

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

INFLUÊNCIA DA FENDA DE TRABALHO E DA LAVAÇÃO NAS CONDIÇÕES DE  
OPERAÇÃO DA ELETROEROSÃO POR FAÍSCA.

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

GERMANO RIFFEL

FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 1992

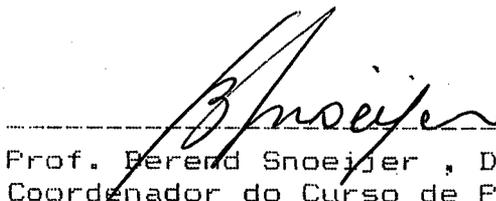
INFLUÊNCIA DA FENDA DE TRABALHO E DA LAVAÇÃO NAS CONDIÇÕES DE  
OPERAÇÃO DA ELETROEROSÃO POR FAÍSCA.

GERMANO RIFFEL

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA (nº 268)  
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO  
FABRICAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner , Dr.Ing.  
Orientador



Prof. Berend Snoeijer , Dr.Ing.  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica

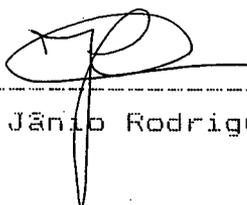
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner , Dr.Ing.



Prof. Alvaro Toubes Prata , Ph.D.



Prof. Jânio Rodrigues Lopes, M. em Eng.Mecânica



## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. - Ing. Walter Lindolfo Weigaertner, pela amizade, apoio, incentivo e a orientação deste trabalho.

A Universidade Federal de Santa Catarina, por viabilizar um período parcial para a elaboração da dissertação.

Ao Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelo fornecimento do material usado nos ensaios.

A Escola Técnica Tupy de Joinville, em proceder a tempera do material utilizado.

Aos técnicos e bolsistas do Laboratório de Máquinas Ferramenta - USIMAQ / LMP, Laboratório de Solda - LABSOLDA e Laboratório de Metrologia - LABMETRO, pela colaboração e auxílio prestado.

Aos colegas de curso e aos professores do Departamento de Pós-Graduação e Graduação em Engenharia Mecânica.

Ao graduando Rodrigo Facheço, pela sua dedicação, pelas sugestões e auxílio na composição deste trabalho.

Aos bolsistas e graduando(s) pela confecção dos desenhos.

Em especial, à minha esposa Luci Maria Debortoli Riffel e aos meus filhos Suzana e Eduard pela compreensão e apoio prestados.

A todos aqueles, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## Í N D I C E

1.	INTRODUÇÃO.....	2
2.	ESTADO DA ARTE.....	4
2.1.	Eletroerosão.....	4
2.1.1.	Classificação.....	7
2.1.2.	Componentes da eletroerosão por faísca.....	12
2.1.3.	Fenômenos e o princípio físico.....	19
2.1.4.	Parâmetros na eletroerosão por faísca.....	27
2.1.5.	Variáveis que influenciam no processo.....	35
2.2.	Dielétrico.....	38
2.2.1.	A lavagem na eletroerosão.....	43
2.2.2.	Característica dos fluidos dielétricos.....	51
2.2.3.	Aspectos do dielétrico no processo.....	52
3.	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	53
3.1.	Condições de lavagem.....	54
3.2.	Levantamento das características do gerador de pulso e o procedimento adotado.....	54
3.3.	Determinação das vazões na fenda de trabalho.....	58
3.3.1.	Projeto e construção de um rotâmetro.....	58
3.3.2.	Calibração do rotâmetro.....	61
3.4.	Construção de dispositivo para medir a abertura da fenda de trabalho.....	64
3.5.	Material utilizado nos ensaios.....	66
3.5.1.	Especificação dos materiais usados.....	66
3.5.2.	Corpos de prova.....	69

3.6. Máquina-ferramenta.....	71
3.7. Equipamentos utilizados.....	72
4. DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO.....	75
4.1. Dos ensaios experimentais.....	75
4.2. Preparação dos ensaios.....	75
4.2.1. Regulagem do gerador.....	75
4.2.2. Vazão e pressão do fluido dielétrico.....	76
4.3. Realização dos ensaios.....	76
4.4. Topografia da superfície.....	78
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	79
5.1. Influência da vazão na fenda de trabalho.....	79
6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO.....	89
6.1. Conclusão e sugestões para continuidade do trabalho..	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
ANEXO A .....	95
ANEXO B .....	109

C	F	Capacitor
d	mm	Diâmetro do eletrodo
$f_e$	Hz [1/s]	Frequência de descarga
$f_p$	Hz [1/s]	Frequência de impulso
i	A [Ampère]	Corrente
I	A [Ampère]	Corrente de trabalho
$i_e$	A [Ampère]	Corrente de descarga
$\bar{i}_e$	A [Ampère]	Corrente média de descarga
J	A/cm <sup>2</sup>	Densidade específica de corrente
P	bar	Pressão
t	K [Kelvin]	Temperatura
L	H	Indutor
q	l/s	Vazão
R	$\Omega$	Resistor
$R_a$	$\mu\text{m}$	Desvio médio aritmét. da rugosidade
$R_t$	$\mu\text{m}$	Altura máxima da rugosidade
$R_z$	$\mu\text{m}$	Rugosidade média

t	s	Tempo	
$t_d$	$\mu s$	Tempo de retardo (delay)	ix
$t_e$	$\mu s$	Tempo de descarga (entladung)	
$t_i$	$\mu s$	Tempo de impulso	
$t_o$	$\mu s$	Tempo de pausa (intervalo)	
$t_p$	$\mu s$	Tempo de período	
U	V [Volt]	Tensão/tensão de trabalho	
$\hat{U}_i$	V [Volt]	Tensão em aberto	
$U_e$	V [Volt]	Tensão de descarga	
$\bar{U}_e$	V [Volt]	Tensão média de descarga	
$V_e$	$mm^3/min$	Taxa de desgaste	
$V_v$	$mm^3/min$	Taxa de remoção	
$\bar{V}_v$	$mm^3/min$	Taxa média de remoção	
W	watt	Potência	
$W_e$	mJ	Energia de descarga	
$\varnothing$	%	Desgaste relativo	
$\lambda$		Relação de frequência	
$\rho$	$kg/m^3$	Densidade	
$\tau$		Relação de contato	
ABNT/NB		Associação Brasileira de Normas Técnicas /Normas Brasileiras	
DIN		Deutchers Institut für Normung	
VDI		Verein Deutscher Ingenieure	
SN		Schweizer Norm	

## ABSTRACT

The research in EDM technology has been concentrated on the optimization of the input parameter to achieve the best economical output in the process.

Many aspect have been studied, but there are still other aspects which have to be studied in more details. One of these is the flow of the dielectric fluid in the GAP between the electrode and the workpice.

The dielectric flow is indispensable in the EDM process to stabilize the sparks, to remove the particles out of the GAP and also to stabilize the workpice temperature.

The studies on this topic have been concentrated one the importance of the dielectric fluid flow in the gap. The obtained results will help the automatization of the process and lead to CNC-EDM machining.

## RESUMO

Nos últimos anos, a pesquisa tecnológica na área de eletroerosão centralizou-se na otimização de parâmetros, com vista ao seu emprego, de forma a ser economicamente viável na prática.

Apesar do grande progresso conseguido e das pesquisas desenvolvidas, faltam esclarecer muitos fenômenos que ocorrem na eletroerosão por faísca, inclusive sobre a vazão do fluido dielétrico, cuja função é imprescindível para a formação do canal de plasma formado no início da abertura do contato elétrico na fenda de trabalho. A vazão do fluido dielétrico atua na remoção das partículas (cavacos) provenientes da ação da descarga elétrica, além de resfriar o eletrodo e a peça, mantendo o conjunto a uma temperatura estável, fazendo com que o processo se desenvolva sem variações bruscas de temperatura, o que iria interferir dimensionalmente nos resultados desejados. Dada a grande importância da vazão do fluido dielétrico no processo é que abordamos o assunto nesse trabalho de pesquisa, onde se pretende levantar dados e parâmetros que poderão ser utilizados também em máquinas comandadas por CNC.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

O processo de fabricação por eletroerosão por faísca também é conhecido por EDM (Electrical Discharge Machining), e efetua a remoção do material pela ação de descargas elétricas emitidas entre a superfície do eletrodo e da peça ferramenta.

Para o processo por penetração, o eletrodo possui a forma recíproca que se deseja obter na peça. Já no processo de eletroerosão a fio, este utiliza um eletrodo na forma de um fio metálico, que descreve o recorte da peça e executa os mais diferentes contornos e formas das mais complexas, com a precisão definida pelo comando CNC de 2 ou mais eixos.

No atual desenvolvimento tecnológico, o processo EDM, tanto na forma por penetração como por fio, tem sua aplicação em grande escala a nível industrial. Em ferramentarias e matrizarias, a eletroerosão a fio concorre com processos convencionais de usinagem por remoção de cavacos para a fabricação de peças dos mais diferentes materiais, em especial os ligados com elevada dureza e resistência, que nos processos convencionais de usinagem não podem ser fabricados economicamente.

O processo EDM teve sua aplicação industrial a partir da metade deste século, quando então passou-se a estudar com mais profundidade os parâmetros que influenciam no seu

desempenho. Faz parte do processo o uso de um fluido dielétrico. A função deste é imprescindível para a formação do canal de plasma, para a remoção das partículas provenientes da ação da descarga elétrica sobre a peça e proceder o resfriamento tanto da peça como do eletrodo.

Em consequência do pequeno número de informações sobre o comportamento do dielétrico na fenda de trabalho e sua importância no processo de eletroerosão por faísca fez-se necessário um estudo que permitisse otimizar as condições de lavagem e de remoção de material para cada situação específica.

O objetivo deste trabalho é criar um banco de ensaios em uma máquina de EDM que permita obter informações sobre a influência da característica superficial do eletrodo e da peça sobre a vazão do dielétrico na fenda de trabalho.

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DA ARTE

A qualidade superficial da peça usinada pelo processo de eletroerosão por faísca é função da energia de descarga e das condições na fenda de trabalho. Para o melhor entendimento do processo é efetuado uma revisão sobre os fenômenos que se desenvolvem na fenda de trabalho.

#### 2.1. Eletroerosão

O efeitos da descarga elétrica sobre os materiais foram descritos segundo Beuttler [3] pelos pesquisadores Robert Boyler [1694], Josef Pristty [1751], Georg J.Lichtenberg [1777], como o aparecimento de sinais luminosos oriundos de descargas elétricas que deixavam marcas e vestígios nos experimentos desenvolvidos. Mas somente em 1943 os pesquisadores russos B. R. Lazarenko e N. I. Lázarenko [3] estudaram o efeito da remoção de material metálico pela descarga de condensadores, dando início ao processo de usinagem por faísca ou eletroerosão, cujo princípio de funcionamento esta ilustrado na fig.2.1.

O eletrodo (E) e a peça de trabalho (W), ambos condutores de eletricidade separados por uma pequena distância (d) estão mergulhados em um fluido dielétrico (D). Quando a distância entre as superfícies justapostas torna-se pequena o suficiente, para uma tensão (V) aplicada entre o eletrodo e a peça de trabalho, o dielétrico perde sua característica isolante

permitindo descarregar o pulso elétrico. Isto resulta na formação de uma faísca que causa a remoção de material em ambos, eletrodo e peça. O espaço entre o eletrodo e a peça é denominado fenda de trabalho ou GAP. O processo ocorre submerso num líquido dielétrico com baixa viscosidade para os trabalhos de maior precisão, e mais viscoso nas operações de desbaste, em trabalhos de grande porte e nos que utilizam corrente elevada.

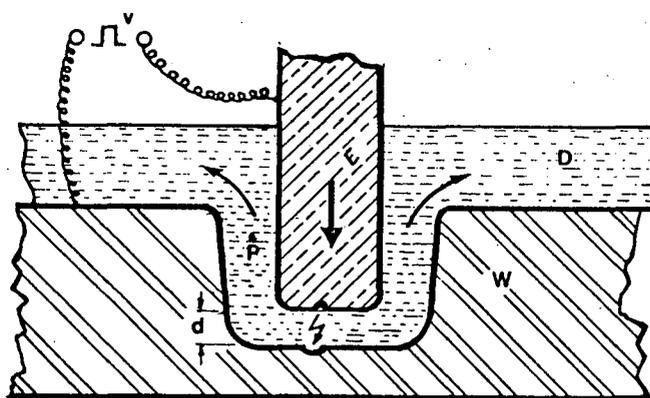


Fig.2.1 Princípio da erosão por faísca.[1]

Foi após 1950, com a invenção do transistor de potência, que tornou-se possível uma nova era na construção de geradores de pulso, permitindo o controle sobre a frequência, duração, e intensidade da descarga elétrica.

