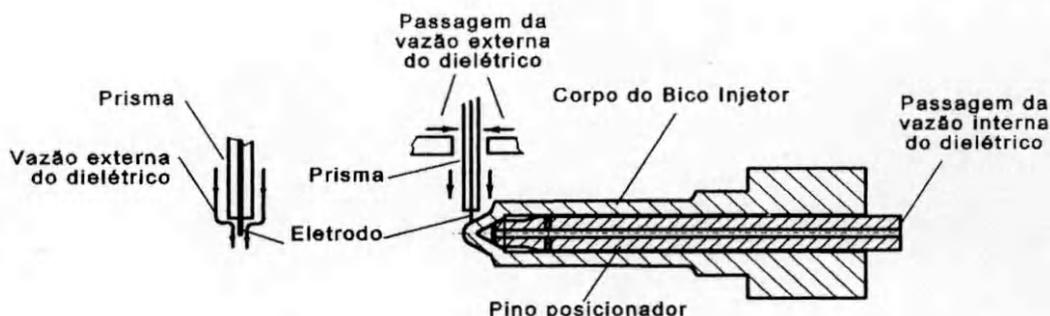


Figura 4.10 - Esquema do pino posicionador mostrando a vazão "interna" do dielétrico

O valor da vazão "externa" do dielétrico empregada nos experimentos é de aproximadamente 2,19 g/s. Nos experimentos foi verificada a influência da vazão "interna" do dielétrico para valores de 0, 0,04, 0,08 e 0,11 g/s.

4.10.1- Dielétrico utilizado nos experimentos

A remoção de material no processo de eletroerosão por faíscas baseia-se em um princípio de remoção térmica. Na base do "canal de descarga" o material da peça é fundido e evaporado parcialmente. A remoção de material é suportada pelas forças do processo, conduzindo a remoção do material liquefeito da "cratera" de descarga [44].

O meio de trabalho tem uma influência marcante no processo de remoção, pois é responsável pelo resfriamento e pela contração do "canal de descarga". O efeito de resfriamento principal é produzido pelos efeitos de ebulição do meio de trabalho. Neste aspecto, há uma diferença considerável entre dielétricos

convencionais à base de óleo e os meios aquosos, pois a energia de ebulição específica dos meios aquosos é cerca de oito vezes mais elevada e os fenômenos de ebulição ocorrem a um nível mais baixo de temperatura. Conseqüentemente, o processo de erosão à base de água possui uma estabilidade térmica mais elevada, o que favorece taxas de remoção mais elevadas [44].

As forças geradas no processo também estão estreitamente ligadas às propriedades térmicas dos tipos de dielétrico. Devido a uma produção de gases muito mais baixa no "canal de descarga" em dielétricos aquosos, há uma contração menor deste "canal", isto faz com que aumente a densidade de energia elétrica de descarga W_e . Resultam forças do processo mais elevadas, removendo mais material liquefeito da "cratera" de descarga. Além destas características, utilizando-se água como dielétrico ao invés de dielétricos à base de óleo, as condições de manuseio e ambientais são melhoradas substancialmente. Utilizando-se água como dielétrico na eletroerosão por penetração, podem ser obtidos desempenhos mais elevados do processo e melhoria das condições ambientais [44].

Para que sejam atingidas as elevadas precisões na furação dos furos de injeção é necessário um valor de condutividade elétrica χ abaixo de $0,5 \mu\text{S}/\text{cm}$. Para isto, é necessário que o dielétrico passe através de um filtro removedor de sujeiras, sistema de arrefecimento e, por último, através de uma resina deionizadora. Nestes experimentos foi utilizada a resina ionizadora SM 94 do fabricante Bayer SA.

4.11- Parâmetros geométricos do furo de injeção

Para definir a posição geométrica dos furos de injeção no corpo de prova (vide **figura 4.1**) é definido o programa de "coordenadas" do furo de injeção, o qual contém as informações de medida "A", ângulo axial β e ângulo radial α para cada furo de injeção. Nos experimentos foi realizada a furação de 6 furos de injeção conforme quadro 3.

FURO	Ângulo axial (β)	Ângulo radial (α)	Medida A
1	90 graus	30 graus	0,65 mm
2	90 graus	90 graus	0,65 mm
3	90 graus	150 graus	0,65 mm
4	90 graus	210 graus	0,65 mm
5	90 graus	270 graus	0,65 mm
6	90 graus	330 graus	0,65 mm

Quadro 3 – Programa de "coordenadas" dos furos de injeção.

Nos experimentos seguintes também foi verificada a influência do ângulo axial β para valores de 60, 70, 80 e 90 graus.

4.12- Metodologia dos Experimentos

Inicialmente foi definido nos ensaios iniciais o programa de furação "base" (vide **quadro1**) e a faixa ideal de trabalho para a condutividade elétrica e temperatura do dielétrico. Após esta etapa foi realizado o primeiro grupo de experimentos, onde foi analisado a influência da vazão "interna" do dielétrico v_i , do número de furos n_f e do ângulo axial β sobre o diâmetro d_e e o diâmetro d_i do furo.

No segundo grupo de experimentos foi verificada a influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da distância entre eletrodo e peça (parâmetro "Com") sobre o tempo de usinagem/furo t_u , fluxo hidráulico Q , diâmetro d_e e o diâmetro d_i do furo e a qualidade de canto do lado externo do furo.

Após estes experimentos foi definido um programa de furação "otimizado" (vide **quadro 1**), que juntamente com a vazão "interna" do dielétrico mais adequada ao processo (definida no primeiro grupo de experimentos), foi determinada a condição "otimizada" de usinagem.

Na etapa seguinte foram erodidas 25 peças na condição "otimizada" e 25 peças na condição "não-otimizada", onde será feita uma comparação das duas condições em relação ao fluxo hidráulico, tempo de usinagem/furo, diâmetro d_e e diâmetro d_i furo de injeção e conicidade k .

5- Desenvolvimento experimental

5.1- Ensaios preliminares

Os ensaios preliminares tiveram como objetivo definir os valores do parâmetro tensão nominal do gerador U-I para as sequências de programas "Nr" 2, 3, 4 e 5 (variável "Y") (**quadro 4**) no programa de furação "base". Outras variáveis, cujos valores de trabalho foram definidos, são a condutividade elétrica e a temperatura do dielétrico.

Nr	W	U	I	U-I	T	S	P	Com	Gain	ACO
Seqüência de programa de furação	Percurso Do Eletrodo	Polarida- De do Eletrodo	Corrente De Descarga	Tensão Nominal do Gerador	Tempo de descarga	Capacitância do capacitor	Tempo de pausa entre Descargas	Distância entre eletrodo e peça	Velocidade de posicionamento do eletrodo	Função de monitoramento do processo
[#]	[mm]	[+/-]	[A]	[V]	[µs]	[nF]	[µs]	[%]	[%]	[#]
1	-0,2	+	1	9	1	30	9	10	8	0
2	-1,3	-	1	Y	1	44	9	30	8	65
3	-1,6	-	1	Y	1	44	9	30	8	65
4	-2,2	-	1	Y	1	44	9	30	8	65
5	-2,55	-	1	Y	1	44	9	30	8	65

Quadro 4 – Tensão nominal do gerador (variável "Y") a ser definida nos ensaios preliminares

A definição do valor da variável "Y" foi feita juntamente com o ajuste da condutividade elétrica e temperatura do dielétrico. O valor da tensão nominal do gerador (variável "Y") ficou definida como sendo de 192 V (posição 21) (**quadro 5**), a condutividade elétrica da água (dielétrico) na faixa de 0,23 – 0,26 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e a temperatura do dielétrico em $15 \pm 0,2$ °C. Assim, foi possível realizar a furação sem danificar a parede do furo de injeção através de curto-circuitos e arcos voltaicos. Outra forma para avaliar o bom andamento do processo é o acompanhamento do gráfico da estabilidade do processo no monitor da máquina AGIE QUADRATON 1, que para estes primeiros ajustes mostrou-se satisfatória. A medida "X" (vide **figura 4.5-a**) foi mantida constante em 0,5 mm, conforme descrito no **item 4.10**.

Nr	W	U	I	U-I	T	S	P	Com	Gain	ACO
Sequência de programa de furação	Percurso Do Eletrodo	Polaridade do eletrodo	Corrente De Descarga	Tensão Nominal do Gerador	Tempo de descarga	Capacitância do capacitor	Tempo de pausa entre descargas	Distância entre eletrodo e peça	Velocidade de posicionamento do eletrodo	Função de Monitoramento do processo
[-]	[mm]	[+/-]	[A]	[V]	[μ s]	[nF]	[μ s]	[%]	[%]	[-]
1	-0,2	+	1	9	1	30	9	10	8	0
2	-1,3	-	1	21	1	44	9	30	8	65
3	-1,6	-	1	21	1	44	9	30	8	65
4	-2,2	-	1	21	1	44	9	30	8	65
5	-2,55	-	1	21	1	44	9	30	8	65

Quadro 5 – Valor da tensão nominal do gerador (variável "Y") ajustada nos ensaios preliminares

O valor da vazão "externa" (constante em todos experimentos) utilizada nos experimentos iniciais foi de aproximadamente 2,19 g/s (**figuras 4.5, 4.7 e 4.10**) e o valor da vazão "interna" do dielétrico ficou definida em aproximadamente 0,08 g/s. Este valor, juntamente com a tensão ajustada no gerador de 192 V, favoreceram valores dos diâmetros dos furos de injeção de aproximadamente $0,110 \pm 0,001$ mm (diâmetro d_e) e $0,125 \pm 0,001$ mm (diâmetro d_i) (conforme medição feita em 5 peças com 6 furos de injeção cada uma).

Todos os experimentos foram realizados em uma sala climatizada na empresa Robert Bosch Ltda. com temperatura ambiente na faixa de 22 – 24 ° C e umidade relativa do ar na faixa de 57 – 62 %, de acordo com as especificações do fabricante da máquina AGIE QUADRATON 1.

5.2- Influência da vazão "interna" do dielétrico, número de furos e ângulo axial

5.2.1- Influência da vazão "interna" do dielétrico

Este experimento tem como objetivo verificar a influência da vazão "interna" do dielétrico v_i sobre o diâmetro d_i do furo de injeção. O experimento foi realizado com o parâmetro vazão "interna" do dielétrico testado em 4 níveis de ajustes, com 4 repetições para cada nível, conforme mostra **quadro 6**. Os experimentos foram feitos em uma sequência completamente randomizada.

Vazão "interna" do dielétrico [g/s]	Número de repetições para cada nível de ajuste da vazão "interna" do dielétrico v_i			
0	1	2	3	4
0,04	1	2	3	4
0,08	1	2	3	4
0,11	1	2	3	4

Quadro 6 – Níveis de ajustes da vazão "interna" do dielétrico v_i

5.2.2- Influência do número de furos

Este experimento teve como objetivo verificar a influência do número de furos de injeção n_f no diâmetro d_i do furo. O experimento foi feito com o parâmetro n_f testado em 6 níveis de ajustes (6 furos de injeção), conforme mostra o **quadro 7**, com quatro repetições para cada nível de ajuste, em uma sequência completamente randomizada.

Número de furos de injeção	Número de repetições para cada nível de ajuste do parâmetro números de furos de injeção n_f			
1	1	2	3	4
2	1	2	3	4
3	1	2	3	4
4	1	2	3	4
5	1	2	3	4
6	1	2	3	4

Quadro 7 – Níveis de ajustes do parâmetro número de furos de injeção n_f

5.2.3- Influência do ângulo axial

Neste experimento foi verificada a influência do ângulo axial β do corpo de prova sobre o diâmetro d_e do furo de injeção. O experimento randomizado foi realizado com o parâmetro ângulo axial testado em 4 níveis de ajustes, com 4 repetições para cada combinação, conforme mostra o **quadro 8**.

Ângulo axial do corpo de prova [graus]	Número de repetições para cada nível de ajuste do ângulo axial β do corpo de prova			
	1	2	3	4
60	1	2	3	4
70	1	2	3	4
80	1	2	3	4
90	1	2	3	4

Quadro 8 – Níveis de ajuste do parâmetro ângulo axial β

5.3- Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com")

Neste experimento foi verificada a influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Com") e da fenda de trabalho (parâmetro "Gain"), ou também chamada distância entre eletrodo e peça, sobre o diâmetro d_e e o diâmetro d_i do furo de injeção, sobre o fluxo hidráulico Q e o tempo de usinagem/furo t_u . Os parâmetros do programa de furação hachurados (**quadro 9**) foram mantidos fixos durante o experimento, conforme já mencionado.

Nr	W	U	I	U-I	T	S	P	Com	Gain	ACO
Sequência de programa de furação	Percurso Do Eletrodo	Polaridade do eletrodo	Corrente de Descarga	Tensão Nominal do Gerador	Tempo De Descarga	Capacitância do capacitor	Tempo de Pausa entre Descargas	Distância entre eletrodo e peça	Velocidade de posicionamento do eletrodo	Função de monitoramento do processo
{-}	[mm]	{+/-}	[A]	[V]	[μ s]	[nF]	[μ s]	[%]	[%]	{-}
1	-0,2	+	1	9	1	30	9	10	8	0
2	-1,3	-	1	21	1	44	9	30	8	65
3	-1,6	-	1	21	1	44	9	30	8	65
4	-2,2	-	1	21	1	44	9	30	8	65
5	-2,55	-	1	21	1	44	9	30	8	65

Quadro 9 – Parâmetros do programa de furação mantidos fixos durante o experimento

Para cada sequência de programa de furação "Nr" foram feitos experimentos "fatoriais", com o parâmetro velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Com") e a fenda de trabalho (parâmetro "Gain") combinados em 3 níveis de ajustes, conforme Montgomery [1], como mostram os **quadros 10 e 11**, resultando em um total de 9 combinações com 4 repetições para cada combinação. A distância eletrodo/peça também é chamada de "fenda de trabalho".

Distância eletrodo/peça (parâmetro "Com") [%]	Velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") [%]		
	4	8	12
5	4 repetições	4 repetições	4 repetições
10	4 repetições	4 repetições	4 repetições
15	4 repetições	4 repetições	4 repetições

Quadro 10 – Níveis de ajustes da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de programa de furação "Nr" 1

Distância eletrodo/peça (parâmetro "Com") [%]	Velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") [%]		
	4	8	12
20	4 repetições	4 repetições	4 repetições
30	4 repetições	4 repetições	4 repetições
40	4 repetições	4 repetições	4 repetições

Quadro 11– Níveis de ajustes da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para as seqüências de programas de furação "Nr" 2, 3, 4 e 5

5.4- Ensaios comparativos

Todos os experimentos tiveram o objetivo de verificar quais os parâmetros que são estatisticamente significantes para o processo, bem como os valores onde o parâmetro ou, a combinação dos parâmetros em estudo, provocam uma maior estabilidade do processo, ou um maior ou menor valor da característica que está sendo avaliada e, definir desta forma, quais as condições de usinagem mais adequadas ao processo. Esta verificação será feita através da análise de variância em conjunto com a análise de "resíduos".