No processo que possui circuito por relaxação, onde não há o controle da descarga, a fenda de trabalho desempenha a função de chaveamento. A aproximação do eletrodo da peça permitirá que a tensão do circuito ultrapasse a tensão de ruptura do dielétrico, ocorrendo a faísca e descarregando toda a energia acumulada no capacitor.

Apesar do desenvolvimento dos novos circuitos, os geradores de relaxação ainda são encontrados em máquinas para acabamento muito fino com potência reduzida e pequena relação de contato, ou superfície de trabalho pequena e em instalações de eletroerosão a fio.[2]

Na fig. 2.2 estão representados os circuitos básicos de gerador por relaxação e gerador de impulsos estático, bem como o comportamento da tensão e corrente respectivos a cada circuito [2].

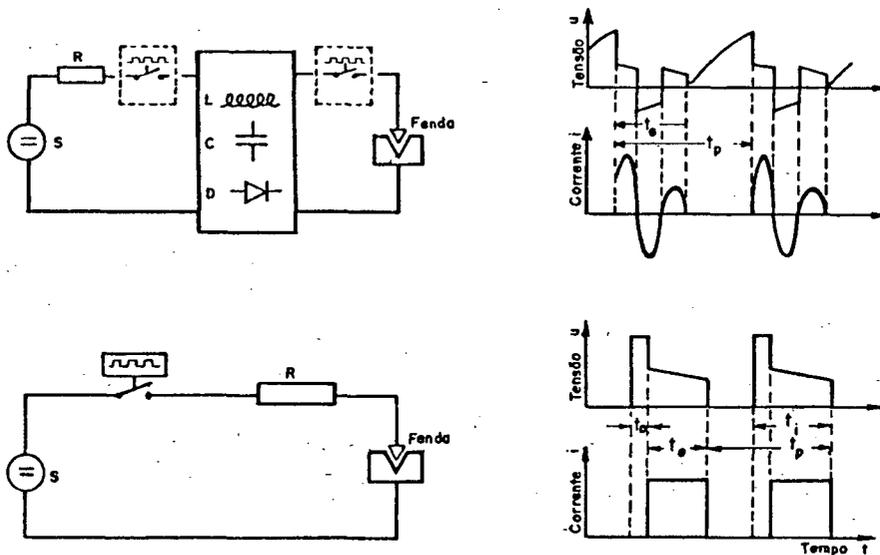


Fig.2.2 - Circuitos do gerador por relaxação e do gerador de impulsos estático [2]

### 2.1.1 Classificação

A norma brasileira ABNT até o presente não possui qualquer forma ou parâmetro para definir e classificar o processo de usinagem por eletroerosão por faísca. Dentro do processo de usinagem a norma alemã DIN 8580 coloca a eletroerosão no grupo principal 3 - SEPARAR, a norma DIN 8590 define e subdivide no grupo 3.4 - REMOVER em três subgrupos: remoção térmica (eletroerosão), remoção química e remoção eletro-química.

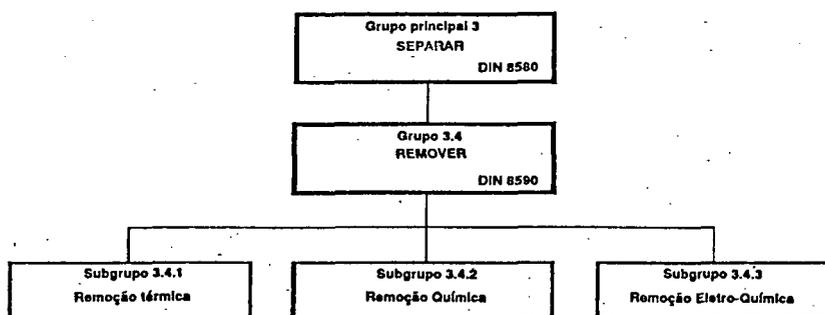


Fig. 2.3 - Classificação dos processos de remoção (DIN 8580)[2].

Por sua vez a norma VDI 3402 [4] descreve a definição e terminologia para o trabalho eletroerosivo. A norma SN-237550 é similar à norma alemã, cujo esquema é mostrado na Fig.2.3.

A REMOÇÃO TÉRMICA se caracteriza pela separação de partículas em estado sólido, líquido ou gasoso por processos térmicos definidos. As partículas separadas são removidas através de forças mecânicas e ou eletromagnéticas. A remoção térmica por descarga elétrica em um meio gasoso utilizado na usinagem de materiais condutores de eletricidade, dá-se, em um

meio dielétrico, através de descargas elétricas entre o eletrodo e a peça. Para este tipo de remoção distinguem-se dois processos: a erosão por faísca e a erosão por arco.

A erosão por arco é largamente utilizada para determinadas operações de corte com precisão limitada, o que define a sua aplicação; por funcionar através de descargas elétricas estacionárias (arcos elétricos) aplicados por curtos intervalos de tempo e local. A ignição ou abertura do arco dá-se por contato entre o eletrodo e peça, interrompidos periodicamente por vibrações axiais induzidas no eletrodo.

A erosão por faísca se caracteriza por possuir um controle sobre os fenômenos elétricos e de tempo utilizados no processo, permitindo que seu trabalho ofereça maior precisão, favorecendo a sua aplicação e uso.

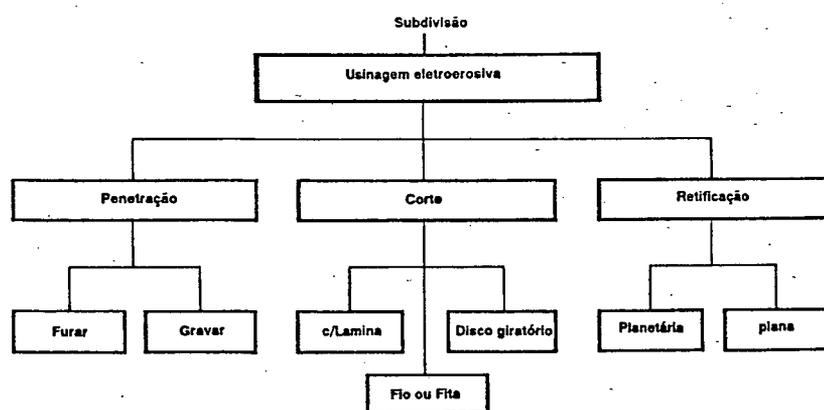


Fig. 2.4 - Subdivisão do processo de usinagem por eletroerosão [4,5].

Nas figuras 2.5 à 2.7 são demonstradas as diferentes formas de eletroerosão :

- PENETRAÇÃO (furar, gravar)
- CORTE (com lamina, fita, a fio, ou com disco giratório)
- RETIFICAÇÃO (planetária, plana).

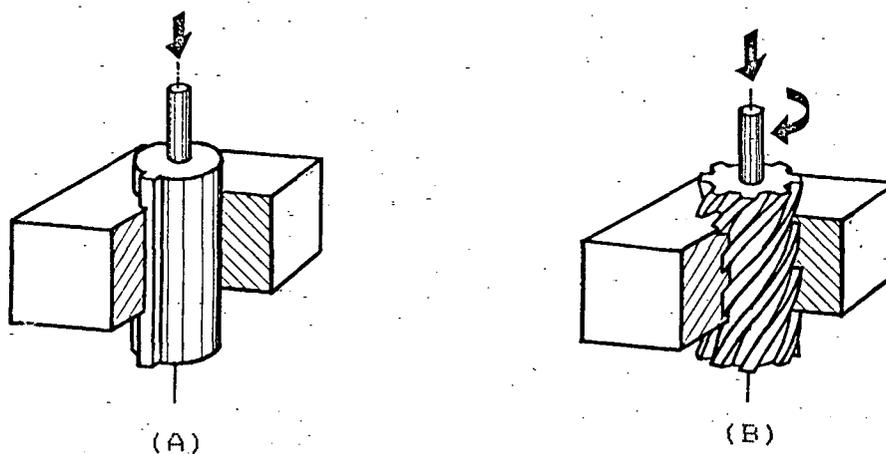


FIG. 2.5 (A-B) - Eletroerosão por penetração - furar [5].

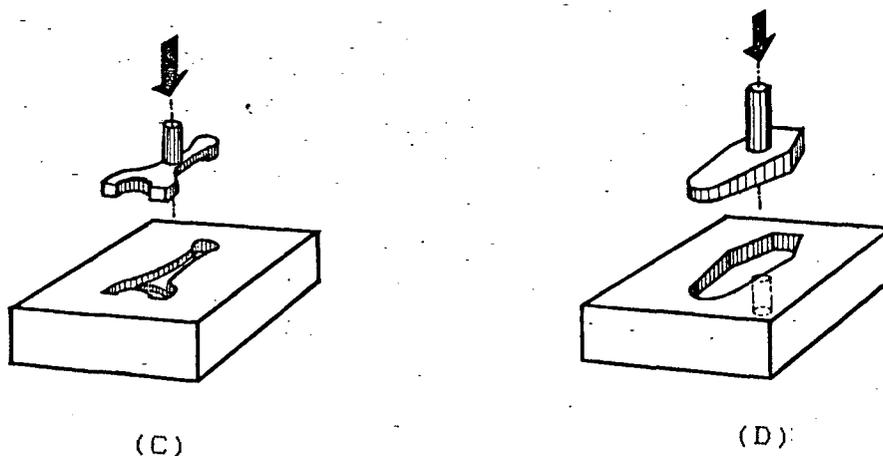


FIG. 2.5 (C-D) - Eletroerosão por penetração - gravar [5].

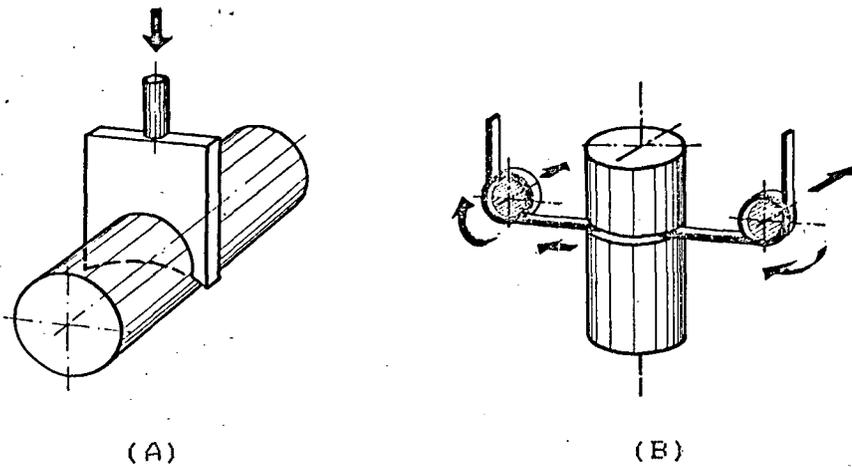


FIG. 2.6 - (A) Eletroerosão, por corte com lamina; (B) por corte com fita [5].

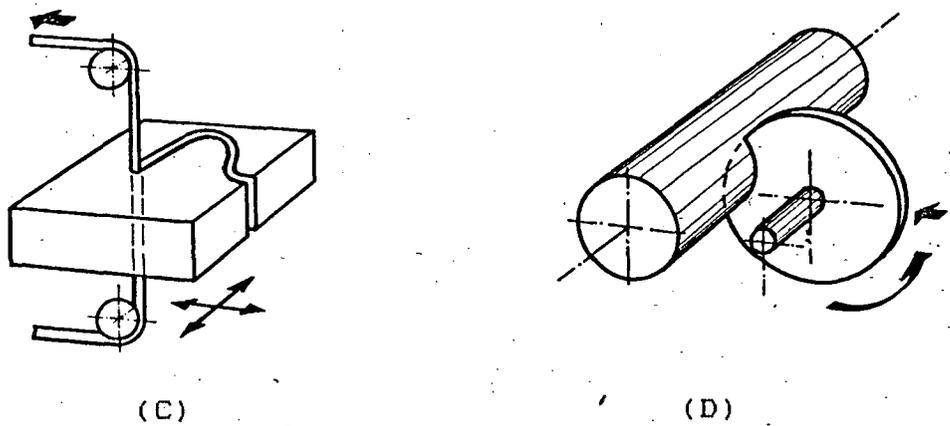


FIG. 2.6 - (C) Eletroerosão, por corte a fio; (D) por corte com disco [5].

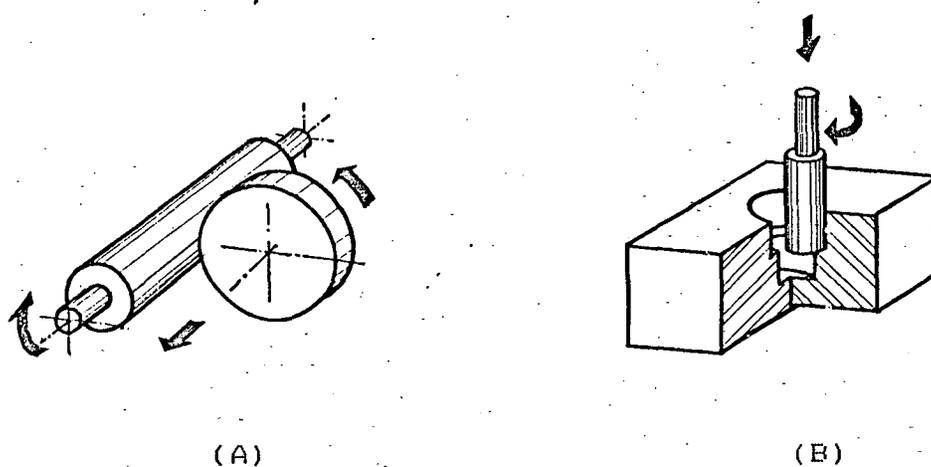


FIG. 2.7 - (A- B) Eletroerosão, por retificação com movimento planetário [5].

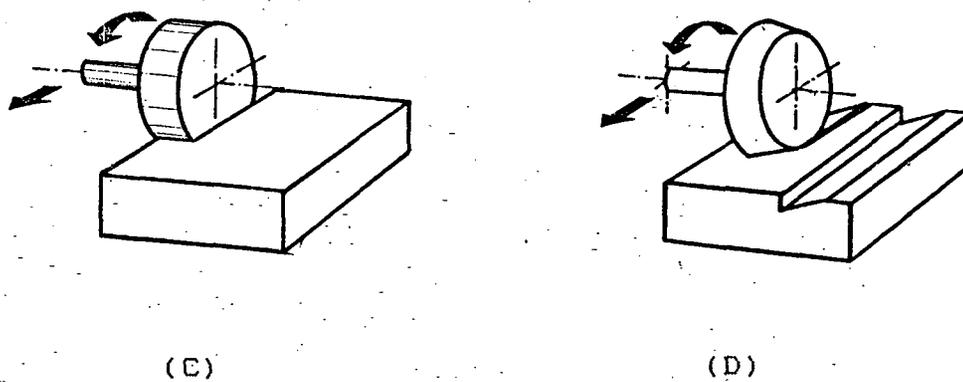


FIG. 2.7 - (C-D) Eletroerosão, por retificação plana [5].

### 2.1.2. Componentes da eletroerosão por faísca

Uma máquina de eletroerosão por faísca, é formada basicamente por três partes distintas, como mostrado na fig.2.8

parte 1 - conjunto de comando e gerador de impulsos elétricos.

parte 2 - sistema de posicionamento e movimentação do eletrodo e da peça de trabalho.

parte 3 - conjunto para circulação do dielétrico.

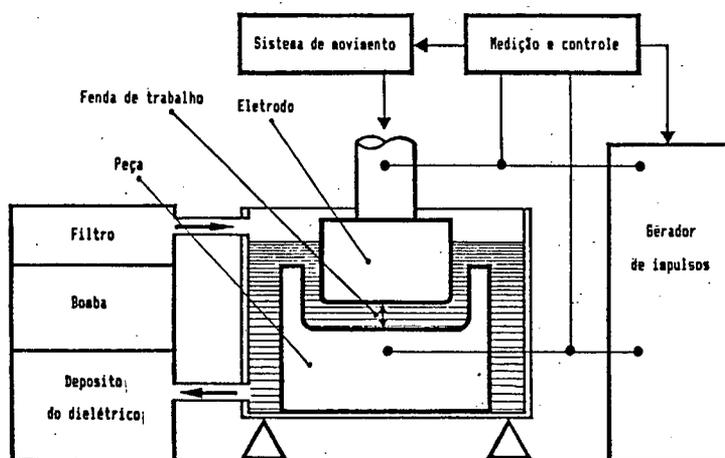


FIG. 2.8 - Esquema básico das partes constituintes de uma máquina de eletroerosão por faísca [6].

**2.1.2.1 - CONJUNTO DO COMANDO E GERADOR DE IMPULSOS ELÉTRICOS** - o comando da máquina de eletroerosão nos sistemas convencionais é manual, fazendo parte do conjunto gerador. Nos últimos anos, com o desenvolvimento da aplicação da informática às máquinas e com os conhecimentos mais específicos de cada função do processo, os comandos recebem também o interfaceamento com o CNC.

Os geradores de impulsos elétricos são diferenciados pelo modo de transformar a tensão, pelo procedimento do comando dos impulsos ou pela natureza da descarga [4,5].

A energia elétrica necessária para as descargas é geralmente fornecida por uma fonte de corrente contínua, por uma fonte de corrente alternada retificada ou por um gerador de corrente contínua. As descargas podem dar-se livremente por ignição e relaxação se o gerador é formado por um acumulador de energia (indutiva, capacitiva, e/ou combinação destes). As descargas podem ser controladas se o gerador for composto de elementos de comutação (tiristor, ou transistor). As descargas podem utilizar polaridade constante ou alternada.

Os geradores de impulso dividem-se nos seguintes tipos:

- a - geradores de relaxação;
- b - geradores rotativos de impulsos;
- c - geradores estáticos de impulsos.

a - Geradores de relaxação - (geradores acumuladores de energia, geradores de relaxação ou de circuito oscilante). Os geradores de relaxação caracterizam-se por ignição espontânea, ocorrendo principalmente descargas oscilantes, que ao final de cada descarga dissipam a energia armazenada (relaxação). A duração e frequência das descargas dependem do dimensionamento dos elementos construtivos elétricos das condições da fenda de trabalho e do fluido dielétrico. Os elementos acumuladores de energia utilizados nestes geradores

Os geradores de impulsos elétricos são diferenciados pelo modo de transformar a tensão, pelo procedimento do comando dos impulsos ou pela natureza da descarga [4,5].

A energia elétrica necessária é geralmente fornecida por uma fonte de corrente contínua, por uma fonte de corrente alternada retificada ou por um gerador de corrente contínua. As descargas podem dar-se livremente por ignição e relaxação se o gerador é formado por um acumulador de energia (indutiva, capacitiva, e/ ou combinação destes). As descargas podem ser controladas se o gerador for composto de elementos de comutação (tiristor, ou transistor). As descargas podem utilizar polaridade constante ou alternada.

Os geradores de impulso dividem-se nos seguintes tipos:

- a - geradores de relaxação;
- b - geradores rotativos de impulsos;
- c - geradores estáticos de impulsos.

a - Geradores de relaxação - (geradores acumuladores de energia, geradores de relaxação ou de circuito oscilante). Os geradores de relaxação caracterizam-se por ignição espontânea, ocorrendo principalmente descargas oscilantes, que ao final de cada descarga dissipam a energia armazenada (relaxação). A duração e frequência das descargas dependem do dimensionamento dos elementos construtivos elétricos das condições da fenda de trabalho e do fluido dielétrico. Os elementos acumuladores de energia utilizados nestes geradores

podem ser, resistores, capacitores, indutores, diodos ou sua combinação, tipos RC, RLC, RLCD ou LC. Este sistema poderá ter elementos comutativos adicionais para adaptar-se às circunstâncias especiais (geradores de relaxação chaveados). Devido à dificuldade de se conseguir controlar os fenômenos físicos e elétricos durante o processo, estes tipos de geradores têm sua aplicação restrita a máquinas para acabamento fino com baixa potência e pequena relação de contato, e máquinas de eletroerosão a fio [2].

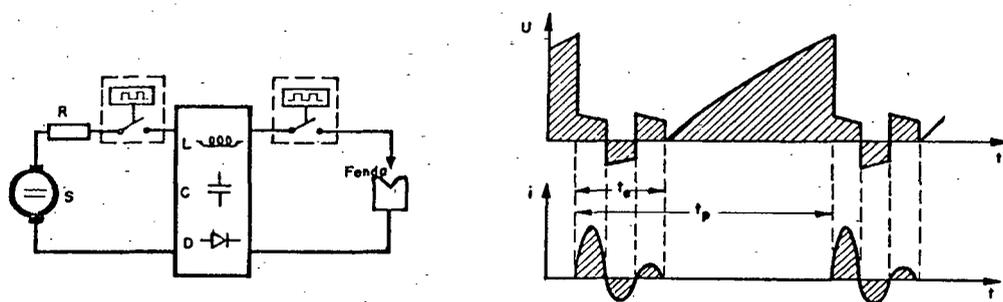


FIG. 2.9 - Circuito básico dos geradores por relaxação [2,4,5].

b - Geradores rotativos de impulso - (máquinas rotativas) estes geradores têm como característica principal a fonte de tensão (gerador rotativo) que está conectada diretamente aos eletrodos ferramenta e peça, e a duração e frequência das descargas dependem das características construtivas do gerador. Os geradores rotativos de impulsos podem ser construído com ou sem comutador e com ou sem retificador. São fontes formadas normalmente por um conjunto

monobloco de motogerador, semelhante aos conversores utilizados em soldagem. Sua aplicação prática é bastante restrita.

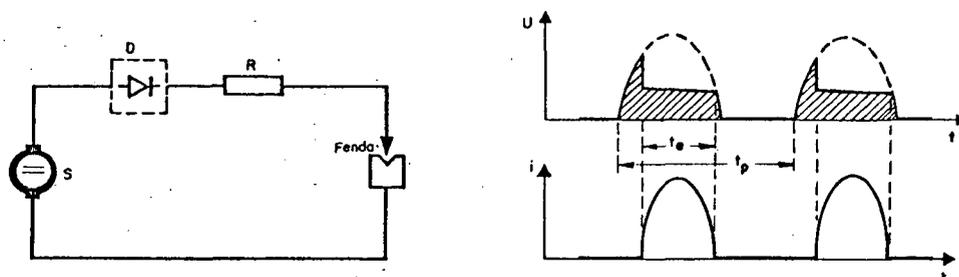


FIG.2.10 - Princípio esquemático dos geradores rotativos [5].

c - Geradores estáticos de impulsos - são caracterizados pelo fato da fonte de tensão ser conectada aos eletrodos ferramenta e peça através de elementos comutadores. A duração e frequência das descargas é controlada pelas características dos componentes eletrônicos. Com o desenvolvimento dos semicondutores, como os transistores de potência, tornou-se possível a construção destes tipos de geradores, pois possibilitaram o controle dos parâmetros elétricos utilizados no processo numa ampla faixa de operação onde a duração do impulso ( $t_i$ ) pode variar de menos de um  $\mu s$  a 2000  $\mu s$ , a relação de contato ( ) de 0,1 a 0,9, a tensão de trabalho em aberto ( $U_1$ ) de 60 V a 300 V e corrente de descarga ( $i_e$ ) de 0 a 300 A. Existem equipamentos mais recentes equipados com o sistema de bipulso, que é a superposição de impulsos aplicado nas condições normais de trabalho especialmente para acabamento fino. Desta maneira é possível aumentar a duração do tempo de descarga reduzindo o tempo da tensão em vazio, (Fig.2.11 (b)).