Nestes experimentos definiu-se o programa de furação "otimizado", e também a vazão "interna" do dielétrico v_i que é mais adequada para uma peça com seis furos injetores. Após esta etapa foram erodidas 25 peças com 6 furos de injeção, onde mediu-se para cada peça, a média dos diâmetros d_i dos seis furos, a média dos diâmetros d_e dos seis furos, conicidade k média dos 6 furos, o tempo de usinagem/furo t_u e o fluxo hidráulico Q de cada peça e, deste modo, foi feita uma comparação com as 25 peças furadas com os parâmetros "não-otimizados" dos ensaios iniciais (item 5.1). Estas comparações foram feitas através do teste de hipóteses com nível de significância de 5 %, conforme Montgomery [1].

5.5- Procedimento para a medição do diâmetro d_e e diâmetro d_i do furo de injeção

Para assegurar melhor confiabilidade à medição dos diâmetros dos furos de injeção, as peças foram primeiramente lavadas em uma lavadora (máquina Silberhorn) a uma temperatura de 100 °C e pressão de 6 bar com um desengraxante alcalino. As peças, após este processo, devem estar livres de sujeiras e pequenas rebarbas para proporcionar uma boa visualização no processo de medição.

O maior dificuldade no processo de medição dos furos de injeção de diâmetros abaixo de 0,13 mm é o diâmetro d_i do furo de injeção, onde a focalização correta do diâmetro se torna difícil e, deste modo, a medição depende muito da experiência do operador.

Para avaliação da metodologia de medição do diâmetro d_i e do diâmetro d_e do furo de injeção, foi calculado o índice de repetibilidade do meio de medição (C_{gm}), que para esta avaliação apresentou valores de $C_{gm}=0,76$ e de $C_{gm}=5$ para diâmetro d_i e diâmetro d_e , respectivamente. Este índice deve apresentar um valor acima de 1,33. Para dar maior confiabilidade aos resultados de medição, cada peça (com 6 furos injetores) foi medida 3 vezes, onde o resultado da medição foi definido como o valor médio das 3 leituras.

O método utilizado para a medição do diâmetro d_e do furo foi o modo de medição "automático" e para o diâmetro d_i do furo, o modo de medição por "círculo de valores" [36]. Para evitar ainda maiores incertezas das medições, todas as medições foram realizadas com o mesmo operador. O princípio de medição do diâmetro do furo de injeção é o princípio óptico, onde uma fonte de luz (que passa através de uma fibra de vidro) com uma determinada luminosidade, passa através do furo de injeção, permitindo uma visualização do diâmetro d_e e do diâmetro d_i do furo. A intensidade desta luminosidade afeta o processo de medição. Assim, para todas as medições foram mantidos constantes a luminosidade para o diâmetro d_e e para o d_i do furo. Os valores de luminosidade utilizados foram de 46 e 70 % para o diâmetro d_e e para o diâmetro d_i do furo, respectivamente [36].

5.6- Procedimento para a medição do tempo de usinagem/furo

A máquina AGIE QUADRATON 1 está equipada com um cronômetro que mede o tempo de ciclo de usinagem, o qual fornece o tempo total do ciclo de usinagem da peça. O contador de tempo inicia quando o cabeçote de erosão se move a partir do ponto de referência "zero" em direção à peça e termina quando o cabeçote de erosão retorna novamente ao seu ponto de referência "zero". O tempo de usinagem/furo considerado neste trabalho é o ciclo total de usinagem dividido pelo número de furos (6 furos de injeção). O tempo de usinagem/furo inclui desta forma, os tempos "secundários", ou também chamados tempos "mortos", resultantes do movimento em vazio (quando não há erosão) do cabeçote de erosão.

5.7- Procedimento para a determinação do fluxo hidráulico

A medição do fluxo hidráulico é feita pela medição da passagem do volume de óleo na unidade de tempo ($\text{cm}^3/30 \text{ s}$) através dos furos de injeção. Para assegurar uma melhor confiabilidade aos resultados de medição, o fluxo hidráulico foi medido 3 vezes para cada peça, onde o valor final da medição foi o valor médio das 3 leituras.

O óleo utilizado no processo de medição apresenta uma densidade a $15 \text{ }^\circ\text{C}$ (estado de fornecimento) de $0,825 \pm 0,005 \text{ g/cm}^3$. O processo de medição foi realizado com uma pressão do óleo de $100 \pm 0,5 \text{ bar}$ e temperatura de $38 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.5- Avaliação da qualidade de canto

Uma peça eletroerodida deve apresentar uma boa qualidade de canto no diâmetro d_e do furo, isto é, apresentar um mínimo de arrancamento de material no contorno do furo, como também evitar a "expulsão" de material (**figura 5.1**) no canto do furo de injeção.

A borda de um furo feito por eletroerosão por faíscas deve-se apresentar de forma regular, porém, disfunções podem levar a uma "expulsão" de material líquido

no contorno do furo. Esta disfunção é mostrada na **figura 5.1**. Esta avaliação da qualidade de contorno deve ser feita visualmente através do microscópio. Este critério de avaliação depende da experiência prática no processo de furação por eletroerosão.

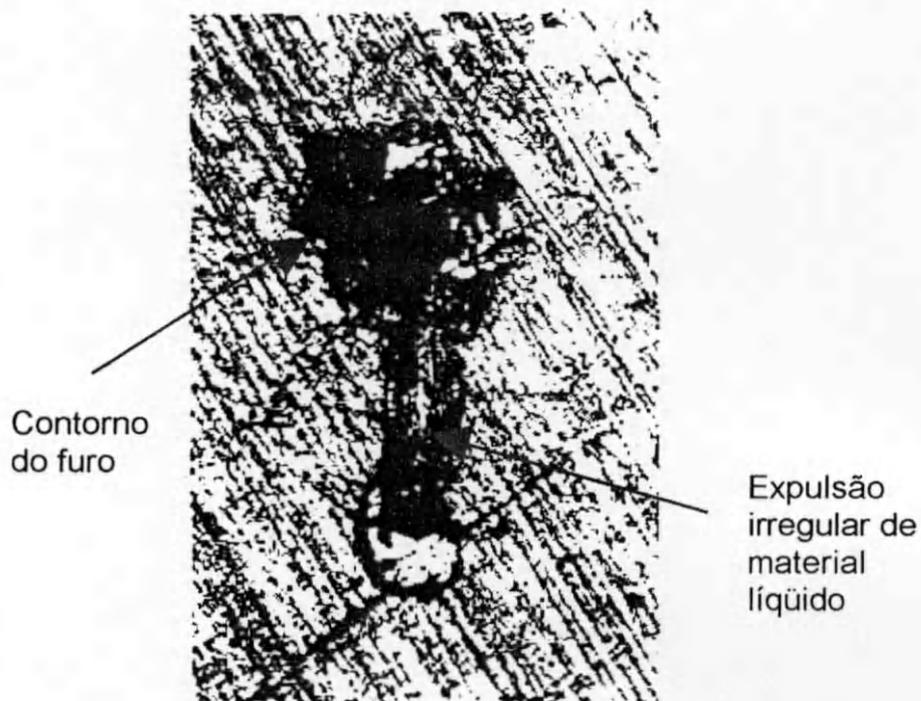


Figura 5.1 - Contorno do furo e a "expulsão" de material no contorno do furo

6- Análise dos resultados

6.1- Generalidades

Os resultados apresentados neste tópico mostram o comportamento dos parâmetros em estudo para as características do furo de injeção que estão sendo analisadas e, assim, são definidas as condições de usinagem otimizadas no processo de furação por eletroerosão de furos de injeção. Para isto, a influência dos parâmetros no processo (se a variação do parâmetro em estudo foi significativa para o processo, e se há ou não interações entre os parâmetros) foi determinada através da análise de variância, conforme Montgomery [1], com nível de significância de 5 %. A análise dos resultados é complementada através da análise de "residual", conforme Montgomery [1], onde é verificado qual o valor do parâmetro ou combinação dos parâmetros em estudo que minimiza a dispersão de valores da característica que está sendo avaliada. Outra metodologia a ser empregada na análise dos resultados é o método de Duncan's, citado por Montgomery [1], através do qual são comparados estatisticamente (também para um nível de significância de 5 %) os valores das médias plotadas nos gráficos, verificando se estes valores são iguais ou diferentes entre si. Os valores médios plotados nos gráficos serão apresentados com a dispersão da medição $Dm_{95\%}$ máxima para o campo de trabalho em estudo. Para o cálculo da $Dm_{95\%}$ foi utilizado o coeficiente de "Student" t igual a 3,2 (valor utilizado para 4 repetições)

As características do furo de injeção otimizadas foram avaliadas na seguinte ordem de prioridade e, deste modo, será determinado o valor ótimo dos parâmetros em estudo:

- 1) Fluxo hidráulico Q** → será determinado e escolhido a combinação dos parâmetros em estudo onde o fluxo hidráulico apresenta a menor variação, ou seja, menores desvios padrões;
- 2) Diâmetro d_e e diâmetro d_i do furo de injeção** → será determinada a combinação dos parâmetros em estudo, onde os valores do diâmetro d_e e diâmetro d_i do furo injetor favorecem um menor valor de conicidade k do

furo de injeção, ou seja, um maior valor do diâmetro d_e e um menor valor do diâmetro d_i do furo. No diâmetro d_e também será verificado, através de uma análise qualitativa, a qualidade de canto, em relação a formação da "expulsão" de material líquido no contorno do furo, conforme já mencionado no **item 5.5**;

- 3) Tempo de usinagem/furo t_u** → será determinado a combinação de parâmetros onde é reduzido o tempo de usinagem/furo.

6.2- Influência da vazão "interna" do dielétrico, número de furos e ângulo axial

6.2.1- Influência da vazão "interna" do dielétrico

Ao lado dos parâmetros elétricos, as condições de lavagem também influenciam o processo de erosão, onde existe uma dependência entre precisão de forma e vazão do dielétrico. Em geral, pode ser verificado uma melhoria da remoção de material da peça quando se trabalha com pequenas vazões do dielétrico na fenda de trabalho. Contudo, existe um limite inferior, pois, para valores de vazões que tendem a zero, o processo deixa de funcionar, uma vez que os produtos de erosão não são mais removidos da fenda de trabalho. Por outro lado, altas vazões do dielétrico, podem provocar um aumento do tempo de retardo de ignição e levar a pulsos em vazio [4, 7, 10].

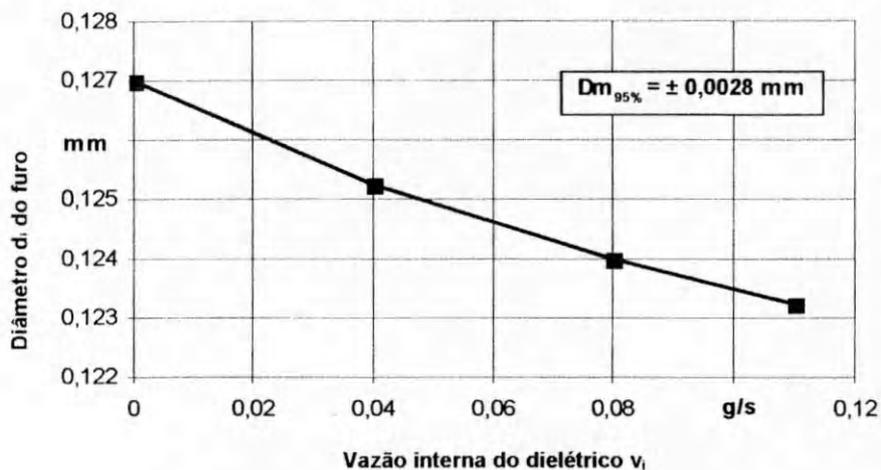
Além disto, a vazão do dielétrico na fenda de trabalho tem uma influência tanto nos fenômenos físicos como na remoção dos produtos de erosão, conforme já mencionado. No caso de vazão do dielétrico baixa, a fenda de trabalho fica saturada rapidamente por partículas de remoção, e as descargas elétricas ocorrerão sobre estas partículas, refundindo as mesmas e dificultando a formação do "canal de descarga" [43].

Além da remoção das partículas de erosão pelo fluxo do dielétrico, remove-se também os gases, mantendo-se estável o grau de contaminação do meio. Assim, estabiliza-se a temperatura do dielétrico, melhorando estabilização do processo [43].

No gráfico da **figura 6.1** verifica-se que a variação da vazão "interna" do dielétrico v_i tem forte influência sobre o diâmetro d_i do furo de injeção. O gráfico mostra que quanto maior o valor da vazão "interna", menores são os valores do diâmetro d_i do furo de injeção.

O processo de furação é realizado com vazão "externa" do dielétrico v_e (que para estes experimentos é constante e aproximadamente de 2,19 g/s) e com vazão "interna" do dielétrico v_i (vide **figuras 4.5, 4.7 e 4.10**). Durante a fase inicial de penetração do eletrodo na peça, a lavagem é feita apenas pelo dielétrico alimentado externamente. No instante da perfuração da peça, o dielétrico, alimentado internamente pela peça, começa a efetuar o trabalho de lavagem, evitando que partículas removidas possam obstruir o furo incipiente, pelo fluxo do dielétrico contrário ao fluxo da vazão "externa" do dielétrico. Assim, são melhoradas as condições da fenda de trabalho pela remoção dos produtos de erosão. A não utilização da vazão "interna" do dielétrico aumenta o tempo de remoção e leva a um aumento do diâmetro d_i do furo. [6, 7]. Valores da vazão "interna" do dielétrico mais elevados levam a menores valores do diâmetro d_i do furo. Isto pode ser explicado pelo fato de que os produtos de remoção são mais facilmente removidos da fenda de trabalho, implicando em uma maior resistência à "ruptura" do dielétrico e, por sua vez, menores fendas de trabalho. Como consequência, menores valores dos diâmetros d_i dos furos de injeção.

Existe, porém, limites tecnológicos para elevados valores da vazão "interna" do dielétrico. Para valores de vazões muito elevados (acima de 0,11 g/s), verifica-se maiores instabilidades de forma nos diâmetros d_i . Isto pode ser explicado que devido ao eletrodo apresentar um diâmetro muito pequeno e a profundidade de penetração ser grande, valores elevados de vazões "interna" podem ocasionar vibrações excessivas do eletrodo, podendo ocasionar uma "ovalização" do diâmetro d_i . Além disto, valores de vazões muito elevados podem dificultar a formação do "canal de descarga", implicando em baixas taxas de remoção e, com isto, menores diâmetros d_i do furo de injeção, com baixa precisão de forma do furo [6, 7].



Parâmetros do Processo de Erosão

- Programa de furação base (quadro 5)
- Material da peça - 18 Cr Ni 8
- Eletrodo - tungstênio (diâmetro 0,085 mm)
- Dielétrico - água deionizada
- Condutividade do dielétrico = 0,23 – 0,26 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Temperatura do dielétrico = 15,1 – 15,2 $^{\circ}\text{C}$
- Vazão "interna" do dielétrico = 0/0,04/0,08/0,11 g/s
- Medida $X = 0,5$ mm

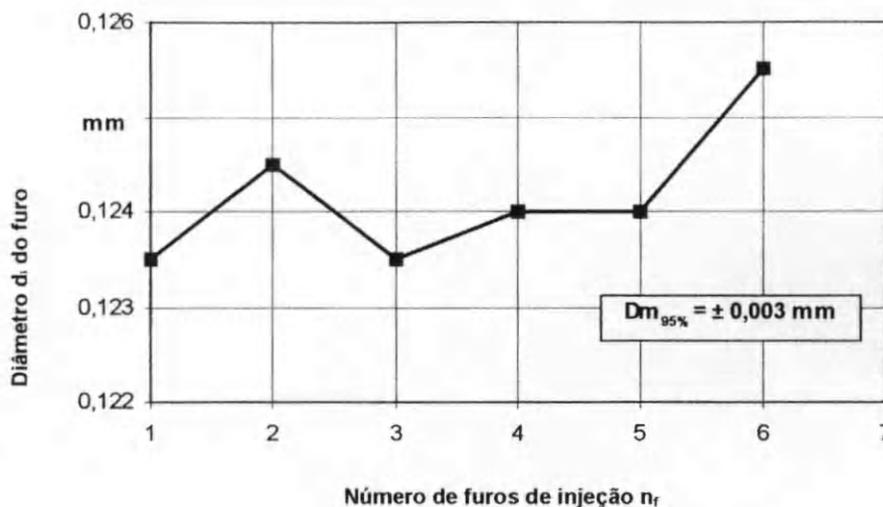
Figura 6.1 - Influência da vazão "interna" v_i do dielétrico sobre o diâmetro d_i do furo de injeção

Através da análise de "resíduos" definiu-se o valor de vazão "interna" do dielétrico que favoreceu uma menor dispersão dos valores do diâmetro d_i , onde o valor vazão de 0,08 g/s obteve o melhor resultado. Este valor também favoreceu menores valores do diâmetro d_i do furo de injeção. O valor de 0,08 g/s é definido como sendo o valor "ótimo" deste experimento.

6.2.2- Influência do números de furos de injeção

Este experimento teve como objetivo verificar a influência do números de furos do bico injetor n_f sobre o diâmetro d_i do furo de injeção. Conforme o experimento do **item 6.2.3**, houve um aumento do diâmetro d_i com a diminuição da vazão "interna" do dielétrico. Tendo como base esta condição, teoricamente, para um determinado valor constante de vazão "interna" do dielétrico e, aumentando-se o

números de furos, deveria haver teoricamente um aumento do diâmetro d_i do furo de injeção, devido a uma diminuição do volume do dielétrico por furo de injeção no momento da erosão. Porém, os resultados não mostraram nenhuma tendência de aumento do diâmetro d_i com o aumento do número de furos na usinagem com eletrodos de tungstênio de 0,085 mm de diâmetro (**figura 6.2**)

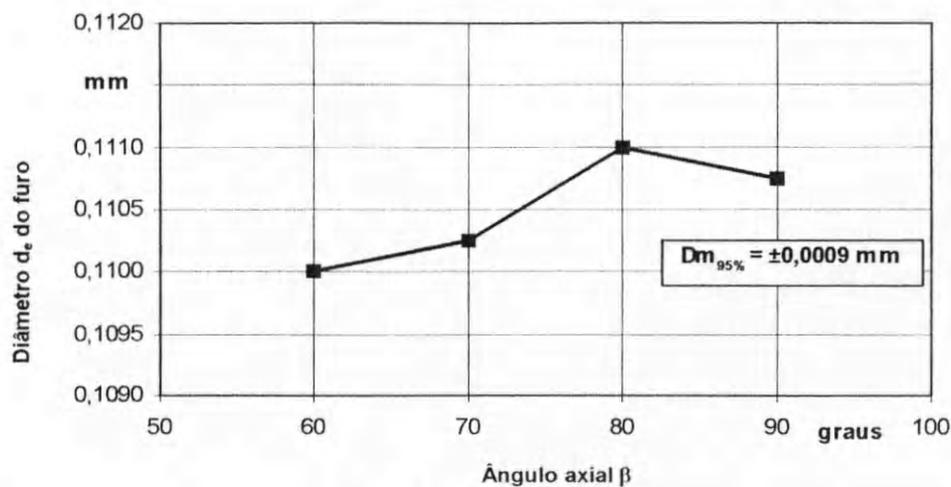


Parâmetros do Processo de Erosão	
• Programa de furação base (quadro 5)	• Condutividade do dielétrico= 0,23 – 0,26 $\mu\text{S/cm}$
• Material da peça - 18 Cr Ni 8	• Temperatura do dielétrico= 15,1 – 15,2 $^{\circ}\text{C}$
• Eletrodo – tungstênio (diâmetro 0,085 mm)	• Número de furos de injeção= 1/2/3/4/5/6 Furos
• Dielétrico – água deionizada	• Medida X= 0,5 mm

Figura 6.2 - Influência do número de furos de injeção n_r sobre o diâmetro d_i do furo de injeção

6.2.3- Influência do ângulo axial no diâmetro d_e do furo de injeção

Nos experimentos realizados, a influência do ângulo axial dentro do intervalo testado de 60 a 90 graus mostrou, através da análise de variância, não ter influência significativa sobre o valor do diâmetro d_e do furo de injeção (**figura 6.3**).



Parâmetros do Processo de Erosão	
• Programa de furação base (quadro 5)	• Condutividade do dielétrico= 0,23 – 0,26 $\mu\text{S/cm}$
• Material da peça - 18 Cr Ni 8	• Temperatura do dielétrico= 15,1 – 15,2 $^{\circ}\text{C}$
• Eletrodo – tungstênio (diâmetro 0,085 mm)	• Ângulo axial β = 60/70/80/90 graus
• Dielétrico – água deionizada	• Medida $X=0,5$ mm

Figura 6.3 - Influência do ângulo axial β sobre o diâmetro d_e do furo de injeção

6.3- Influência da fenda de trabalho e da regulagem de posicionamento do eletrodo

Para garantir uma boa estabilidade do processo de eletroerosão, deve-se garantir que na fenda de trabalho tenha-se condições otimizadas que evitem o surgimento de curto-circuitos, descargas-falhas e pulsos em vazio. As condições da fenda de trabalho variam a cada descarga elétrica por mudanças das propriedades do dielétrico, como, condutividade térmica, turvamento, temperatura, etc, bem como pela remoção de material. Assim, as máquinas de eletroerosão devem ser dotadas de um controle de avanço adequado que reposicione o eletrodo de acordo com a remoção do material da peça e do eletrodo e, também, as condições da fenda de trabalho, de forma que curto-circuitos, descargas-falhas e pulsos em vazio sejam minimizados [4, 6, 7, 10].

Com boas condições na fenda de trabalho e, diminuindo-se o valor da mesma, aumenta-se a taxa remoção V_w , diminui-se o tempo de usinagem e, também, diminui-se o desgaste do eletrodo, o que acarreta em melhores precisões de forma do eletrodo na peça [6, 7].

Conforme já mencionado anteriormente, as máquinas de eletroerosão devem ser equipadas com um sistema de posicionamento do eletrodo (controlador "P"). Por motivo de uma perturbação na fenda de trabalho, acarreta um desvio entre o valor da tensão nominal desejada e o valor real da tensão, então o controlador "P" reposiciona o eletrodo de forma a reduzir ou eliminar este desvio [12].

Em dependência da regulagem do ganho (velocidade) do controlador "P" acontece o reposicionamento do eletrodo mais ou menos rápido. Por um lado, deseja-se eliminar as perturbações o mais rápido possível, por outro, pode ser provocada uma instabilização no processo devido a uma vibração excessiva do cabeçote de erosão através de um movimento de posicionamento rápido do eletrodo. Pode até mesmo acontecer que o eletrodo colida com a peça, o que causaria um dano tanto no eletrodo como na peça [12].

Experimentos mostraram que a velocidade de posicionamento do eletrodo tem uma influência sobre a taxa de remoção V_w e no desgaste relativo ϑ . Nestes experimentos mostrou-se que com velocidades de posicionamento do eletrodo elevadas a taxa de remoção aumenta, inicialmente, e diminui para velocidades de posicionamento mais elevadas, enquanto que o desgaste relativo aumenta com o aumento da velocidade de posicionamento (**figura 6.4**).

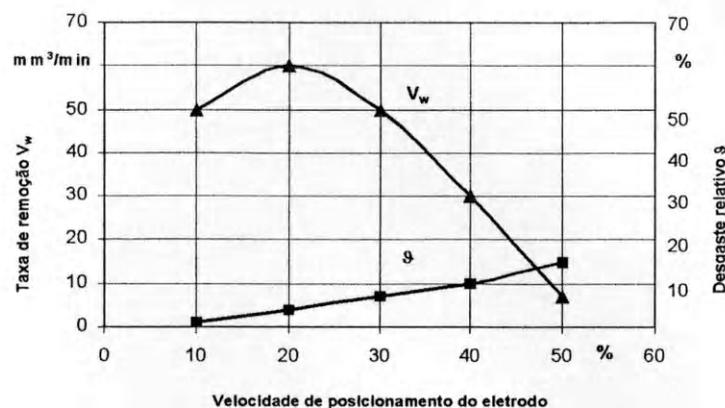
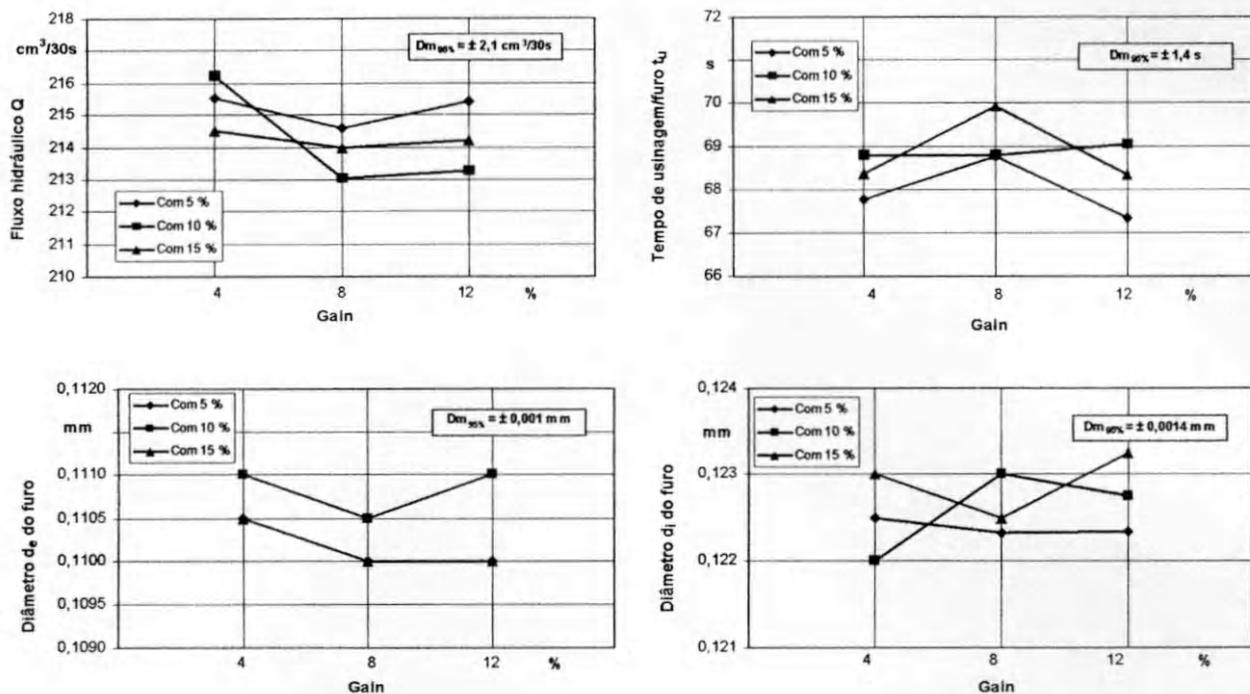


Figura 6.4 - Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo sobre a taxa de remoção V_w e sobre o desgaste relativo ϑ [12]

6.3.1- Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de furação "Nr" 1

Nos gráficos da **figura 6.5** são mostrados os resultados obtidos para a sequência de programa de furação "Nr" 1. O eletrodo penetra até uma profundidade de -0,2 mm com uma polaridade positiva e a peça polarizada negativamente. Neste caso a usinagem é dita negativa, pois a remoção ocorre predominantemente no eletrodo. Para este experimento a velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") foi testada nas posições 4, 8 e 12 % e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") testada nas posições 5, 10 e 15 %



Parâmetros do Processo de Erosão (Sequência de programa "Nr" 1)

- Programa de furação base (quadro 5)
- Material da peça - 18 Cr Ni 8
- Eletrodo - tungstênio (diâmetro 0,085 mm)
- Dielétrico - água deionizada
- Condutividade do dielétrico= 0,23 – 0,26 $\mu\text{S/cm}$
- Temperatura do dielétrico= 15,1 – 15,2 °C
- Com 5,10 e 15 %/Gain 4, 8 e 12 % (para "Nr" 1)
- Medida X= 0,5 mm

Figura 6.5 - Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de programa "Nr" 1

Da análise de variância pode-se concluir que o efeito das variações da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") não têm influência sobre fluxo hidráulico Q , tempo de usinagem/furo t_u , sobre o diâmetro d_e e o diâmetro d_i do furo de injeção. Porém, os resultados plotados no gráfico são altamente confiáveis devido à pequena dispersão de medição resultante dos experimentos. Os valores dos gráficos da **figura 6.5** ficam dentro da faixa de aproximadamente $\pm 1\%$ do valor médio plotado.