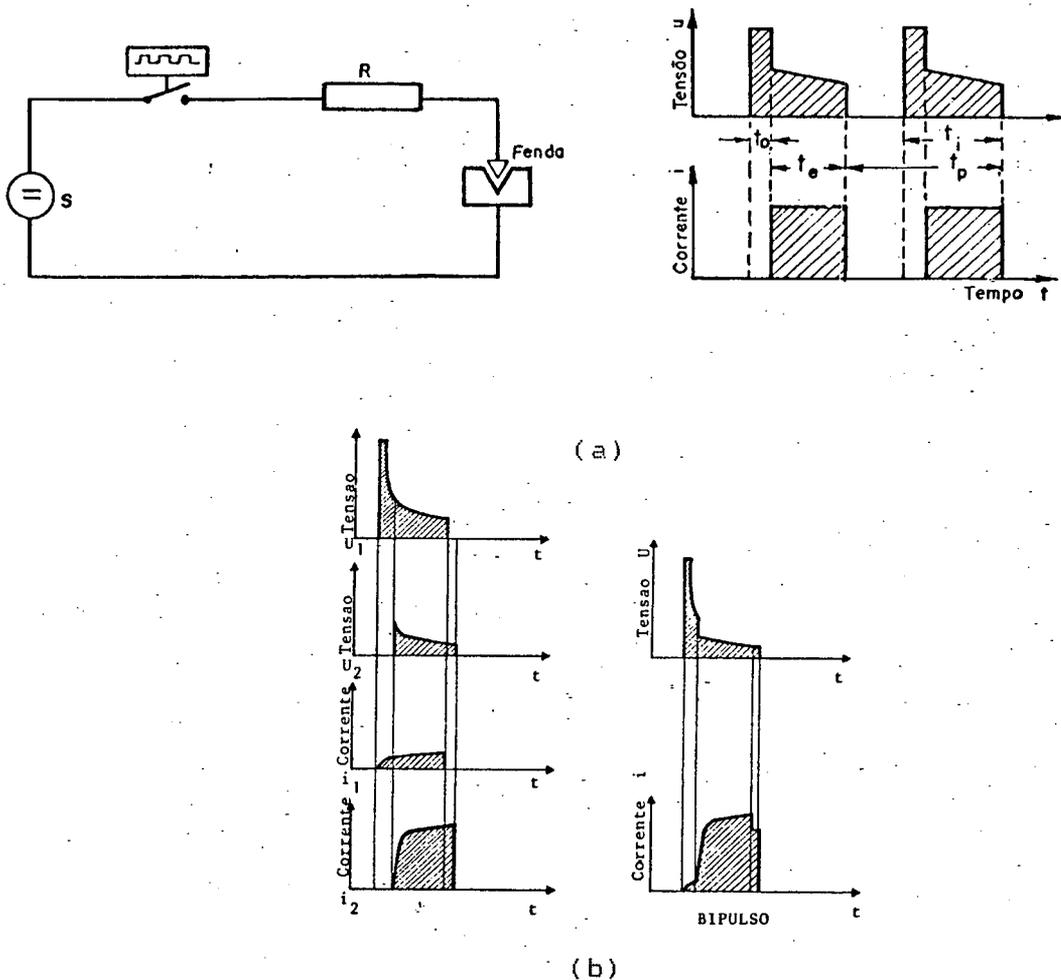


FIG.2.11 - Circuito básico dos geradores estáticos de impulsos  
 (a).E circuito básico de gerador estático com as curvas de Bi-pulso (b) [2,4,5,22].

2.1.2.2 - SISTEMA DE POSICIONAMENTO E MOVIMENTAÇÃO DO ELETRODO E DA PEÇA DE TRABALHO - O sistema para posicionar o eletrodo nas máquinas de eletroerosão por penetração, na direção Z e giro em C, emprega comando hidráulico ou por servomotor elétrico.

A mesa que suporta a peça de trabalho, tem normalmente os movimentos nas direções X e Y. As características básicas para este sistema são normalizadas segundo VDI e SN [4,5] (Fig.2.12).



2.1.2.3 - SISTEMA PARA CIRCULAÇÃO DO DIELÉTRICO - o dielétrico, indispensável no processo de eletroerosão, possui um sistema específico para a sua circulação. Este é formado por um depósito e um sistema de circulação. O depósito pode estar acoplado ou separado da máquina, com as mais diferentes formas internas. Alguns modelos possuem chicanas, telas e divisórias para decantar as partículas erodidas. Também podemos encontrar dispositivos para controlar a temperatura do dielétrico, já que alguns tipos de dielétrico necessitam ser refrigerados bem como estabilizar a temperatura da micro fenda. A refrigeração normalmente é efetuada por uma serpentina que recebe internamente a circulação de um líquido com temperatura mais baixa. A circulação do dielétrico é forçada por uma bomba, tanto para injetar como para aspirar o fluido. Além destes componentes podemos encontrar sistemas de filtragem para reter as partículas sólidas que não decantaram no tanque. Os filtros podem ser em papel, discos comprimidos de fibra de celulose ou mesmo de tela metálica.

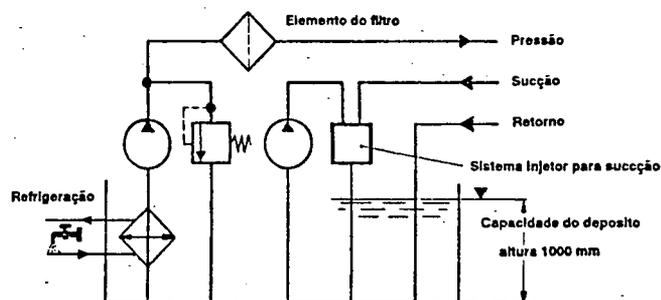


FIG. 2.13 - Mostra esquematicamente as parte constituintes do conjunto para circulação do dielétrico .

### 2.1.3. Princípio Físico

Muitos pesquisadores têm estudado os fenômenos físicos que ocorrem na remoção por faísca. Duas linhas teóricas explicam como ocorre o processo de descarga elétrica:

- 1 - Teoria dos efeitos SKIN, PINCH e sua combinação;
- 2 - Teoria dos fenômenos energéticos.

#### 2.1.3.1 - TEORIA DOS EFEITOS SKIN, PINCH E SUA COMBINAÇÃO

A explicação física do que ocorre em cada etapa foi estudada por Wertheim [6], e muitos outros pesquisadores que dividem a descarga em 3 grandes fases, pela combinação dos efeitos SKIN e PINCH.

Estas 3 fases desenvolvem-se imersas num meio dielétrico, como mostrado seqüencialmente na Fig.2.14.

1ª FASE - RUPTURA DO DIELÉTRICO- esta fase abrange todos os fenômenos que levam à formação do canal de descarga. Ocorre um grande gradiente nas variáveis: tensão e corrente envolvidas. Em decorrência do elevado gradiente de tensão e da corrente ocasionada após a ruptura do dielétrico, com base no efeito SKIN, o fluxo de corrente é quase que exclusivamente conduzido na superfície do canal de descarga formado.

2ª FASE - CORRENTE CONSTANTE - durante a segunda fase da descarga a corrente é constante. Em consequência de forças eletromagnéticas o canal de descarga concentra-se (efeito PINCH)

sobre uma superfície extremamente pequena. Os processos de transferência da energia elétrica em térmica resultam na fusão e vaporização de determinado volume de material, fazendo com que o canal de plasma e a bolha de gás aumentem continuamente.

3ª FASE -CORTE DA ENERGIA ELÉTRICA - na terceira fase, que se inicia com a interrupção do fluxo da corrente, temos novamente o efeito SKIN, como consequência dos gradientes elevados de tensão e corrente o canal de plasma implode, arrastando consigo partículas do material no estado líquido e vaporizado.

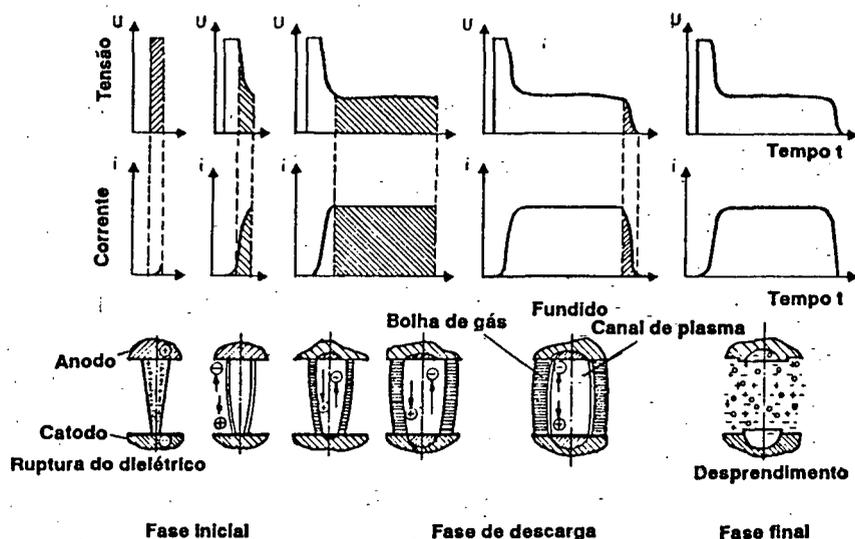


FIG. 2.14 - Representação esquemática dos fenômenos físicos que ocorrem durante uma descarga em eletroerosão [3].

### 2.1.3.2 - TEORIA DOS FENÔMENOS ENERGÉTICOS

Wertheim [6], descreve que os pesquisadores Zolotych, Snoeys und Von Dijck, entre outros dividiram os fenômenos físicos durante o processo de descarga, conforme listado abaixo:

- a) mecanismo de ruptura
- b) desenvolvimento cronológico do canal de descarga
- c) distribuição da energia elétrica
- d) fenômeno de transferência de calor
- e) fenômeno de transferência de matéria

a) mecanismo de ruptura - dá-se por ionização e, por outro lado, pelo calor que vaporiza o meio. Conforme a teoria de ionização, os elétrons que emergem do cátodo são acelerados pelo campo elétrico, chocam-se com as moléculas do meio, e liberam outros elétrons, conduzindo assim uma reação em cadeia. Esta, em um tempo extremamente curto, multiplica os portadores de carga elétrica. Estes fenômenos, que também são conhecidos como "streamer" ou "Stossionisation" ou ainda "ionização por impacto" (fig.2.14.), ocorrem também em água e gás. Descreveu Wertheim [6] que Von Dijck baseando-se nas conclusões de Horsten, Heuvelman e Veenstrá, conclui que a ruptura em si, ocorre por evaporação do meio, decorrente do efeito Joule.

b) desenvolvimento cronológico do canal de descarga - após o fenômeno de ruptura ocorrem, em virtude da pequena superfície de contato entre o canal de plasma e o eletrodo e a peça, grandes densidades específicas de corrente [ $10^6 - 10^7 \text{ A cm}^{-2}$ ]. O fato da

superfície anódica ser mais quente no início da descarga do que a superfície catódica pode ser atribuído ao impacto dos elétrons sobre a superfície anódica. Os elétrons atingem velocidades mais elevadas que os íons positivos e liberam mais energia ao serem desacelerados no impacto sobre a superfície anódica. Este fato pode inclusive levar à ruptura de partículas do material. Também descreveu Wertheim [6] que segundo Obaciu, no início da descarga, em consequência do efeito SKIN, são retiradas partículas do material da região exposta à condução elétrica.

As leis que regem o processo de expansão da bolha de gás e do canal de plasma são descritos por modelos físicos e também analisados experimentalmente. Chega-se à equação do movimento, segundo Smith, pelo emprego da equação de Navier-Stokes, a equação da continuidade e equação dos gases ideais. Acrescentado por Von Dijck o emprego do 1º princípio da termodinâmica no lugar da equação do gás ideal. Pela escolha de condições adequadas de início do processo, o gradiente de pressão e a variação do raio da bolha de gás podem ser calculados. Neste processo o raio inicial da bolha de gás deve ser avaliado subjetivamente. Segundo Zimanyi [6], este raio tem valor finito exatamente após a primeira faísca. Em outros modelos parte-se da premissa de que o raio inicial próximo a zero, o que leva a uma pressão interna infinita [6].

c) distribuição da energia elétrica - após a ruptura do dielétrico a energia elétrica envolvida na fenda de trabalho é dissipado no ânodo, no cátodo e no canal de plasma.

A parcela de energia que é dissipada nos eletrodos é proporcional à queda de tensão anódica e catódica, ao passo que a energia dissipada para o dielétrico é proporcional à queda de tensão no arco.

A queda do potencial no canal de plasma mantém o mesmo estabilizado durante o impulso. O aquecimento sobre o ânodo e o cátodo são proporcionais à queda de potencial anódica e catódica, respectivamente. A teoria do aquecimento dos eletrodos pelo efeito Joule foi descrita por Nekrashevitch e Bakuto segundo Wertheim [6]. Durante um intervalo de tempo extremamente curto a corrente passa através do canal de plasma, atingindo uma pequena superfície tanto no eletrodo como na peça. Em consequência disto, ocorre um contato pontual com elevado gradiente de temperatura, fundindo o material. Após a retirada do material fundido a cratera resultante é uma sobreposição de muitas crateras elementares, que foram formadas por contatos pontuais idênticos.

A maioria dos trabalhos publicados recentemente descrevem o mecanismo de transporte das partículas como consequência de processos de aquecimento, fusão e vaporização.

d) fenômenos de transferência de calor - as fontes de calor em uma descarga elétrica são, por um lado, originadas por processos de transferência térmica entre as superfícies limítrofes dos eletrodos e o canal de plasma, e por outro originadas pelo efeito Joule nas quedas de potencial anódica e catódica. Para a descrição matemática destas fontes lança-se mão da equação diferencial de Fourier. Esta equação é resolvida desprezando-se

perdas de calor para uma fonte pontual, numa superfície adiabática em função do tempo. Os campos de temperatura resultantes em função do tempo, raio e profundidade possibilitam a avaliação da quantidade de material a ser retirado no estado vaporizado e estado líquido.

e) fenômeno de transferência de matéria - na averiguação feita por Zingerman e descrita por Wertheim [6] com descargas elementares unitárias, conseguiu-se apenas de 12 a 15 % de remoção de material total em relação ao material calculado com o uso de isothermas de fusão. Neste caso, pressupõe-se uma fonte superficial constante de calor. Experimentos realizados com descargas seqüenciais demonstraram que a remoção medida por descarga, não atingiu mais do que 5% do calculado pelo modelo matemático. Esta diferença é explicada pela alta pressão interna do canal de plasma, que eleva o ponto de fusão do material, bem como, pelas perdas de calor não consideradas no modelo matemático.

Um modelo que combina a teoria do transporte de calor com o efeito Joule é sugerido por Nekrashevitch e Bakuto [6]. No início da descarga o transporte de calor através do canal de plasma é desprezível e a erosão ocorre segundo os fenômenos de Joule - Lenz (calor-eletromagnetismo). Após a ampliação do canal de plasma a densidade específica da corrente  $i > 10^7$  A.cm<sup>-2</sup> decresce para um valor de  $i < 10^6$  A.cm<sup>-2</sup> e a erosão passa a ocorrer por fusão e vaporização em função do fenômeno de transporte de calor. Com o auxílio das teorias térmicas da erosão, que descrevem o mecanismo de transporte como

consequência de aquecimento, fusão e vaporização é explicada uma série de fenômenos que ocorrem paralelamente : a irregularidade das arestas, a ocorrência de micro-fissuras e a vaporização do fluido dielétrico [6].

Um balanço energético na descarga unitária que leva em consideração além do calor de fusão e de vaporização também as perdas energéticas decorrentes do aquecimento e da composição do fluido dielétrico, foram descritos por Wertheim [6] ampliando o balanço energético acrescentando as parcelas de energia necessárias ao processo de ionização e ao início da abertura do processo. Um cálculo exato da quantidade de material erodido ainda não é possível, em virtude de uma grande quantidade de constantes desconhecidas.

Ainda não foi desenvolvida uma técnica de medição satisfatória que permitisse avaliar quantitativamente o processo de transporte de material e o comportamento durante uma descarga unitária, devido ao volume envolvido ser muito pequeno. O volume da cratera foi determinado com auxílio de microfotografias. Outro método para medir o volume da cratera foi através da medição do material retirado por retificação em diversas camadas da peça e por determinação do perfil da cratera.

A precisão destes métodos deixa a desejar. Por outro lado estes não possibilitam determinar exatamente a erosão, o desgaste e as partículas retiradas. Em contrapartida à grande quantidade de trabalhos sobre os princípios físicos do mecanismo de erosão na descarga unitária, não se conhece trabalhos que se possam comparar aos realizados sobre um regime contínuo. Durante

o trabalho normal de erosão, acidentes que ocorrem aleatoriamente, como curto-circuito, arco, retardo de ignição do processo, influência mútua de descargas, e variação da fenda de trabalho dificultam a análise dos fenômenos físicos envolvidos. Dos parâmetros de trabalho que permitem uma avaliação nos processos físicos que ocorrem na fenda de trabalho, foram principalmente analisados os elétricos. Em uma primeira tentativa de um balanço energético na fenda de trabalho durante o processo com descargas contínuas, só se puderam tirar conclusões limitadas devido ao alto teor de perdas energéticas ( $>90\%$ )[6].

Também os modelos mais recentes de campo de fluxo através da fenda de trabalho somente permitem uma avaliação aproximada entre a sua geometria e o fluxo do fluido dielétrico.

#### 2.1.4. Parâmetros na eletroerosão por faísca

Os parâmetros mais importantes no processo de eletroerosão por faísca são as grandezas elétricas envolvidas [2,4,5,6,8]. O meio fluido é de grande importância para que os fenômenos que ocorrem na fenda de trabalho gerem as condições favoráveis ao desenvolvimento dos efeitos físicos e químicos, dando seqüência ao processo. O fluido tem também a função de lavar e de resfriar a fenda de trabalho, tendo como resultado a condensação das partículas vaporizadas, além de manter o eletrodo e a peça a uma temperatura adequada, dentro dos limites que não prejudiquem os resultados dimensionais desejados na peça.

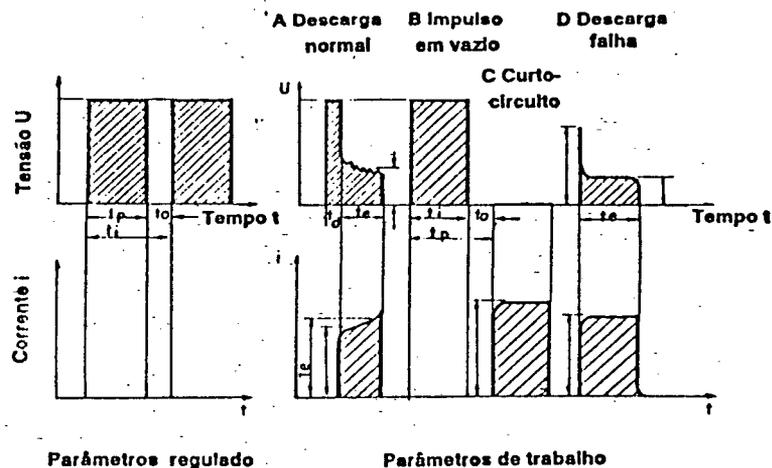


Fig.2.15.- Características elétricas no gerador de impulsos estático [6].

Sendo o gerador de impulsos estático um dos mais difundidos, é necessário que se conheça como se desenvolvem as características elétricas nas diferentes etapas. O comportamento isolado da corrente e da tensão geralmente ocorre numa seqüência

aleatória devido às contínuas variações da fenda de trabalho [2]. Na fig.2.15, as grandezas envolvidas estão definidas segundo as normas VDI e SN [4,5] .

Na fenda de trabalho podem ocorrer quatro formas básicas de descargas (a, b, c, e d), comprovadas pela forma típica da tensão e da corrente como função do tempo ( $U(t)$  e  $I(t)$ ).

A parte (a) da Fig.2.15, caracteriza a descarga normal de uma faísca para uma fenda de trabalho otimizada. Para o tempo igual a zero, a tensão e a corrente são zero. Com o aumento da tensão até romper o dielétrico ( $U_1$ ) a corrente permanece zero; após um tempo de retardo ( $t_d$ ) ocorre a ruptura do dielétrico e a tensão cai até o valor da tensão de descarga; durante o tempo de descarga ( $t_w$ ) a tensão média apresenta uma leve queda e a corrente um aumento. Quando a corrente é interrompida finaliza a descarga de uma faísca.

A parte (b) da Fig.2.15, mostra o impulso em vazio, que ocorre para o caso em que a fenda de trabalho é muito grande. Não houve o rompimento do dielétrico durante o impulso ( $t_1$ ) e, conseqüentemente, a corrente permanece em zero. Não há formação de uma faísca.

A parte (c) da FIG.2.15, mostra um impulso em curto circuito. Com a aproximação demasiada do eletrodo, a fenda de trabalho torna-se tão pequena que ocorre o contato mecânico entre os eletrodos.

A queda de tensão entre os eletrodos cai a zero, e a corrente aumenta até o valor da corrente limite do gerador, não havendo a faísca.

A parte (d) da Fig.2.15, caracteriza uma descarga falha, com um tempo de retardo da descarga ( $t_d$ ) muito pequeno, provocado por micro contatos galvânicos entre partículas de remoção e/ou por uma deionização insuficiente da descarga anterior. A pequena remoção de material de descargas falhas é explicado pela refusão de partículas já removidas e pela má formação do canal de descarga. A seguir serão descritas as abreviaturas dos gráficos e suas funções :

- tempo de retardo ( $t_d$ ) é o espaço de tempo desde o início do aumento da tensão até o início do pulso da corrente. Este tempo é função das condições da fenda de trabalho. é o tempo necessário para a ionização do meio entre os eletrodos que inicia a formação do canal de descarga na fenda de trabalho GAP.

- tempo de duração da descarga ( $t_e$ ), inicia com o início do pulso da corrente até a interrupção da corrente. é durante este tempo que se forma o canal de plasma com forte evaporação do dielétrico na fenda de trabalho, até que a corrente seja interrompida , ocorrendo a implosão do canal de plasma.

- tempo de duração do impulso ( $t_i$ ) é o tempo durante o qual a tensão está ligada (este parâmetro pode ser regulado no gerador de impulsos) que para o caso da descarga de uma faísca será

$$t_i = t_e + t_d \quad (1)$$

- tempo de pausa ( $t_o$ )(zero, off) é o tempo de intervalo entre os impulsos de tensão regulados no gerador. é durante este tempo de pausa que ocorre a deionização no canal de

descarga da faísca anterior, sendo que a próxima faísca poderá ser aleatoriamente em outro lugar .

- tempo de período ( $t_p$ )(período), é o espaço de tempo entre o início de um impulso de tensão e o início do próximo impulso de tensão, ou seja, é a soma dos tempos  $t_1$  e  $t_0$ .

$$t_p = t_1 + t_0 \quad (2)$$

- frequência de impulsos ( $f_p$ ) é o número de impulsos de tensão na unidade de tempo.

$$f_p = 1/t_p \quad (3)$$

- relação de contato ( $\zeta$ ) é a relação entre tempo de impulso ( $t_1$ ) e tempo do período ( $t_p$ ) .

$$\zeta = t_1/t_p = f_p \cdot t_1 = t_1/(t_0 + t_1) \quad (4)$$

No processo de eletroerosão as condições de trabalho na fenda de trabalho são constantemente alteradas, modificando a cada instante os parâmetros da tensão e da corrente, definindo-se assim algumas grandezas :

- frequência de descarga ( $f_d$ ) - número de descargas de faísca na unidade de tempo .

- relação de frequência ( $\lambda$ ) , como sendo a relação entre frequência de descarga e frequência de impulsos.

$$\lambda = f_d/f_p \quad (5)$$

- tensão em aberto ( $U_1$ ) - tensão máxima que ocorre quando a corrente é zero. Este parâmetro normalmente pode ser regulado em estágios no gerador de impulsos pré definindo a tensão para romper o dielétrico .

- tensão de descarga ( $U_{\bullet}$ ) - ocorre durante a descarga quando a faísca está formada e há o fluxo de corrente na fenda de trabalho. Sendo esta grandeza dependente do tempo, ela é definida pela média aritmética de descarga ( $U_{\bullet}$ )

- tensão de trabalho ( $U$ ) - média aritmética da tensão durante a descarga da faísca.