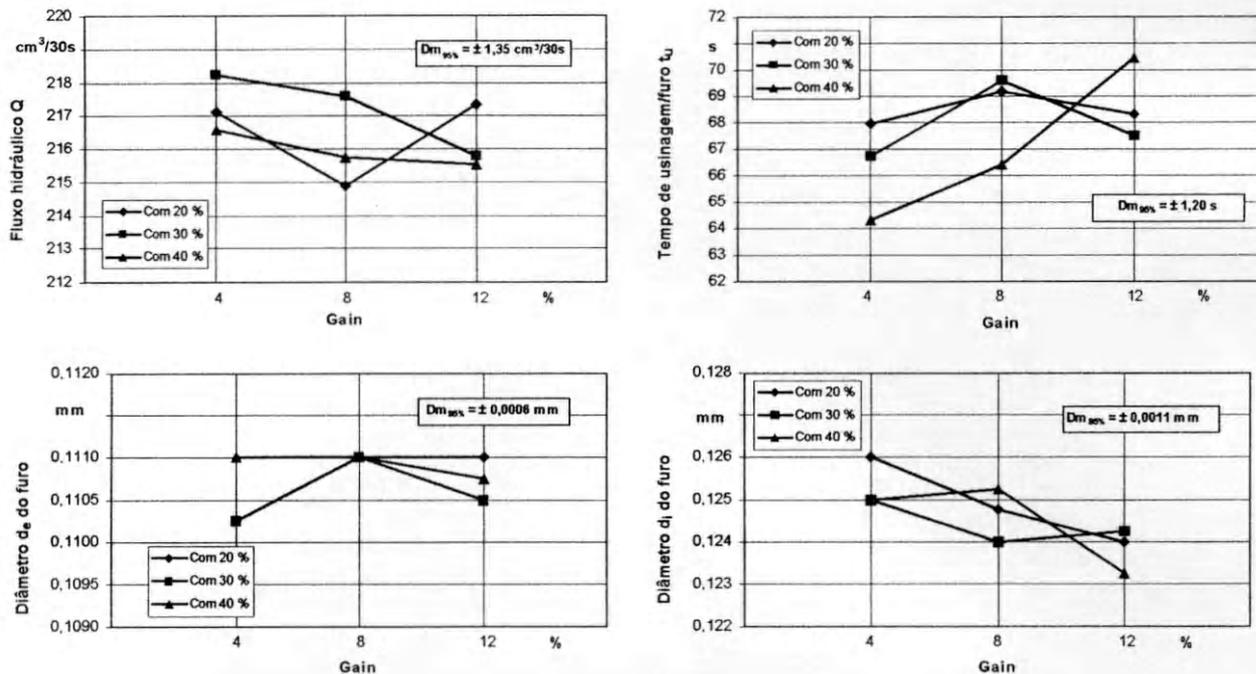
Do gráfico do diâmetro d_e pode-se verificar uma leve tendência a um aumento do diâmetro d_e com a velocidade de posicionamento do eletrodo regulada na posição 12 % e a fenda de trabalho na posição 10 %, o que é desejado para o furo de injeção. Além disso, esta combinação de parâmetros mostrou bons resultados em experimentos já realizados, tanto para eletrodo de tungstênio, como para eletrodo de prata no diâmetro d_e do furo de injeção.

Para este experimento é de grande importância que o eletrodo esteja polarizado positivamente para eliminar as irregularidades da sua "ponta" e, com isto, melhorar a precisão de forma do furo de injeção [16]. Outra vantagem do eletrodo estar polarizado positivamente no início da erosão é diminuir a probabilidade de ocorrência da "expulsão" de material no contorno do furo, que pode ser provocada por disfunções no processo de erosão. Como a descarga do gerador de relaxação é oscilante, (vide **figura 3.6**), e quando o eletrodo está polarizado positivamente, é normalmente utilizado também a parte negativa da descarga. Isto para se obter um melhor aproveitamento da descarga elétrica na remoção das irregularidades da "ponta" do eletrodo e melhorar a precisão de forma do diâmetro d_e do furo.

Para a sequência de programa "Nr" 1 é utilizado um valor de capacitância do capacitor de 2,7 nF (posição 30) (**quadro 5**) "sem diodo", desta forma, a frequência da descarga elétrica é aumentada. Elevadas frequências de descargas são importantes quando se deseja remover as irregularidades da "ponta" do eletrodo, pois o material do eletrodo apresenta, em geral, um elevado ponto de fusão. As descargas com altas frequências permitem uma fusão mais rápida do material do eletrodo [6, 7]. Baixos valores de capacitância e, com isto, baixas frequências de descarga, implicariam na possibilidade de não remover totalmente as irregularidades da "ponta" do eletrodo.

6.3.2- Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de furação "Nr" 2

No gráfico da **figura 6.6** são mostrados os resultados obtidos para a sequência de programa de furação "Nr" 2. O eletrodo penetra a partir de uma profundidade de -0,2 mm até -1,3 mm com uma polaridade negativa. Neste caso a usinagem é dita positiva, pois a remoção ocorre predominantemente na peça. Para este experimento a velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") foi testada nas posições 4, 8 e 12 %, e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") testada nas posições 20, 30 e 40 %



Parâmetros do Processo de Erosão (Sequência de programa "Nr" 2)	
• Programa de furação base (quadro 5)	• Condutividade do dielétrico= 0,23 – 0,26 $\mu\text{S}/\text{cm}$
• Material da peça - 18 Cr Ni 8	• Temperatura do dielétrico= 15,1 – 15,2 °C
• Eletrodo – tungstênio (diâmetro 0,085 mm)	• Com 20,30 e 40 %/Gain 4, 8 e 12 % (para "Nr" 2)
• Dielétrico – água deionizada	• Medida X= 0,5 mm

Figura 6.6 - Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de programa "Nr" 2

Análise dos resultados dos gráficos da **figura 6.6**:

- **Fluxo hidráulico Q** – Da análise de variância conclui-se que há uma influência significativa entre velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") sobre o fluxo hidráulico Q. Para a fenda de trabalho regulada na posição **20 %**, somente uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo para a posição 8 %, implica em uma diminuição significativa do fluxo hidráulico Q, os valores do fluxo hidráulico são iguais para as posições 4 e 12 %. Para a fenda de trabalho regulada na posição **30 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 12 % e da posição 8 para a posição 12 % provoca uma diminuição do fluxo hidráulico Q. Os valores do fluxo hidráulico são iguais para as posições 4 e 8 %. Para a fenda de trabalho regulada na posição **40 %**, uma variação da velocidade não implica em nenhuma variação do fluxo hidráulico Q.

De uma forma geral o gráfico não mostra nenhuma tendência definida para os parâmetros em estudo, porém, os valores plotados no gráfico são muito confiáveis devido à baixa dispersão da medição dos resultados. Como para o fluxo hidráulico se deseja definir a combinação de parâmetros onde há uma menor dispersão do fluxo hidráulico Q, a combinação dos parâmetros, fenda de trabalho na posição **20 %** e velocidade de posicionamento do eletrodo na posição **4 %**, para este experimento, favoreceu o melhor resultado;

- **Diâmetro d_i do furo de injeção** - Da análise de variância conclui-se que há uma influência significativa entre velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") sobre o diâmetro d_i do furo. Para a fenda de trabalho regulada na posição **20 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 8 % e da posição 4 % para a posição 12 % provoca uma diminuição do diâmetro d_i . Os valores do diâmetro d_i são iguais para as posições 8 e 12 %. Para a fenda de trabalho regulada na posição **30 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo não provoca

nenhuma variação do diâmetro d_i . Para a fenda de trabalho regulada na posição **40 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 12 % e da posição 8 % para a posição 12 % diminui o valor do diâmetro d_i . Os valores do diâmetro d_i são iguais para as posições 4 e 8 %.

De uma forma geral, o gráfico não mostra nenhuma tendência clara do comportamento dos parâmetros em estudo sobre o diâmetro d_i . Porém, os resultados plotados na gráfico são muito confiáveis devido à baixa dispersão da medição encontrada. Como para o diâmetro d_i se deseja valores baixos, a combinação dos parâmetros, fenda de trabalho na posição **40 %** e velocidade de posicionamento do eletrodo na posição **12 %**, propicia os menores valores do diâmetro d_i ;

- **Tempo de usinagem/furo t_u** - Da análise de variância conclui-se que há uma influência significativa entre velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") sobre o tempo de usinagem/furo t_u . Para a fenda de trabalho regulada na posição **20 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 8 % implica em um aumento do tempo de usinagem/furo t_u . Os valores do tempo de usinagem/furo são iguais para as posições 4 e 12 % e para as posições 8 e 12 %. Para a fenda de trabalho regulada na posição **30 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4% para a posição 8 % implica em um aumento do tempo de usinagem/furo t_u e da posição 8 % para a posição 12% provoca uma diminuição do tempo de usinagem/furo t_u . Os valores do tempo de usinagem/furo são iguais para as posições 4 % e 12 %. Para a fenda de trabalho regulada em **40 %**, há um aumento do tempo de usinagem t_u com o aumento da velocidade de posicionamento do eletrodo.

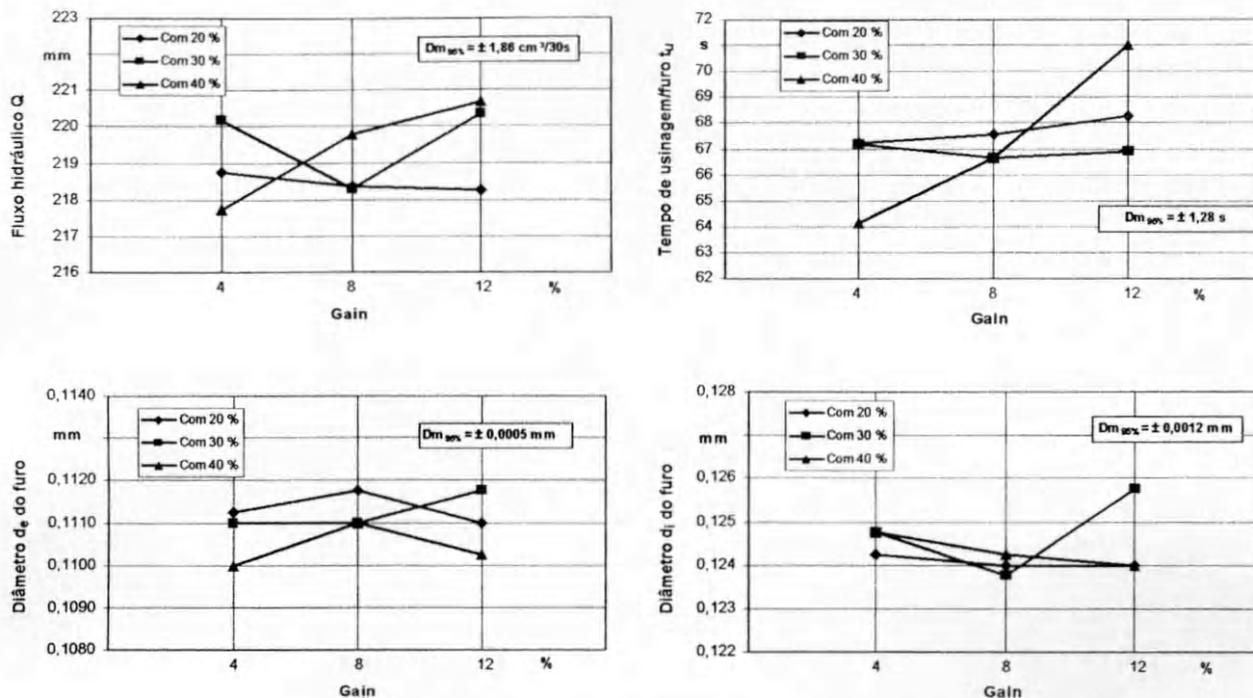
Do gráfico pode ser visualizado que não há uma tendência clara para o comportamento dos parâmetros em estudo sobre o tempo de usinagem/furo, porém os resultados mostram que devido à baixa dispersão de medição encontrada, os resultados apresentam uma alta confiabilidade.

Como valor otimizado para o processo onde se deseja minimizar o tempo de usinagem/furo, a combinação dos parâmetros, fenda de trabalho na posição **40 %** e velocidade de posicionamento do eletrodo na posição **4 %**, minimiza o tempo de usinagem/furo;

- **Diâmetro d_e do furo de injeção** – Da análise de variância indica que não há uma influência significativa dos parâmetros velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") no diâmetro d_e do furo de injeção.

6.3.3- Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de furação "Nr" 3

Nos gráficos da **figura 6.7** são mostrados os resultados obtidos para a sequência de programa "Nr" 3. O eletrodo penetra a partir de uma profundidade de – 1,3 mm até –1,6 mm com uma polaridade negativa. Para este experimento a velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") foi testada nas posições 4, 8 e 12 %, e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") testada nas posições 20, 30 e 40 %



Parâmetros do Processo de Erosão (Sequência de programa "Nr" 3)

- Programa de furação base (quadro 5)
- Material da peça - 18 Cr Ni 8
- Eletrodo - tungstênio (diâmetro 0,085 mm)
- Dielétrico - água deionizada
- Condutividade do dielétrico = 0,23 – 0,26 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Temperatura do dielétrico = 15,1 – 15,2 °C
- Com 20,30 e 40 %/Gain 4, 8 e 12 % (para "Nr" 3)
- Medida X = 0,5 mm

Figura 6.7 - Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de programa "Nr" 3

Análise dos resultados dos gráficos da **figura 6.7**:

□ **Fluxo hidráulico Q** – Da análise de variância conclui-se que há uma influência significativa entre velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") sobre o fluxo hidráulico Q. Para a fenda de trabalho regulada em **20 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo não implica em uma variação do fluxo hidráulico Q. Para a fenda de trabalho regulada em **30 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 8 % provoca uma diminuição do fluxo hidráulico Q e uma

variação da posição 8 % para a posição 12 % provoca um aumento do fluxo hidráulico Q . Os valores do fluxo hidráulico são iguais para as posições 4 e 12 %. Para a fenda de trabalho regulada na posição **40 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 8% e da posição 4 % para posição 12 % implica em um aumento do fluxo hidráulico Q . Os valores do fluxo hidráulico são iguais para as posições 8 e 12 %.