Segundo Wertheim [6], a tensão de trabalho pode ser colocado como um somatório :

$$U = \underbrace{\sum_i^f \int_{t_o}^{t_o} U_o dt}_{\text{pausa}} + \underbrace{\sum_i^f \left( \int_{t_o}^{t_d} \hat{U}_1 dt + \int_{t_o+t_d}^{t_p} U_e dt \right)}_{\text{descarga normal}} + \underbrace{\sum_i^f \int_{t_o}^{t_p} \hat{U}_1 dt}_{\text{impulso em vazio}} + \underbrace{\sum_i^f \int_{t_o}^{t_p} U_s dt}_{\text{curto circuito}} \quad (6)$$

- frequência de impulso em vazio ( $f_1$ ).

- frequência de impulso em curto-circuito ( $f_{\bullet}$ ).

- corrente de trabalho ( $i$ ) é a média aritmética da corrente durante a descarga de uma faísca .

- energia de descarga ( $W_{\bullet}$ ) - é a energia transformada durante a descarga da faísca .

$$W_{\bullet} = \int_{t_d}^{t_p} U_e(t) i_e(t) dt \approx \bar{U}_e \bar{I}_e t_e \quad (7)$$

esta grandeza determina o volume removido por descarga, determinando desta forma o acabamento superficial da peça usinada. Para avaliar a superfície usinada e o desempenho da eletroerosão, serão definidos alguns parâmetros:

- remoção por descarga ( $V_w$ ), como o volume removido por descarga na peça.

- desgaste por descarga ( $V_E$ ) como o volume de material removido por descarga no eletrodo.

- taxa de remoção ( $V_w$ ), é o volume de material removido da peça na unidade de tempo.

- taxa de desgaste ( $V_E$ ) é o volume de material desgastado no eletrodo na unidade de tempo.

- desgaste relativo ( $\mathcal{V}$ ) é a relação entre a taxa de desgaste e a taxa de remoção.

$$\mathcal{V} = V_E / V_w \quad (8)$$

A qualidade da superfície usinada (erodida) é determinada pela medição da rugosidade  $R_z$  e  $R_a$  bem como pela integridade da mesma.

Para que o processo funcione com a máxima eficiência, deve-se garantir condições otimizadas na fenda de trabalho.

De acordo com a equação (6), a tensão de trabalho é o somatório das tensões envolvidas, como tensões em vazio, curto-circuito, impulsos em vazio e a tensão utilizada na descarga elétrica.

A redução ou eliminação de qualquer uma destas parcelas de tensões fará com que haja uma alteração no regime de trabalho.

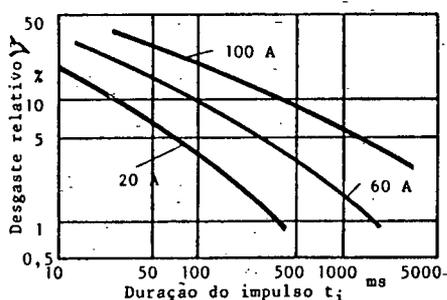
As características do fluido dielétrico, são influenciadas pela temperatura que interfere na sua viscosidade, a contaminação por partículas provenientes do material removido e das reações químicas, pela forma de lavação e também pelo acabamento superficial das superfícies opostas dos eletrodos na fenda de trabalho.

### 2.1.5. Variáveis que influenciam no processo

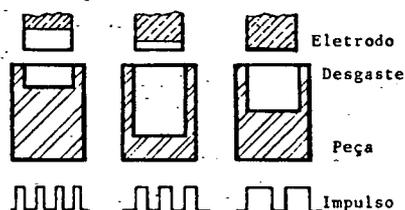
As pesquisas que estudam as variáveis que influenciam o processo têm sido bastante intensas, devido à versatilidade operacional que oferecem, e voltam-se especialmente para a otimização da capacidade de remoção, da superfície de trabalho e do desgaste do eletrodo.

A energia de descarga é a grandeza que exerce a maior influência sobre o processo, sendo que as grandezas como a variação da corrente média de descarga ( $i_m$ ) e o tempo de duração da descarga ( $t_m$ ) podem ser reguladas no gerador de impulsos.

O aumento do tempo de duração do impulso ( $t_i$ ) implica numa diminuição no desgaste relativo ( $\gamma$ ) para intensidade média da corrente de descarga ( $i_m$ ) constante (Fig.2.16 (A)). A Fig.2.16 (B) mostra de forma esquemática o desgaste do eletrodo e da peça em função da duração do impulso [22].



(A)



(B)

FIG. 2.16 - (A) Desgaste relativo em função da duração do impulso [2]. A Fig.2.16 (B) mostra de forma esquemática o desgaste do eletrodo e da peça em função da duração do impulso [22].

Para os geradores estáticos, ao compararmos a taxa de remoção ( $V_w$ ) em função da variação do tempo de duração do impulso ( $t_i$ ) observamos que ocorre um aumento até um valor máximo, vindo a decrescer em seguida Fig.2.17 e Fig.2.16 (B).

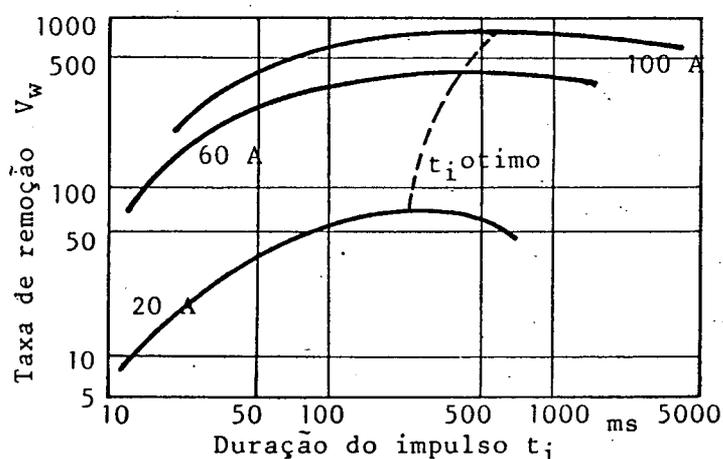


FIG. 2.17 - Taxa de remoção em função do tempo de impulso [2].

O comportamento da curva da taxa de remoção como função do tempo ( $V_w$ ) pode ser explicado como segue: com o aumento do tempo de duração do impulso, inicialmente cresce a parcela de energia que é absorvida para a fusão de material sob o canal de plasma, aumentando a área fundida até atingir uma dimensão máxima otimizada, quando as perdas de energia por transmissão de calor para o eletrodo, peça e para o dielétrico e por irradiação atingem um limite após o qual a taxa de remoção diminui [2].

Segundo Schumacher [20], no início da descarga uma parcela considerável da remoção no ânodo se dá por evaporação, devido à grande densidade de energia sob o canal de descarga. Com o aumento do diâmetro do canal de descarga ocorre uma

mudança no mecanismo de erosão, de forma que no percurso subsequente da descarga, a remoção se dá primordialmente na peça catódica. Com isto explica-se a diminuição do desgaste relativo com o aumento do tempo de descarga, uma vez que a parcela de evaporação no anodo diminui.

Outra variável que tem uma influência sobre o comportamento do processo e seus resultados é a frequência com que ocorrem os impulsos, como demonstra a Fig.2.18, estando incluído o tempo de pausa ( $t_0$ ) e conseqüentemente a relação de contato ( ).

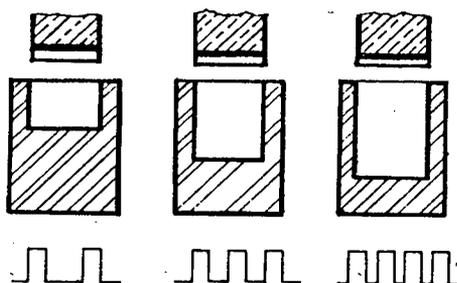


FIG. 2.18 - Representação do desgaste do eletrodo e da peça em função da frequência do impulso [22].

Para um tempo de pausa grande, a relação de contato diminui, significando um mau aproveitamento da energia na unidade de tempo, resultando na redução da taxa de remoção [2].

A polaridade também tem influência sobre a taxa de remoção e o desgaste do eletrodo, dependendo inclusive do material a ser usinado.

Normalmente usa-se a polaridade positiva no eletrodo e negativa para a peça, permitindo o uso do tempo de duração do impulso, maiores, especialmente para as operações de desbaste.

A polaridade inversa, ou seja, negativa no eletrodo e positiva na peça, só faz sentido para operações onde são aplicados tempos de descarga extremamente curtos ( $t_w < 10 \mu s$ ) ou para usinar materiais como metal duro, titânio ou alumínio.

Como já visto anteriormente, a lavagem influi no processo, e especialmente nas operações de erosão profunda, mantendo a estabilidade do processo. O gráfico 2.19 mostra a relação da vazão ( $q$ ) sobre a taxa de remoção ( $V_w$ ) e o desgaste relativo ( $\gamma$ ), mostrando que a vazão do fluido dielétrico assume seu grau de importância sobre os valores tecnológicos e sem a qual o processo deixa de funcionar gerando carvão ou curto circuito devido à não remoção dos produtos da erosão.

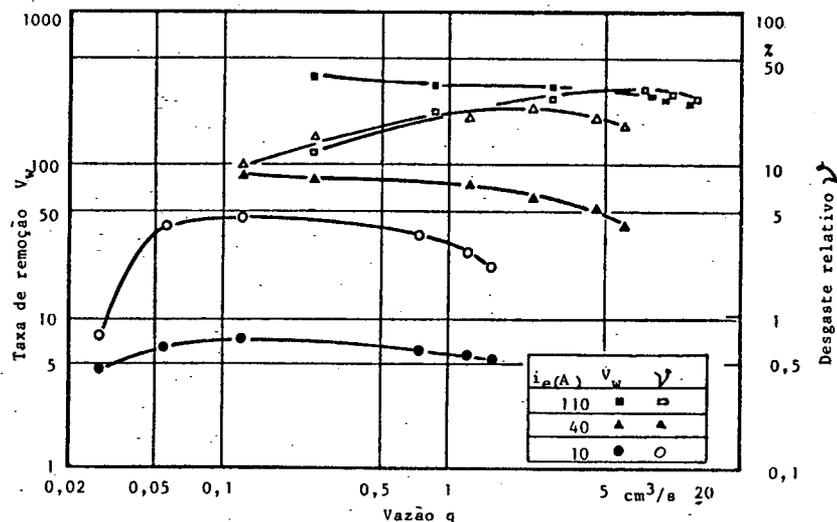


FIG. 2.19 - Influência da vazão sobre a taxa de remoção e o desgaste relativo [2].

## 2.2. Dielétrico

A operacionalização do processo de eletroerosão necessita de um fluido dielétrico para seu funcionamento, havendo no mercado uma gama bem diversificada à disposição dos usuários, que vai desde água deionizada, querosene desodorizado, querosene comum, óleo mineral até os óleos sintéticos, que são elaborados para melhor atender as necessidades do processo [21,22].

Um dielétrico deve possuir algumas características indispensáveis para ser empregado na eletroerosão:

1) Possuir uma boa característica de isolamento, ou seja, uma alta rigidez dielétrica. Deve manter esta característica dielétrica mesmo quando contaminado por partículas de remoção ou de decomposição do próprio dielétrico.

2) Ser bom condutor de calor e ter elevado calor específico. Com isto se garante uma boa refrigeração, condensação e resolidificação das partículas vaporizadas e fundidas oriundas das descargas, mantendo a temperatura do eletrodo e peça estáveis. Com a constância da temperatura deve manter o equilíbrio dos parâmetros que envolvem os fenômenos na fenda de trabalho.

3) Apresentar baixa viscosidade, para poder escoar através da fenda de trabalho, removendo as partículas e fragmentos erodidos da peça e do eletrodo com pequena perda de carga. Uma fluidez inadequada pode resultar na formação de arco e, como consequência levar a formação de carbono na fenda de trabalho, interrompendo o desenvolvimento do processo com prejuízos para o eletrodo e à peça.

Nos trabalhos que utilizam corrente elevada (acima de 80 A), normalmente nas operações de desbaste, onde a fenda de trabalho é grande usam-se o fluido dielétrico com maior viscosidade [4], aplicando os menos viscosos para trabalhos de acabamento.

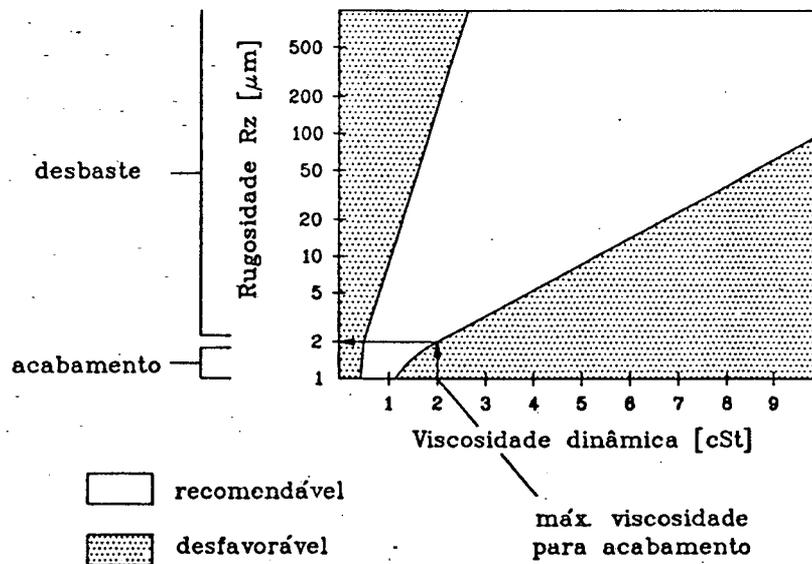


FIG.2.20 - Observa-se um diagrama da viscosidade dinâmica em função da rugosidade superficial desejada [22].

4) Ter alto ponto de fulgor, diminuindo sua evaporação e como consequência reduzindo os riscos de inflamabilidade ou explosão, já que a temperatura da faísca atinge de 9.000 K a 32.000 K [3].

5) Ser quimicamente inerte, para não reagir produzindo produtos que alterem suas propriedades e ataquem os materiais e equipamentos envolvidos (máquina, dutos, depósito, eletrodo, peça, bomba, filtros, instrumentos de medição, ....)

6) Não seja agressivo ao operador. É comum o uso de querosene desodorizada, óleo diesel e similares como materiais dielétricos. Estes hidrocarbonetos fracionados leves classificam-se em aromáticos, alifáticos e cicloparafínicos, possuindo a propriedade de extrair a lanolina da pele, deixando-a ressequida, e quebradiça, levando muitas vezes a hemorragias cutâneas. Óleos deixados por longo período sobre a pele podem bloquear os folículos respiratórios e os poros da pele, vindo a produzir manchas escuras e inflamações localizadas.

A experiência tem mostrado que um dielétrico deve possuir um mínimo de contaminação residual, com minúsculas partículas em suspensão para facilitar a ionização do processo [2,3,13].

O fluido dielétrico nos processos de EDM, está sujeito às condições variadas de contaminação durante o processo de erosão por faísca, resultantes da decomposição química e fracionamento do dielétrico devido a elevada temperatura que ocorre nas faíscas na fenda de trabalho. A variação da taxa de remoção causada pela alternância do regime de trabalho e as mudanças na taxa de fluxo do dielétrico, são as variáveis que podem influenciar na contaminação do fluido na fenda de trabalho. São aspectos negativos ao processo quaisquer reações químicas que possam alterar sua composição.

As características do fluido dielétrico contribuem diretamente na qualidade de uma descarga e na eficiência do processo. A rigidez dielétrica, pode mudar substancialmente com o tempo.

Sabe-se que as rápidas mudanças na tensão que ocorrem na fenda de trabalho, perturbam a estabilidade do processo, gerando a

variação da contaminação resultando nas modificações da rigidez dielétricas [14].

Experimentalmente, Jeswani [18] estudou as influências da adição do pó de grafite ao querosene usado como fluido dielétrico em máquinas de eletroerosão por faísca. Com a adição de cerca de 4 gramas de pó de grafite com granulometria de 10  $\mu\text{m}$  por litro de querosene, obteve um aumento na taxa de remoção do material na ordem de 60 %, com um aumento na taxa de desgaste do eletrodo de 15 %. A taxa de desgaste relativo reduziu em 28 %. Atribuiu estes efeitos à redução da tensão de ruptura do fluido dielétrico. A contaminação do fluido foi monitorizada durante o processo através de fotocélulas (fotodiodo ou LDR).

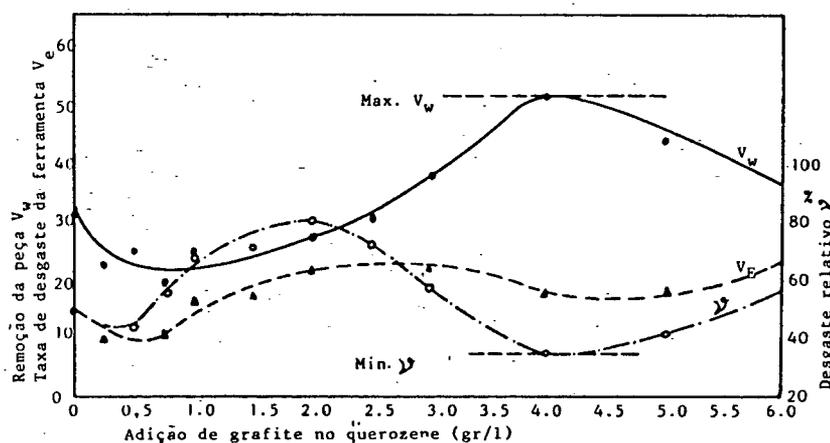


FIG. 2.21 - Efeito da adição de grafite ao querosene na taxa de remoção, taxa de desgaste da ferramenta e desgaste relativo [18].

Na Fig.2.21 observa-se a variação da taxa de remoção ( $V_w$ ), da taxa de desgaste ( $V_e$ ) e do desgaste relativo ( $V$ ) em função da variação da adição de grafite por litro de dielétrico. A contaminação do fluido dielétrico, necessária para a ruptura do dielétrico, deve ser formada por partículas iguais ou menores que  $0,01 \mu\text{m}$  [1,15].

O sistema de filtro que equipa as máquinas de eletroerosão por faísca oferece uma capacidade de filtragem de  $5 \mu\text{m}$ , para as partículas que se encontram no dielétrico, auxiliando com esta contaminação residual o processo de ionização e a estabilidade da fenda de trabalho, que é considerada estável para uma oscilação de 2 centésimos [3].

O querosene usado como fluido dielétrico para oferecer segurança, deve possuir um ponto de fulgor de  $210^\circ$  a  $260^\circ \text{C}$ , e uma baixa viscosidade. A temperatura do fluido durante o funcionamento do processo deverá ser no máximo de  $38^\circ$  a  $45^\circ \text{C}$  no reservatório, e a temperatura na cuba de trabalho, próximo a faísca, não deve ultrapassar de  $60^\circ \text{C}$  [3].

### 2.2.1. A lavagem na eletroerosão

A lavagem no processo de eletroerosão é efetuada por um fluido dielétrico, que participa dos fenômenos que ocorrem na fenda de trabalho e tem a função de retirar as partículas erodidas, além de atuar no equilíbrio térmico do sistema. Nos processos normais de eletroerosão por penetração, especialmente em cavidades profundas, a lavagem assume uma importância especial. A dificuldade para retirar os cavacos torna-se maior, pois os fragmentos são condutores e o espaço lateral entre o eletrodo e a peça é pequeno (em torno de 0,04mm)[3]. Normalmente usam-se procedimentos especiais de lavagem para cada caso, como por pressão ou por sucção através da peça, ou através do eletrodo, múltiplos furos, lavagem intermitente programada e/ou combinação destes, dependendo muito da experiência do operador ou programador da operação.

Na lavagem costuma-se observar alguns aspectos, como o sentido do fluxo do fluido. Se for de baixo para cima, oferece a vantagem de homogeneizar a temperatura do dielétrico, que na cuba de trabalho tem sua entrada pela parte inferior e a saída na sua parte superior, servindo como controle do nível do fluido.

Quando se emprega a lavagem por pressão localizada do dielétrico, sempre que possível deve-se aplicar o sentido de baixo para cima, o que facilita a saída dos gases cuja tendência natural é subir [3]. Em forjarias onde as peças e eletrodos são de grandes dimensões e trabalham com corrente elevada, os gases emitidos no processo possuem força suficiente

para mover o eletrodo e/ou a peça, alterando seu posicionamento e também a dimensão da fenda de trabalho, dificultando a precisão do trabalho e a estabilidade das centelhas.

A sucção do fluido através do eletrodo ou da peça, tem sido em muitos casos a solução de problemas que ocorrem na fenda de trabalho, incluindo a retirada dos gases juntamente com as partículas resultantes da erosão.

A lavação intermitente programada, e os procedimentos por pressão, sucção ou combinados são largamente aplicados com bons resultados na indústria. A lavação na fenda de trabalho, além dos aspectos citados tem especial importância, quando se deseja produzir peças com precisão, sendo também influenciada pela geometria da fenda de trabalho, de sobremodo em componentes com cantos vivos onde, devido ao acúmulo de detritos nas regiões de mudança de direção do dielétrico, é provocado um desgaste maior dos eletrodos.

Nos casos do processo de erosão com descargas sequenciais são muitas as probabilidades de que os parâmetros da máquina sejam ajustados como função dos procedimentos da lavação.

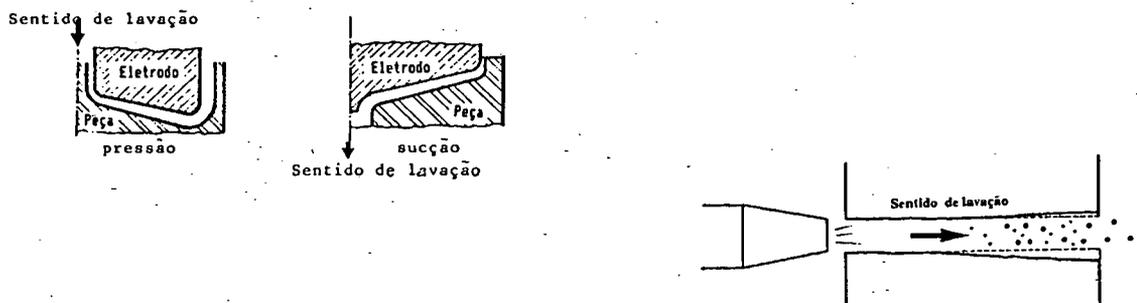


FIG. 2.22 - Desgastes em função do sentido da lavação [11].

As representações nas Fig.2.22. mostram a influência da lavagem por pressão e sucção na fenda de trabalho resultando nas diferentes características de remoção da peça e o desgaste do eletrodo. Observa-se que a fenda de trabalho é maior na região de saída do dielétrico devido ao líquido estar mais contaminado por partículas da erosão e a presença dos gases emitidos pelo processo [2,11].

Desejando ampliar as formas de remoção das partículas erodidas da fenda de trabalho, pesquisadores estudaram os efeitos magnéticos na limpeza da fenda de trabalho, montando um sistema magnético com polos (N-S) em dois lados da peça(Fig.2.23). Trabalhando com um eletrodo e uma peça cilíndrica de mesmo diâmetro, o fluido dielétrico é alimentado perimetralmente na região não obstruída pelos ímãs. A saída do dielétrico se dá sobre os ímãs, dispostos na altura da fenda de trabalho. Observando o perfil transversal da peça nas direções de alimentação e de saída do dielétrico, verifica-se que há uma remoção mais acentuada de material na região dos ímãs, o que também permite concluir sobre uma fenda de trabalho maior na saída do dielétrico. Observou Bruyn [12] que além das partículas ferrosas removidas da peça, existem fragmentos de cobre do eletrodo, carvão proveniente da desintegração do dielétrico e particularmente os vapores na fenda de trabalho que devem ser transportados para fora da fenda de trabalho. Sempre permanecem resíduos que o efeito magnético não remove. Mesmo com este sistema o desgaste tanto da peça como do eletrodo são menores com entrada do fluido limpo [2,11,12,15] como mostrado de forma esquematizada na Fig.2.23

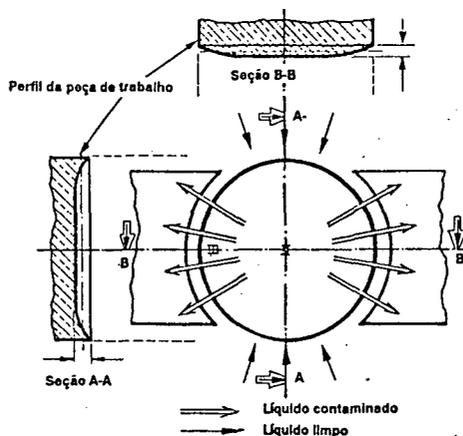


FIG. 2.23 - Direção média do líquido sob o efeito de ímãs [12].