De uma forma geral o gráfico não mostra nenhuma tendência definida para os parâmetros em estudo sobre o fluxo hidráulico Q , porém, os valores plotados no gráfico são muito confiáveis devido à baixa dispersão da medição dos resultados. Como para o fluxo hidráulico se deseja definir a combinação dos parâmetros onde há uma menor dispersão do fluxo hidráulico Q , a combinação dos parâmetros, fenda de trabalho na posição **30 %** e velocidade de posicionamento do eletrodo na posição **4 %**, favoreceu o melhor resultado;

- **Diâmetro d_i do furo de injeção** - Da análise de variância conclui-se que há uma influência significativa entre velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") sobre o diâmetro d_i do furo de injeção. Para a fenda de trabalho regulada na posição **20 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo não implica em uma variação do diâmetro d_i . Para a fenda de trabalho regulada na posição **30 %**, um variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 12 % e da posição 8 % para a posição 12 % implica em um aumento do diâmetro d_i . Os valores do diâmetro d_i são iguais para as posições 4 e 8 %. Para a fenda de trabalho regulada na posição **40 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo não implica em uma variação do diâmetro d_i .

O gráfico mostra de uma forma geral que não há nenhuma tendência clara do comportamento dos parâmetros em estudo sobre o diâmetro d_i . Porém, os resultados plotados no gráfico são muito confiáveis devido à baixa dispersão da medição encontrada. Como para o diâmetro d_i se

deseja valores baixos, a combinação dos parâmetros, fenda de trabalho na posição **30 %** e velocidade de posicionamento do eletrodo na posição **4 %**, propicia os menores valores do diâmetro d_i ;

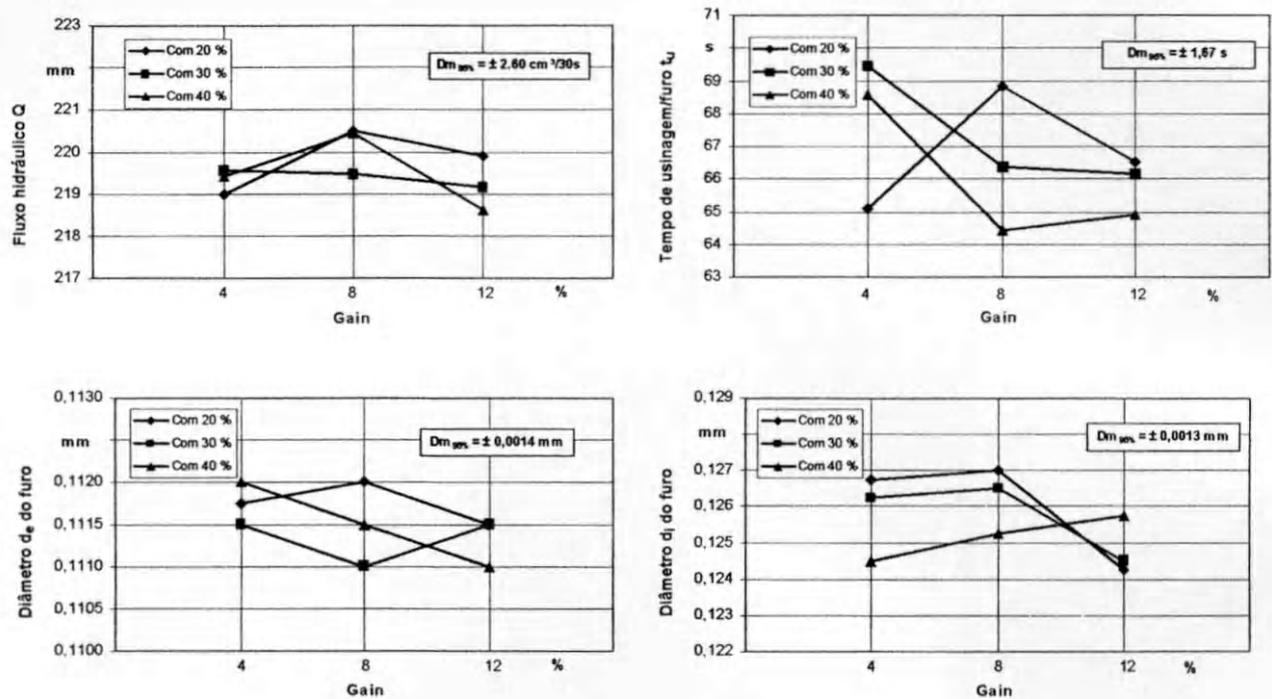
- **Tempo de usinagem/furo t_u** - Da análise de variância conclui-se que há uma interação significativa entre velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") no tempo de usinagem/furo t_u . Para a fenda de trabalho nas posições **20 % e 30 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo não implica em uma variação do tempo de usinagem/furo t_u . Para a fenda de trabalho na posição **40 %**, há um aumento do tempo de usinagem/furo t_u com o aumento da velocidade de posicionamento do eletrodo.

Do gráfico pode ser visualizado que não há uma tendência clara do comportamento dos parâmetros em estudo no tempo de usinagem/furo, porém, os resultados mostram uma alta confiabilidade devido à baixa dispersão de medição encontrada. Como valor otimizado para o processo onde se deseja minimizar o tempo de usinagem/furo, a combinação dos parâmetros, fenda de trabalho na posição **40 %** e velocidade de posicionamento do eletrodo na posição **4 %**, minimiza o tempo de usinagem/furo;

- **Diâmetro d_e do furo de injeção** – Da análise de variância verifica-se que não há uma influência significativa entre os parâmetros velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") no diâmetro d_e .

6.3.4- Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de furação "Nr" 4

Nos gráficos da **figura 6.8** são mostrados os resultados obtidos para a sequência de programa "Nr" 4. O eletrodo penetra a partir de uma profundidade de -1,6 mm até -2,2 mm com uma polaridade negativa. Para este experimento a velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") foi testada nas posições 4, 8 e 12 %, e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") testada nas posições 20, 30 e 40 %.



Parâmetros do Processo de Erosão (Sequência de programa "Nr" 4)	
• Programa de furação base (quadro 5)	• Condutividade do dielétrico= 0,23 – 0,26 $\mu\text{S}/\text{cm}$
• Material da peça - 18 Cr Ni 8	• Temperatura do dielétrico= 15,1 – 15,2 °C
• Eletrodo – tungstênio (diâmetro 0,085 mm)	• Com 20,30 e 40 %/Gain 4, 8 e 12 % (para "Nr" 4)
• Dielétrico – água deionizada	• Medida X= 0,5 mm

Figura 6.8 - Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de programa "Nr" 4

Análise dos resultados dos gráficos da **figura 6.8**:

- **Fluxo hidráulico Q** – Da análise de variância conclui-se que há uma influência significativa entre velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") no fluxo hidráulico Q. Para a fenda de trabalho regulada na posição **20 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 8 % aumenta o valor do fluxo hidráulico Q e uma variação da posição 8 % para a posição 12 % implica em uma diminuição do fluxo hidráulico Q. Os valores do fluxo hidráulico são iguais para as posições 4 e 12 %. Para a fenda de trabalho regulada na posição **30 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo não implica em uma variação do fluxo hidráulico Q. Para a fenda de trabalho regulada na posição **40 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 8 % para a posição 12 % provoca uma diminuição do fluxo hidráulico Q. Os valores do fluxo hidráulico são iguais para as posições 4 e 12 % e 4 e 8 %.

De uma forma geral o gráfico não mostra nenhuma tendência definida para os parâmetros em estudo sobre o fluxo hidráulico Q, porém, os valores plotados no gráfico são muito confiáveis devido à baixa dispersão da medição dos resultados. Como para o fluxo hidráulico se deseja definir a combinação de parâmetros onde há uma menor dispersão do fluxo hidráulico Q, a combinação de parâmetros, fenda de trabalho na posição **30 %** e velocidade de posicionamento do eletrodo na posição **4 %**, favoreceu o melhor resultado;

- **Diâmetro d_i do furo de injeção** - Da análise de variância conclui-se que há uma influência significativa entre velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") sobre o diâmetro d_i do furo de injeção. Para a fenda de trabalho regulada nas posições **20 %** e **30 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 12 % e da posição 8 % para a posição 12 % implica em uma diminuição do diâmetro d_i . Os valores do diâmetro d_i são iguais para as posições 4 e 8 %. Para a fenda de trabalho

regulada na posição **40 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo não implica em uma variação do diâmetro d_i .

O gráfico mostra que não há nenhuma tendência clara do comportamento dos parâmetros sobre o diâmetro d_i . Porém, os resultados plotados no gráfico são muito confiáveis devido à baixa dispersão da medição encontrada. Como para o diâmetro d_i se desejam valores baixos, a combinação dos parâmetros, fenda de trabalho na posição **30 %** e velocidade de posicionamento do eletrodo na posição **12 %**, propicia o menor valor do diâmetro d_i .

- **Tempo de usinagem/furo t_u** - Da análise de variância conclui-se que há uma interação significativa entre velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") no tempo de usinagem/furo t_u . Para a fenda de trabalho regulada na posição **20 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 8 % implica em um aumento do tempo de usinagem/furo t_u e uma variação da posição 8 % para a posição 12 % implica em uma diminuição do tempo de usinagem/furo t_u . Os valores do tempo de usinagem/furo são iguais para as posições 4 e 12 %. Para a fenda de trabalho regulada nas posições **30 %** e **40 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 8 % e da posição 4 % para a posição 12 % implica em uma diminuição do tempo de usinagem/furo t_u . Os valores do tempo de usinagem/furo são iguais para as posições 8 e 12 %.

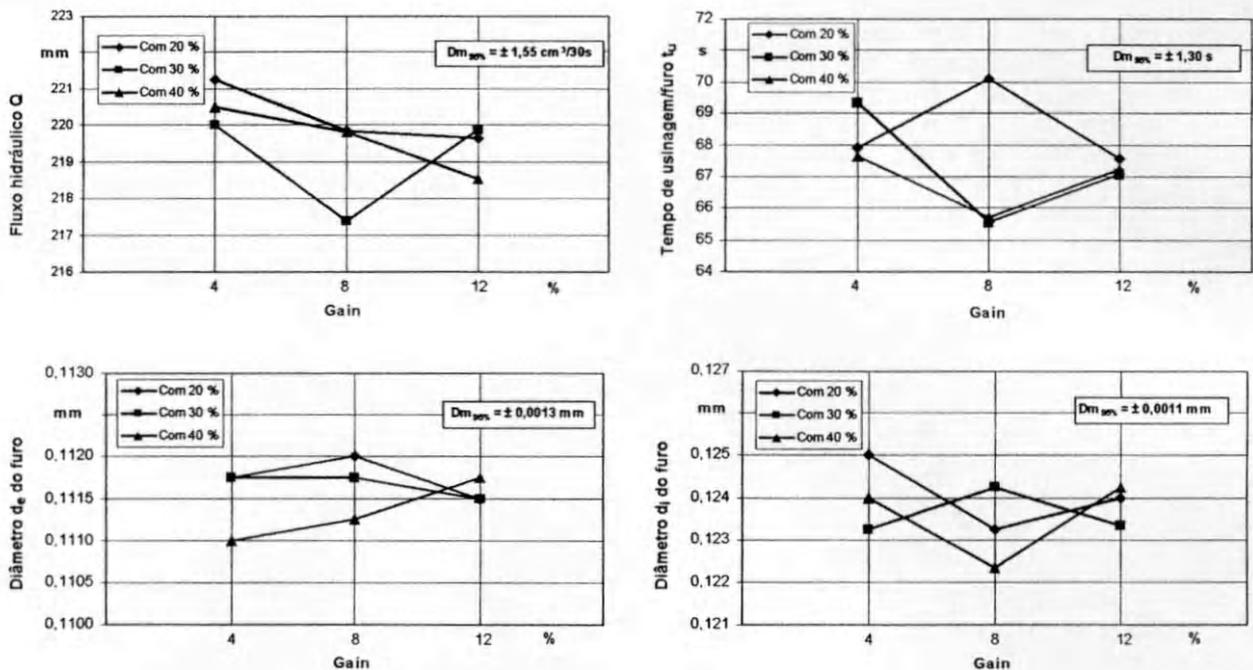
Do gráfico pode ser visualizado que não há uma tendência clara do comportamento dos parâmetros em estudo no tempo de usinagem/furo, porém, os resultados mostram uma alta confiabilidade devido à baixa dispersão de medição encontrada nos resultados. Como valor otimizado para o processo, a combinação dos parâmetros, fenda de trabalho na posição **40 %** e velocidade de posicionamento do eletrodo na posição **8 %**, minimiza o tempo de usinagem/furo, o que é desejado.

- **Diâmetro d_e do furo de injeção** – Da análise de variância verifica-se que

não há influência significativa dos parâmetros velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") no diâmetro d_e .

6.3.5- Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de furação "Nr" 5

Nos gráficos da **figura 6.9** são mostrados os resultados obtidos para a sequência de programa "Nr" 5.



Parâmetros do Processo de Erosão (Sequência de programa "Nr" 5)	
• Programa de furação base (quadro 5)	• Condutividade do dielétrico= 0,23 – 0,26 $\mu\text{S}/\text{cm}$
• Material da peça - 18 Cr Ni 8	• Temperatura do dielétrico= 15,1 – 15,2 $^{\circ}\text{C}$
• Eletrodo – tungstênio (diâmetro 0,085 mm)	• Com 20,30 e 40 %/Gain 4, 8 e 12 % (para "Nr" 5)
• Dielétrico – água deionizada	• Medida: X= 0,5 mm

Figura 6.9 - Influência da velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") para a sequência de programa "Nr" 5

O eletrodo penetra a partir de uma profundidade de $-2,2$ mm até $-2,55$ mm com uma polaridade negativa. Para este experimento a velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") foi testada nas posições 4, 8 e 12 %, e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") testada nas posições 20, 30 e 40 %

Análise dos resultados dos gráficos da **figura 6.9**:

- **Fluxo hidráulico Q** – Da análise de variância conclui-se que há uma influência significativa entre velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") no fluxo hidráulico Q. Para a fenda de trabalho regulada na posição **20 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 8 % e da posição 4 para a posição 12 % implica em uma diminuição do fluxo hidráulico Q. Os valores do fluxo hidráulico são iguais para as posições 8 e 12 %. Para a fenda de trabalho regulada na posição **30 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 para a posição 8 % implica em uma diminuição do fluxo hidráulico Q e uma variação da posição 8 % para a posição 12 % há um aumento do fluxo hidráulico Q. Os valores do fluxo hidráulico são iguais para as posições 4 e 12 %. Para a fenda de trabalho regulada na posição **40 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 12 % implica em uma diminuição do fluxo hidráulico Q. Os valores do fluxo hidráulico são iguais para as posições 8 e 12 % e 4 e 8 %.

De uma forma geral o gráfico não mostra nenhuma tendência para os parâmetros em estudo sobre o fluxo hidráulico Q, porém, os valores plotados no gráfico são muito confiáveis devido à baixa dispersão da medição dos resultados. Como para o fluxo hidráulico se deseja definir a combinação de parâmetros onde há uma menor dispersão do fluxo hidráulico Q, a combinação dos parâmetros, fenda de trabalho na posição **30 %** e velocidade de posicionamento do eletrodo na posição **4 %**, favoreceu o melhor resultado.

- **Diâmetro d_i do furo de injeção** - Da análise de variância conclui-se que há uma influência significativa entre velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") no diâmetro d_i do furo de injeção. Para a fenda de trabalho regulada na posição **20 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 8 % implica em uma diminuição do diâmetro d_i . Os diâmetros d_i são iguais para as posições 4 e 12 % e 8 e 12 %. Para a fenda de trabalho regulada na posição **30 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo não implica em uma variação do diâmetro d_i . Para a fenda de trabalho regulada na posição **40 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 8 % implica em uma diminuição do diâmetro d_i e uma variação da posição 8 para a posição 12 % implica em um aumento do diâmetro d_i . Os valores do diâmetro d_i são iguais para as posições 4 e 12 % .

O gráfico mostra que não há nenhuma tendência clara do comportamento dos parâmetros sobre o diâmetro d_i . Porém, os resultados plotados no gráfico são muito confiáveis devido à baixa dispersão da medição encontrada. Como para o diâmetro d_i se deseja baixos valores, a combinação dos parâmetros, fenda de trabalho na posição **40 %** e velocidade de posicionamento do eletrodo na posição **8 %**, propicia os menor valor do diâmetro d_i .

- **Tempo de usinagem/furo t_u** - Da análise de variância conclui-se que há uma interação significativa entre velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e a fenda de trabalho (parâmetro "Com") sobre o tempo de usinagem/furo t_u . Para a fenda de trabalho regulada na posição **20 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 8 % implica em um aumento do tempo de usinagem/furo t_u e uma variação da posição 8 % para a posição 12 % implica em uma diminuição do tempo de usinagem/furo t_u . Os valores do tempo de usinagem/furo são iguais para as posições 4 e 12 %. Para a fenda de trabalho regulada na posição **30 %**, uma variação da velocidade de

posicionamento do eletrodo da posição 4 % para a posição 8 % e da posição 4 % para a posição 12 % implica em uma diminuição do tempo de usinagem/furo t_u , e uma variação da posição 8 % para a posição 12 % implica em um aumento do tempo de usinagem/furo t_u . Para a fenda de trabalho regulada na posição **40 %**, uma variação da velocidade de posicionamento do eletrodo de 4 para 8 % implica em uma diminuição do tempo de usinagem/furo t_u e uma variação da posição 8 % para a posição 12 % ocorre um aumento do tempo de usinagem/furo t_u . Os valores do tempo de usinagem/furo são iguais para as posições 4 e 12 %;

Do gráfico pode ser visualizado que não há uma tendência clara do comportamento dos parâmetros em estudo sobre o tempo de usinagem/furo, porém, os resultados mostram uma alta confiabilidade devido à baixa dispersão de medição encontrada. Como valor otimizado para o processo onde se deseja minimizar o tempo de usinagem/furo, a combinação de parâmetros, fenda de trabalho na posição **30 %** e velocidade de posicionamento do eletrodo na posição **8 %**, minimiza o tempo de usinagem/furo.

- **Diâmetro d_e do furo de injeção** – Da análise de variância verifica-se que não há influência significativa dos parâmetros velocidade de posicionamento do eletrodo (parâmetro "Gain") e da fenda de trabalho (parâmetro "Com") no diâmetro d_e .

6.4- Análise dos ensaios comparativos

Os resultados dos experimentos permitiram definir a condição de erosão "otimizada" para a furação de uma peça com 6 furos injeção. Na condição "otimizada" foram erodidas 25 peças para serem comparadas com as 25 peças da condição "não-otimizada". Através dos experimentos, procurou-se definir os valores dos parâmetros em estudo onde a variação do fluxo hidráulico Q foi minimizada, um maior valor diâmetro d_e do furo de injeção, um menor valor do diâmetro d_i do furo de injeção, uma conicidade k do furo pequena e um tempo de usinagem/ furo t_u baixo.

O programa de furação "otimizado" ficou definido conforme **quadro 12**, e a vazão "interna" do dielétrico mais adequada ao processo ficou definida em 0,08 g/s.

Nr	W	U	I	U-I	T	S	P	Com	Gain	ACO
Sequência de programa de furação	Percurso do Eletrodo	Polaridade do Eletrodo	Corrente De Descarga	Tensão nominal do gerador	Tempo de descarga	Capacitância do capacitor	Tempo de Pausa entre Descargas	Distância entre eletrodo e peça	Velocidade de posicionamento do eletrodo	Função de Monitoramento do processo
[-]	[mm]	[+/-]	[A]	[V]	[μ s]	[nF]	[μ s]	[%]	[%]	[-]
1	-0,2	+	1	9	1	30	9	10	12	0
2	-1,3	-	1	21	1	44	9	20	4	65
3	-1,6	-	1	21	1	44	9	30	4	65
4	-2,2	-	1	21	1	44	9	30	4	65
5	-2,55	-	1	21	1	44	9	30	8	65

Quadro 12 – Programa de furação "otimizado" definido com os experimentos

Para a furação da 25 peças com a condição "não-otimizada" foi utilizado o programa de furação "base" (**quadro 13**), com uma vazão "interna" do dielétrico de 0,08 g/s, conforme descrito no **capítulo 5**

Nr	W	U	I	U-I	T	S	P	Com	Gain	ACO
Sequência de programa de furação	Percurso do Eletrodo	Polaridade do Eletrodo	Corrente De Descarga	Tensão nominal do gerador	Tempo de descarga	Capacitância do capacitor	Tempo de Pausa entre Descargas	Distância entre eletrodo e peça	Velocidade de posicionamento do eletrodo	Função de monitoramento do processo
[-]	[mm]	[+/-]	[A]	[V]	[μ s]	[nF]	[μ s]	[%]	[%]	[-]
1	-0,2	+	1	9	1	30	9	10	8	0
2	-1,3	-	1	21	1	44	9	30	8	65
3	-1,6	-	1	21	1	44	9	30	8	65
4	-2,2	-	1	21	1	44	9	30	8	65
5	-2,55	-	1	21	1	44	9	30	8	65

Quadro 13 – Programa de furação "base" para a condição "não-otimizada"

6.4.1- Análise do fluxo hidráulico

O comportamento do fluxo hidráulico Q para as condições "otimizada" e "não-otimizada" das 25 peças erodidas é mostrado na **figura 6.10** em forma de histograma de frequência relativa.

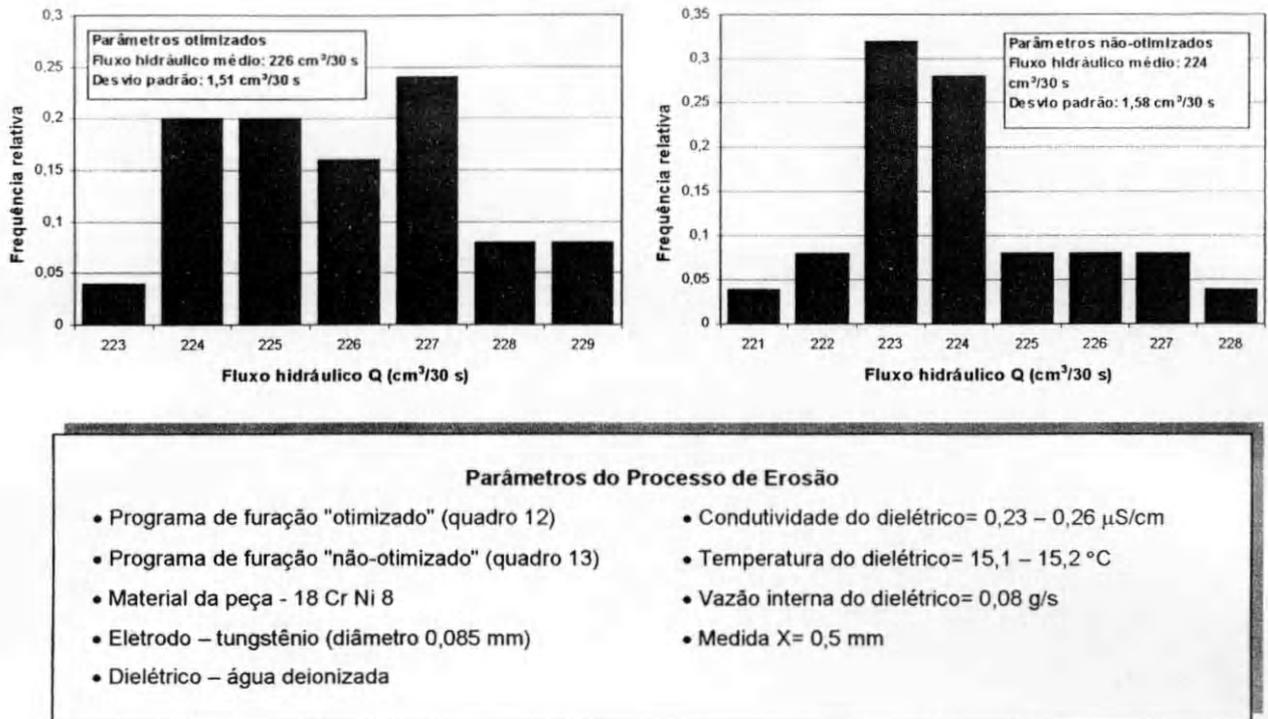


Figura 6.10 - Distribuição de freqüência relativa para o fluxo hidráulico Q

A partir dos dados do histograma da **figura 6.10** é possível verificar, através do teste de hipóteses, com um nível de significância de 5 %, que a dispersão do fluxo hidráulico da condição "otimizada" é igual a da "não-otimizada". Isto indica que a condição "otimizada" não favoreceu de modo significativo o fluxo hidráulico, pois, dispersões baixas para esta característica são desejadas. Pode-se verificar que o fluxo hidráulico da condição "otimizada" é significativamente maior do que a condição "não-otimizada". Uma pequena melhoria, devido a dispersão da medição ser um pouco mais baixa para a condição "otimizada", pode ser analisada através do histograma da **figura 6.10**. Existe uma probabilidade de 88 % das peças para a condição "otimizada" se situarem dentro de ± 1 % em torno do valor médio do fluxo hidráulico, para a condição "não-otimizada" é de 82 %, o que favorece um pouco a condição "otimizada".

6.4.2- Análise do diâmetro d_i

O comportamento do diâmetro d_i do furo para as condições "otimizada" e

"não-otimizada" das 25 peças erodidas é mostrado na **figura 6.11** em forma de histograma de frequência relativa.

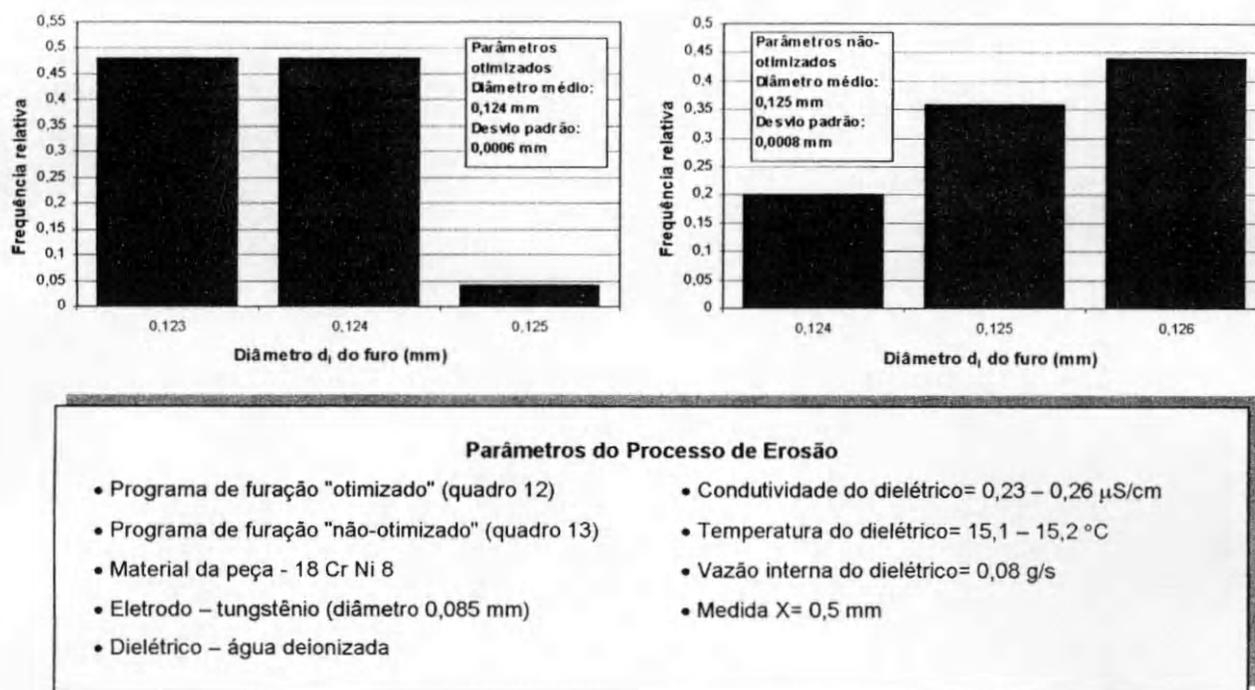


Figura 6.11 - Distribuição de frequência relativa para o diâmetro d_i do furo

A partir dos dados do histograma da **figura 6.11** é possível verificar através do teste de hipóteses com um nível de significância de 5 %, que o diâmetro d_i da condição "otimizada" é menor do que o da condição " não-otimizada". Isto indica que a condição "otimizada" favoreceu o diâmetro d_i , pois, valores dos diâmetros d_i baixos são desejados. Para um nível de significância de 5 %, o intervalo de confiança da condição "otimizada" ficou em $0,124 \pm 0,00025$ mm e da condição "não-otimizada" em $0,125 \pm 0,00033$ mm. Como se deseja atingir valores do diâmetro d_i os mais baixos possíveis, no histograma, pode ser verificado que existe um probabilidade para a condição "otimizada" de 48 % do diâmetro d_i ser igual a 0,123 mm e para a condição "não-otimizada" 0 % do diâmetro d_i ser igual a 0,123 mm.

6.4.3- Análise do diâmetro d_e

O comportamento do diâmetro d_e do furo para as condições "otimizada" e

"não-otimizada" das 25 peças erodidas é mostrado na **figura 6.12** em forma de histograma de frequência relativa.

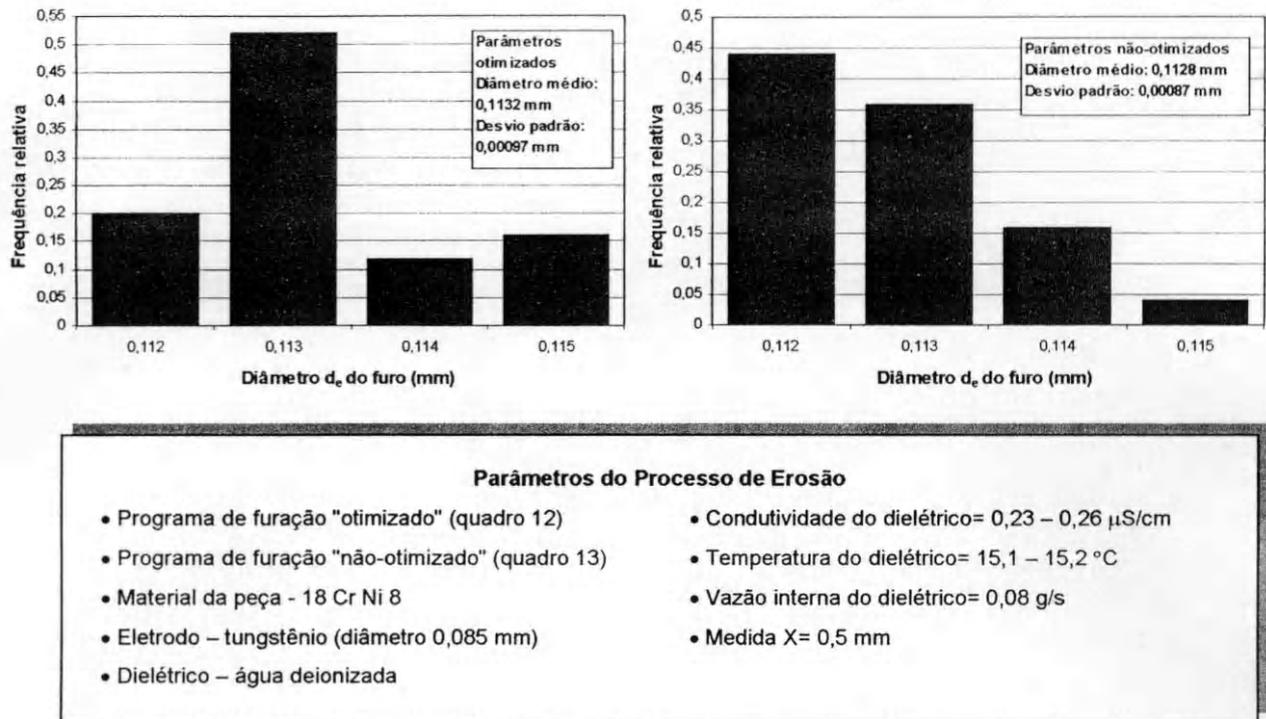
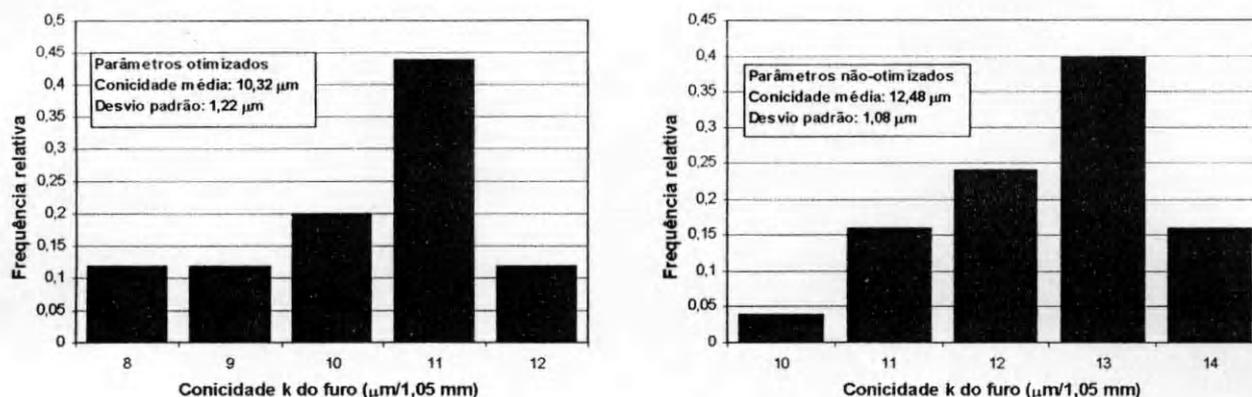


Figura 6.12 - Distribuição de frequência relativa para o diâmetro d_e do furo

A partir dos dados do histograma da **figura 6.12** é possível verificar através do teste de hipóteses com um nível de significância de 5 %, que não há diferença entre a condição "otimizada" e a condição " não-otimizada". Isto indica que a condição "otimizada" não favoreceu o valor do diâmetro d_e , pois, valores de diâmetros d_e altos são desejados. Para um nível de significância de 5 %, o intervalo de confiança do diâmetro d_e da condição da "otimizada" ficou em $0,1132 \pm 0,0004$ mm e para a condição "não-otimizada" em $0,1128 \pm 0,00036$ mm. Como se deseja atingir valores do diâmetro d_e os mais altos possíveis, no histograma, pode ser verificado que existe um probabilidade para a condição "otimizada" de 16 % do diâmetro d_e ser igual a 0,115 mm e para a condição "não-otimizada" 4 % do diâmetro d_e ser igual a 0,115 mm.

6.4.4- Análise da conicidade

O comportamento da conicidade k do furo para as condições "otimizada" e "não-otimizada" das 25 peças erodidas é mostrado na **figura 6.13** em forma de histograma de frequência relativa.



Parâmetros do Processo de Erosão

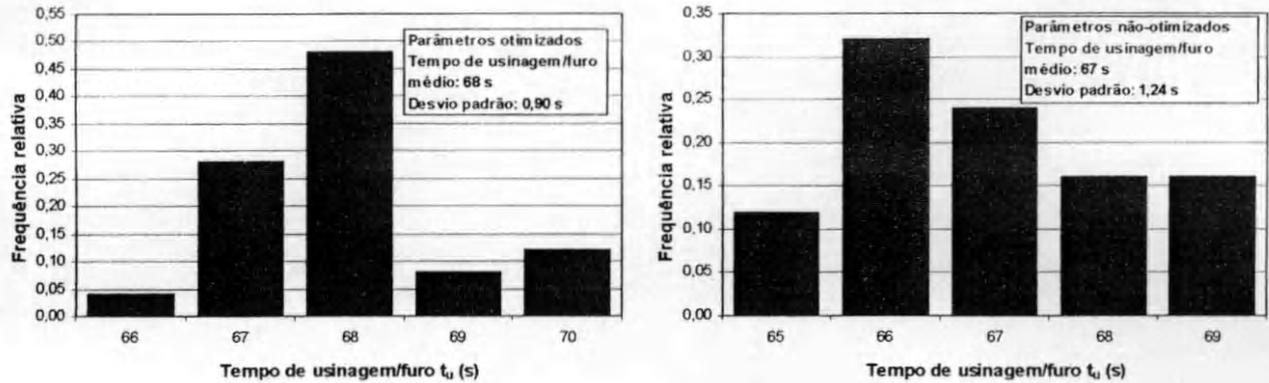
- Programa de furação "otimizado" (quadro 12)
- Programa de furação "não otimizado" (quadro 13)
- Material da peça - 18 Cr Ni 8
- Eletrodo - tungstênio (diâmetro 0,085 mm)
- Dielétrico - água deionizada
- Condutividade do dielétrico= 0,23 – 0,26 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Temperatura do dielétrico= 15,1 – 15,2 $^{\circ}\text{C}$
- Vazão interna do dielétrico= 0,08 g/s
- Medida: $X = 0,5 \text{ mm}$

Figura 6.13 - Distribuição de frequência relativa para a conicidade k do furo

A partir dos dados do histograma da **figura 6.13** é possível verificar através do teste de hipóteses com um nível de significância de 5 %, que a conicidade k da condição "otimizada" é menor do que a da condição "não-otimizada". Isto indica que a condição "otimizada" favoreceu a conicidade do furo, pois, valores de conicidade baixos são desejados. Para um nível de significância de 5 %, a conicidade da condição "otimizada" ficou em $10,32 \pm 0,50 \mu\text{m}/1,05 \text{ mm}$ e da condição "não-otimizada" em $12,48 \pm 0,45 \mu\text{m}/1,05 \text{ mm}$. Como se deseja atingir valores de conicidade os mais baixos possíveis, no histograma, pode ser verificado que existe um probabilidade para a condição "otimizada" de 12 % da conicidade ser igual a 8 $\mu\text{m}/1,05 \text{ mm}$ e para a condição "não-otimizada" 0 % se ser igual a 8 $\mu\text{m}/1,05 \text{ mm}$.

6.4.5- Análise do tempo de usinagem/furo

O comportamento do tempo de usinagem/furo t_u do furo para as condições "otimizada" e "não-otimizada" das 25 peças erodidas é mostrado na **figura 6.14** em forma de histograma de frequência relativa.



Parâmetros do Processo de Erosão

- Programa de furação "otimizado" (quadro 12)
- Programa de furação "não otimizado" (quadro 13)
- Material da peça - 18 Cr Ni 8
- Eletrodo - tungstênio (diâmetro 0,085 mm)
- Dielétrico - água deionizada
- Condutividade do dielétrico= 0,23 – 0,26 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Temperatura do dielétrico= 15,1 – 15,2 $^{\circ}\text{C}$
- Vazão interna do dielétrico= 0,08 g/s
- Medida X= 0,5 mm

Figura 6.14 - Distribuição de frequência relativa para o tempo de usinagem/furo t_u

A partir dos dados do histograma da **figura 6.10** é possível verificar através do teste de hipóteses com um nível de significância de 5 %, que o tempo de usinagem/furo t_u da condição "otimizada" é maior do que a condição "não-otimizada". Isto indica que a condição "otimizada" não favoreceu o tempo de usinagem t_u , pois, tempos de usinagem/furo baixos são desejados. Para um nível de significância de 5 %, o tempo de usinagem da condição "otimizada" ficou em $68 \pm 0,35$ s e o da condição "não-otimizada" em $67 \pm 0,42$ s. Como se deseja atingir tempos de usinagem/furo os mais curtos possíveis, do histograma, pode ser verificado que existe um probabilidade para a condição "otimizada" de 0 % do tempo de usinagem t_u ser igual a 65 s e para a condição "não-otimizada" de 12 % para 65 s.

7- Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

7.1- Conclusões

A otimização do processo de eletroerosão, para furos de injeção com diâmetros abaixo de 0,13 mm utilizando eletrodos de tungstênio de 0,085 mm de diâmetro, é de grande importância para garantir a estabilidade do processo e, desta forma, assegurar uma boa qualidade às características do furo de injeção. Em relação às características do furo em estudo, a condição de furação "otimizada" mostrou ser favorável para a obtenção de menores diâmetros d_i e menores conicidades k do furo de injeção e uma melhoria na dispersão dos valores do fluxo hidráulico Q . O diâmetro d_e do furo de injeção não apresentou uma variação significativa em relação a condição de furação "não-otimizada". A qualidade de canto do diâmetro d_e mostrou-se satisfatória, pois não ocorreu em nenhum experimento a "expulsão" de material líquido no contorno do furo de injeção. A otimização, adotando critérios de variáveis de entrada significativas e não-significativas, mostrou resultados piores para o tempo de usinagem/furo t_u , sendo estes em torno de 1,5 % maiores para a condição otimizada em relação a condição de furação "não-otimizada".

A vazão "interna" do dielétrico exerce uma forte influência sobre diâmetro d_i . Inicialmente um aumento da vazão "interna" do dielétrico favorece uma diminuição do diâmetro d_i do furo, porém, valores muito altos de vazões "internas" implicam em uma dificuldade para a formação do "canal de descarga" e, com isto, dificultam a remoção de material. Além disso, vazões elevadas excitam o eletrodo a vibrações, o que prejudica as precisões de forma e dimensional do furo.

Os resultados dos experimentos nos quais foram analisadas a influência da velocidade de posicionamento do eletrodo e da distância entre eletrodo e peça, permitem concluir, baseados na análise de variância, que estas duas variáveis são interdependentes, mas, as curvas obtidas, não mostraram um comportamento bem definido para estes parâmetros em relação às características que foram estudadas.

Para cada valor da variável velocidade de posicionamento do eletrodo existe um valor ótimo para a fenda de trabalho (distância eletrodo/peça) que é dependente da profundidade de penetração do eletrodo. Este fato favorece o processo de erosão através da melhoria da estabilidade do processo pela diminuição de curto-circuitos, pulsos em vazio e arcos voltaicos.

Para cada profundidade de penetração do eletrodo foi definido um valor ótimo para a característica em estudo. Observa-se uma tendência de o processo de erosão tornar-se mais estável para velocidades de reposicionamento mais baixas, devido a diminuição das vibrações do eletrodo. Para maiores profundidades de furação a auto centragem do eletrodo no furo permite obter fendas de trabalho menores, e também menos descargas sobre as paredes laterais do furo, favorecendo a precisão dimensional e de forma do furo.

Os resultados dos experimentos mostraram ser altamente confiáveis pelo fato de as dispersões encontradas serem muito baixas. Os valores plotados nos gráficos e histogramas para as características em estudo, apresentaram dispersões de aproximadamente 1% em torno dos valores médios.

7.2- Sugestões para trabalhos futuros

No decorrer deste trabalho ficou evidenciado alguns pontos que merecem um estudo, de modo a aprimorar os resultados aqui apresentados:

- Desenvolver um estudo semelhante utilizando como material do eletrodo o metal duro, pois este é aplicado também em alguns casos para o processo de microfuração de furos de injeção em bicos injetores;
- Desenvolver um estudo específico dos efeitos das vibrações do eletrodo no processo de erosão;
- Realizar um estudo da influência da variação da temperatura do dielétrico no processo de erosão;

- Avaliar a influência da profundidade da camada cementada na sede do bico injetor no processo de erosão;
- Realizar um estudo da rugosidade da superfície externa da sede do corpo do bico injetor no diâmetro d_e do furo de injeção;
- Desenvolver um estudo do grau de impurezas do dielétrico na estabilidade do processo de erosão;
- Realizar um estudo para quantificar a probabilidade de ocorrência de arrancamento de material da parede do furo com a variação da distância eletrodo/peça (variação da fenda de trabalho);
- Verificar a influência da variação da temperatura da peça a ser usinada no processo de erosão;
- Verificar a influência da distância entre eletrodo/peça e da velocidade de posicionamento do eletrodo na rugosidade do furo de injeção
- Avaliar a integridade das superfícies erodidas (trincas, tensões residuais, etc).

8-Referências bibliográficas

- [1] MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. Fourth Edition, New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [2] KREYSZIG, E. **Statistische Methoden und Ihren Anwendungen**. 7 Auflage. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1979.
- [3] MONTGOMERY D.C., COLEMAN D.E. **A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment**. Technometrics, V. 35, n. 1, p. 1-27. Feb. 1993.
- [4] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren Band 3**. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1979.
- [5] BUSCH, R. **Elektrotechnik und Elektronik**. 2 Auflage. Stuttgart: Teubner, p. 66 1996.
- [6] KARLHEINZ, G. **Feinbearbeitung metallischer Werkstoffe durch funkenenerosives Senken**. Dissertation - Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 1961.
- [7] OBRIG, H. W. **Grundlagen der funkenerosiven Gesenkbearbeitung**. Dissertation - Technischen Hochschule Aachen, Aachen 1961.
- [8] SCHIERHOLT, H. **Über den Abtragsvorgang bei der funkenerosiven Bearbeitung und Forderungen an Impulsform und Regeleinrichtungen der verwendeten Generatoren**. Dissertation - Technischen Hochschule Aachen, Aachen 1964.

- [9] SCHUMACHER, B. **Das Leistungsverhalten und der Werkzeugverschleiß bei der funkenerosiven Bearbeitung von Stahl mit Speicher- und Impulsgeneratoren.** Dissertation - Technischen Hochschule Aachen, Aachen 1966.
- [10] KURR, R. **Grundlagen zur selbsttätigen Optimierung des funkenerosiven Senkens.** Dissertation - Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 1971.
- [11] WERTHHEIM, R. **Untersuchung der energetischen Vorgänge bei der funkenerosiven Bearbeitung als Grundlagen für eine Verbesserung des Prozeßablaufs.** Dissertation - Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 1971.
- [12] ENGELS, R. K. G. **Ein Beitrag zur Optimierung für das funkenerosives Senken.** Dissertation - Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 1971.
- [13] MIRONOFF, N. **Die Elektroerosion - Ihre physikalischen Grundlagen und industriellen Anwendungen.** *Microtecnic*, V. 19, n. 3, p. 149-153 e 171-177, 1965.
- [14] RICHTLINIE VDI 3400. **Elektroerosive Bearbeitung. Begriffe, Verfahren Anwendung.** Verein Deutscher Ingenieure, 1976.
- [15] RICHTLINIE VDI 3402. **Elektroerosive Bearbeitung. Definitionen und Terminologie.** Verein Deutscher Ingenieure, 1976.
- [16] MÖßLEIN, M. **Prozeßoptimierung und Absicherung für das Erodieren kleiner Spritzlöcher mit dem Ziel: Stabiler Prozeß bei minimalen Kosten.** Diplomarbeit - Fachhochschule Würzburg, Schweinfurt, 1996

- [17] THEMENKREIS . **Technologie der Bearbeitungverfahren**. Industrie-Anzeiger, V. 92, n. 96, p. 2067-2071, 1974
- [18] WILLIAMS, E. M. **Theory of Electric Spark Machining**. January, p. 105-108, 1952.
- [19] ZOLOTYCH, B. N. **Theorie zum Phänomen der funkenerosiven Bearbeitung**. Fertigung, V. 6, p. 185-191, 1971.
- [20] HOCKENBERRY, T. O. **Dynamic Evolution of Events Accompanying the Low-Voltage Discharges Employed in EDM**. IEEE Transaction on Industry and General Applications, V. 3, n. 4, p. 302-308, July 1967.
- [21] FIELD, M, KAHLES, J. F. **Übersicht über die Oberflächenbeschaffenheit bearbeiteter Werkstücke**. Fertigung, V. 5, 1972.
- [22] LONGFELLOW, J, WOOD, J. D, PALME, R .B. **The Effects of Electrode Material Properties on the Wear Ratio in Spark-Machining**. Journal of the Institute of Metals, V. 96, 1968.
- [23] ZINGERMAN, A. S. **Electro-Erosional Properties of Metals**. Fiz. Metal. Metalloved., V. 5, n. 1, p. 58-67, 1957.
- [24] KING, F. L. **EDM Goes Adaptive**. The Tool and Manufacturing Engineer. p. 36-38, June 1968.
- [25] MANFRED ,W. **Adaptive Regelung des Senkerodierens**. VDI-Z, n.8, p. 329-323. Mai 1965.

- [26] STEMPEL, G. **Funkenerosions - Elektroden auf Metallbasis**. Werkstatt und Betrieb, V. 111, n. 3, p. 194-200, 1983.
- [27] SCHULZE, D. **Einfluß des Dielektrikum auf die elektroerosive Bearbeitung**. Maschinenmarkt, V. 84, n. 33, p. 662-666, 1978.
- [28] SCHUMACHER, B. **Die Bewertung der Funkenerosion im Verfahrensvergleich**. Fertigung, V. 3, p. 79-85, 1972
- [29] OBRIG, H. **Wege zur Leistungssteigerung bei den elektrisch abtragenden Bearbeitungsverfahren**. Industrie-Anzeiger, V. 93, n. 60, p.1556-1567, 1971.
- [30] KÖNIG, W. **Die Auswirkung der Energieverteilung auf Abtrag und Verschleiß bei der funkenerosiven Bearbeitung**. Industrie-Anzeiger, V. 94, n. 31, p. 692-693, 1972.
- [31] LANG, W. **Kleinbearbeitung mit Funkenerosion und elektrochemischen Verfahren**. Fertigung, V. 4, p. 119-123, 1972
- [32] MOTOKI, M., HASHIGUCHI, K. **Energy Distribution at the Gap in Electric Discharge Machining**. Annals of the C.I.R.P, V. 15, p. 485-489, 1967.
- [33] KÖNIG, W., WERTHEIM, R. **Die funkenerosive bearbeitete Oberfläche - Vor und Nachteile**. Gesserei, V. 63, n. 3, p. 49-55, 1976.
- [34] BRUYN, H.E. **Some Aspects of the Influence of the Gap Flushing on the Accuracy in Finishing by Spark Erosion**. Annals of the C.I.R.P, V.18, p. 147-151, 1970.

- [35] GONÇALVES, A. A. **Apostila da Disciplina de Metrologia do Curso de Graduação em Eng. Mecânica**. Laboratório de Metrologia e Automação, UFSC, Florianópolis, 1992.
- [36] MYCRONA GmbH. **Benutzerhandbuch**. Saarwellingen, Deutschland, 1998.
- [37] ZYGO CORPORATION. **Operation and Maintenance**. Zygo Corporation, Middlefield, USA, 1986.
- [38] IKA LABORTECHNIK GmbH. **Betriebsanleitung**. IKA LABORTECHNIK. Staufen, 1998.
- [39] BÜRKET . **Bedienungsanleitung**. Bürket TR42552M-705-1-IE, 1995.
- [40] AGIE - AG. **Bedienungsanleitung AGIE Quadraton 1**. Losone, Suíça, 1998.
- [41] TERMOGAMMA. **Operationsinstructions**.TERMOGAMMA,Glublasco, Suíça, 1996
- [42] THERM. **Manual de Operações**. THERM, São Paulo, 1998
- [43] RIFFEL, G. **Influência da fenda de trabalho e das condições de operação da eletroerosão por faíscas**. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis ,1961.
- [44] KÖNIG, W. , SIEBERS, F.J. **Estudo de um sistema por penetração em um meio aquoso**. Máquinas e Metais, p. 20-27, Dezembro, 1998.
- [45] Weingaertner, W. **Mecanismos de Descargas Elétricas**. Contatos pessoais com o autor em 2000.

9- Anexos

9.1- Comportamento da vazão "interna" do dielétrico

Para o controle vazão "interna" do dielétrico v_i foi feito o levantamento da curva de vazão como função da rotação da bomba (bomba de rolos IKA) que foi adaptada à máquina AGIE QUADRATON 1. Este comportamento (**figura 9.1**) foi feito através da pesagem do fluido coletado em um tempo de 30 segundos para as rotações da bomba de 5, 10 e 15 RPM (faixa de trabalho dos experimentos). Para cada rotação foram feitas 3 coletas da vazão "interna" do dielétrico, onde os dados coletados foram pesados em uma balança de massa, e desta forma, foram calculados a média, o desvio padrão e a dispersão da medição da vazão "interna" do dielétrico para cada rotação da bomba, com um índice de 95% de confiabilidade (**quadro 14**).

Número Da Amostra	Vazão "interna" do dielétrico (g/s)		
	Rotação da bomba (RPM)		
	5	10	15
1	0,036	0,075	0,111
2	0,038	0,076	0,115
3	0,036	0,076	0,114
Média	0,037	0,076	0,113
Desvio padrão	0,0011	0,0006	0,0021
Dm_{95%}	0,00473	0,00258	0,00903

Quadro 14 – Dados coletados da vazão "interna" do dielétrico X rotação da bomba

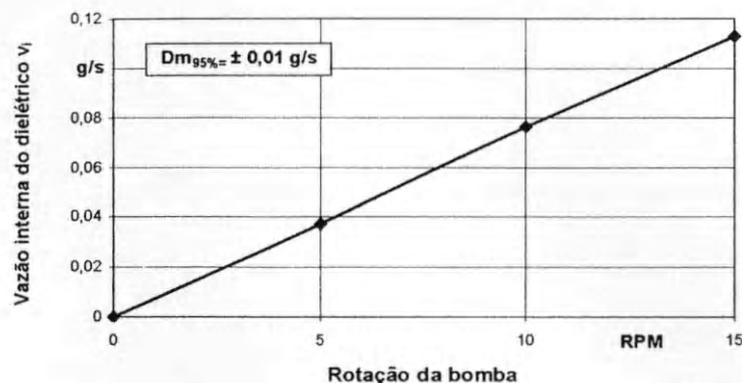


Figura 9.1 - Rotação da bomba X vazão "interna" do dielétrico

9.2- Avaliação dos equipamentos utilizados nos experimentos

Com o objetivo de assegurar aos resultados dos experimentos melhor confiabilidade, a máquina e os equipamentos de medição passaram por uma análise de repetibilidade e precisão, folgas, desvios e ajustes necessários. Nesta etapa foram determinadas as incertezas dos sistemas utilizados, sugeridas por Gonçalves [35]

- Máquina de furação por eletroerosão por faíscas (AGIE QUADRATON 1) [40]
Fabricante: AGIE/CHARMILLES
Gerador: Gerador de relaxação com descargas controladas
Desvio de posicionamento dos eixos X, Y, Z e W : $\pm 0,003$ mm

- Equipamento para medição de diâmetros do eletrodo a laser [37]
Fabricante: ZYGO
Modelo: 3010
Incerteza de medição: $\pm 0,5$ μm

- Bancada de medição de fluxo hidráulico Danfoss
Fabricante: Liebig
Modelo: Mass 2010
Incerteza de medição: $\pm 0,74$ $\text{cm}^3/30$ s

- Máquina de medição do diâmetro do furo de injeção [36]
Fabricante: Mycrona
Modelo: Altera
Luminosidade externa: 46 %
Luminosidade interna: 70 %

- Balança de medição em massa
Fabricante: LIBRON
Modelo: G-LIBRON 210
Incerteza de medição: $\pm 3,1$ mg

- Condutímetro (medição da condutividade e temperatura do dielétrico) [39]
Fabricante: BÜRKERT
Modelo: 8225
Incerteza de medição da condutividade elétrica: $\pm 3\%$
Incerteza de medição da condutividade temperatura: $\pm 0,5 \%$

- Equipamento para arrefecimento do dielétrico [41]
Fabricante: TERMOGAMMA
Modelo: WG 20a TPS

- Equipamento para medir temperatura e umidade relativa do ar [42]
Fabricante: THERM
Modelo: 6290-7K
Incerteza de medição da umidade relativa do ar: $\pm 2\%$
Incerteza de medição da temperatura do ar: $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$

- Microscópio para avaliação da qualidade de canto
Fabricante: Leica Wild
Modelo: Leica Wild 650

- Bomba reguladora de vazão "interna" do dielétrico [38]
Fabricante: IKA
Modelo: PA-SK4

9.3- Valores de regulagem dos parâmetros do gerador

O quadro 15 mostra os valores reais dos parâmetros do programa de furação da Máquina AGIE QUADRATON 1 mostrados nos capítulos anteriores.

VALORES DE REGULAGEM DO PARÂMETROS DO GERADOR

Posição	T Tempo de descarga t_e [μ s]	P Tempo de pausa entre des- cargas t_o [μ s]	I Corrente de descarga i_e [A]	U Polaridade do eletrodo [+ ou -]	U-I Tensão nominal do gerador [V]
0	0.4	1	0		255
1	1.3	1.3	0.8		252
2	1.8	1.8	1.4		249
3	2.4	2.4	1.8		246
4	3.2	3.2	2.4		243
5	4.2	4.2	3.2		240
6	5.6	5.6	4		237
7	7.5	7.5	5.6		234
8	10	10			231
9	13	13			228
10	18	18			225
11	24	24			222
12	32	32			219
13	42	42			216
14	56	56			213
15	75	75			210
16	100	100			207
17	130	130			204
18	180	180			201
19	240	240			198
20	320	320			195
21	420	420			192
22	560	560			189
23	750	750			186
24	1000	1000			183
25	1300	1300			180
26	1800	1800			177
27	2400	2400			174
28	3200	3200			171
29	4200	4200			168
30	5600	5600			165
31	7500	7500			162

Continuação

S (sem diodo)	S (com diodo)	Valor da capacitância do capacitor [nF]
Capacitância do Capacitor	Capacitância do capacitor	
Posição	Posição	
20	40	0
21	41	0.22
22	42	0.47
23	43	1
24	44	1.2
25	45	1.5
26	46	1.7
27	47	2
28	48	2.2
29	49	2.5
30	50	2.7
31	51	3.3
32	52	3.8
33	53	4.3
34	54	6.2
35	55	11

Quadro 15 - Valores reais dos parâmetros de regulação do gerador da máquina
AGIE QUADRATON 1