Wirtsch [13] por sua vez efetuou um estudo sobre a função dos detritos na fenda de trabalho durante a usinagem por descargas elétricas. Demonstrou que um fluido contaminado mesmo que apenas por partículas sub-microscópicas, que se orientam sob a influência do campo elétrico, tem papel importante na ignição da centelha. Mostrou ainda que uma lavagem normal produz melhor resultado no processo se forem removidas apenas as partículas mais grosseiras proveniente da eletroerosão.

A taxa de remoção aumenta com a maior frequência das descargas e com tempos de pausa menores [2,13,14]. Na lavagem da fenda de trabalho deve-se levar em conta que o tempo de retardo para a ruptura do dielétrico decresce com o aumento da contaminação do fluido dielétrico [15].

Outros pesquisadores estudaram um método de auto-lavagem, que consiste na ação do movimento do fluido dielétrico.

por meio de um movimento complementar do eletrodo em relação a peça, não necessitando de pressão ou sucção adicional.

Sua aplicação é uma alternativa para aquelas operações de trabalho onde não é possível a lavagem convencional através de furos por pressão ou sucção.



FIG. 2.24 - Movimentos básicos do método de auto lavagem [16].

A Fig.2.24, mostra de forma esquemática a seqüência dos movimentos, que se assemelham a uma usinagem planetária apenas com movimentos lineares, apresentando um movimento a mais no movimento proposto. Após interromper os impulsos elétricos o eletrodo se desloca lateralmente e depois para fora da cavidade [16]. Com isto facilita-se a entrada do dielétrico na cavidade sob o eletrodo. Em seguida o eletrodo é deslocado para o lado oposto da cavidade e reintroduzido na cavidade. O fluido é expelido através da fenda de trabalho ampliada. De certa forma esta movimentação pode ser comparada com a movimentação planetária, onde o auxílio na lavagem é semelhante.

Nas Fig.2.25 a 2.28, estão representadas de maneira esquemática as diferentes formas mais usuais de lavagem aplicadas à fenda de trabalho no processo de eletroerosão por faísca e imersão (por pressão, por sucção, intermitente ou limpeza sincronizada e combinando as formas de lavagem).

Formas usuais de lavação:

- por pressão

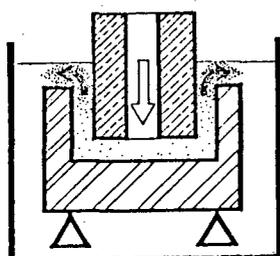


FIG. 2.25

1 - O fluido é injetado através do eletrodo e as partículas (cavacos) são retirados pelos lados.

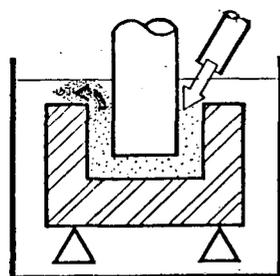


FIG. 2.25

2 - O fluido é injetado externamente ao eletrodo. Este modo de lavar é também usado na forma intermitente.

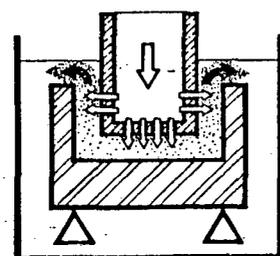


FIG. 2.25

3 - Com o uso de grafite o fluido é injetado internamente ao eletrodo a altas pressões através da sua porosidade

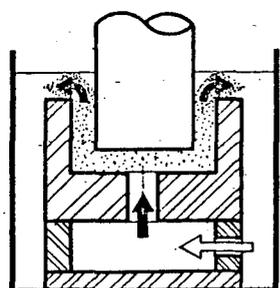


FIG. 2.25

4 - O fluido é injetado através da peça

- por sucção

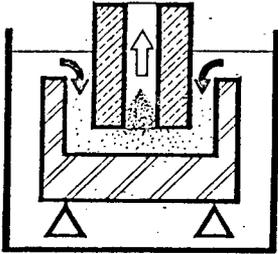


FIG. 2.26

1 - A sucção é efetuada internamente ao eletrodo

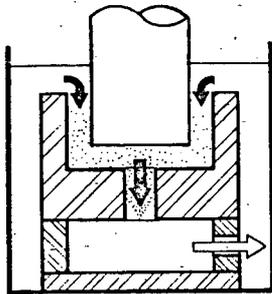


FIG. 2.26

2 - A sucção é através da peça

- intermitente ou limpeza sincronizada

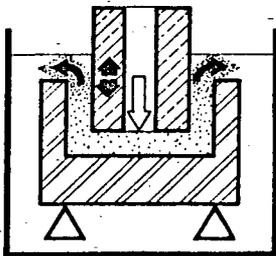


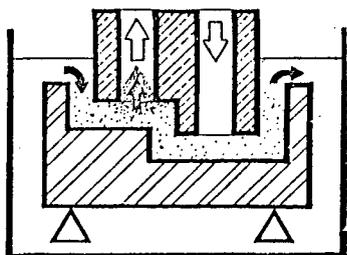
FIG. 2.27

- este modo de lavação pode ser programado no painel da máquina, e quando o eletrodo tiver saído da peça é injetado um jato de fluido na região erodida, procedendo uma movimentação e

com isto uma melhor remoção das partículas.

- combinando as formas de lavação

FIG. 2.28



1 - Para esta condição a pressão e a sucção através do eletrodo são aplicados numa mesma operação de trabalho.

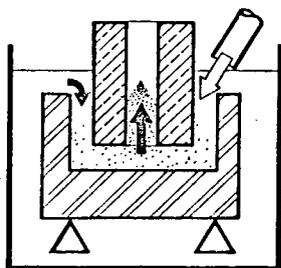


FIG. 2.28

2 - O fluido é injetado externamente e succionado através do eletrodo.

### 2.2.2. Característica dos fluidos dielétricos

Os fabricantes de fluido dielétrico têm colocado no mercado uma gama significativa de produtos, oferecendo alternativas para seu uso. Na tabela abaixo descrevemos as características de algumas marcas de fluido dielétrico hidrocarbonetados encontrados no mercado nacional [10].

FABRICANTE	MARCA COMERCIAL	DENSIDADE [g/cm <sup>3</sup> ]	PONTO DE FULGOR [°C]	VISCOSIDADE [mm <sup>2</sup> /s] cSt
RENOLUB	RATAK FEL	0,787(15°C)	88	2,3(40°C)
distrib. ENGEMAQ	UHIGON RE	0,785	> 300	2,4
TEXACO	300 OIL	0,849(20°C)	133	4,4(40°C)
CASTROL	PC-116A	0,796(20°C)	60	1,53(40°C)
HOUGHTON	ELETRO CUT 412	0,805(20°C)	60	1,4 / 1,6
MOBIL OI	VELOCIT 3	0,820(20°C)	104	2,8 / 2,4
AGEMA	AGETRON 4795	0,783	73	2,63

TABELA 2.1 - Fluidos dielétricos para eletroerosão por faísca.

Os querosenes são complexas misturas de hidrocarbonetos, tendo faixa de destilação entre 150 °C e 275 °C.

O ponto de fulgor é de 46 °C, a densidade de 0,803 (g/cm<sup>3</sup>) e a viscosidade 1,98 (mm<sup>2</sup>/s) cSt.

Além dos hidrocarbonetos citados empregam-se água destilada e deionizada, bem como água com aditivos especiais inibidores de corrosão.

### 2.2.3. Aspectos do dielétrico no processo

As máquinas de eletroerosão são produzidas para operação como desbaste e/ou acabamento com diferentes tamanhos de cuba sempre adequado ao seu uso. Em função destes aspectos é usado um dielétrico de alta viscosidade para as operações de desbaste, sendo indicado para as condições onde se aplicam elevadas correntes e grande fenda de trabalho. Já para as condições de acabamento e/ou pequena remoção onde se usam pequenos valores de corrente e pequena fenda de trabalho o fluido dielétrico mais adequado é o que apresenta menor viscosidade.

Outro aspecto do fluido dielétrico e que não consta na maioria dos catálogos de fabricantes é a rigidez dielétrica, que influi diretamente no início da abertura da descarga. A rigidez dielétrica do querosene é em média de 9,5 kV. O óleo para transformador é também um fluido dielétrico proveniente de óleo básico parafínico ou óleo básico naftênico, normalmente apresentando as seguintes características [10]:

	óleo básico	
	parafínico	naftênico
- densidade [g/cm <sup>3</sup> a 20 °C]	0,8522	0,8905
- ponto de fulgor [ °C]	175	146
- viscosidade [cSt 40°C]	10,15	10,03
- rigidez dielétrica [kV]	> 30	> 30
nome comercial: SHELL TRANSFORMADOR		

TABELA 2.2 - Características do óleo de transformador elétrico.

## CAPÍTULO 3

## PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Para o desenvolvimento dos experimentos e para determinar a influência do dielétrico no processo de eletroerosão EDM, projetou-se um banco de ensaios constando basicamente de uma máquina EDM. Máquinas convencionais de eletroerosão construídas para uso nas empresas são equipadas apenas com os instrumentos e dispositivos para seu funcionamento regular. Já para seu uso em laboratório é necessária a adição de instrumentos e dispositivos específicos. Havendo a necessidade de se obter dados reais e básicos da vazão do dielétrico na fenda de trabalho para servir como parâmetros comparativos com os valores resultantes dos experimentos, houve a necessidade da implementação de um rotâmetro e um dispositivo para medir a abertura da fenda de trabalho.

Com o uso destes dispositivos e o gerador de impulsos desligado, variando a abertura da fenda de trabalho, registram-se as vazões do fluido dielétrico que passa entre a superfície do eletrodo e a superfície da peça nas diferentes pressões de trabalho. Tanto a superfície da peça como do eletrodo são fabricadas com uma rugosidade  $R_t$  de 10  $\mu\text{m}$ . O dispositivo de regular a fenda de trabalho é imerso no dielétrico dentro da cuba, para simular uma situação real.

Confeccionaram-se eletrodos e peças específicos para os ensaios de medição da vazão com uma rugosidade obtida pelo processo de eletroerosão. Estes pares de eletrodo-peça permitem registrar os valores de vazão e pressão para diferentes fenda de trabalho.

### 3.1. Condições de lavação

A lavação na fenda de trabalho pode ser por pressão, sucção, intermitente ou ainda a combinação destes. Para cada tipo de trabalho existe uma forma de lavação mais adequada, que depende do trabalho final desejado.

Nos experimentos efetuados a forma básica de lavação foi por pressão, alimentando o dielétrico internamente ao eletrodo, através de um furo com 4 mm de diâmetro. Empregou-se como fluido dielétrico o querosene comercial.

### 3.2 Levantamento das características do gerador de impulsos.

As informações que constam no manual de instalação e operação fornecido pelo fabricante são dirigidas aos operadores de máquinas de eletroerosão que atuam diretamente no sistema produtivo. Os parâmetros técnicos registrados, são geralmente os valores médios obtidos após longo período de ensaios não interessando detalhes específicos devido a diversificação de variáveis que participam do processo em função de cada trabalho a ser executado.

Para permitir uma análise mais detalhada das influências dos parâmetros de entrada sobre o resultado do trabalho, para a faixa de valores a serem usados neste trabalho, efetuou-se um levantamento das características do gerador de impulsos. O levantamento das características do gerador de impulsos para uma faixa de valores a serem usados neste trabalho foi com a instalação de um osciloscópio de memória modelo PM 3305 (U) 35 Mhz da Phillips, um plotter modelo PM 8153/1 da Phillips para o registro dos gráficos, uma ponteira Tektronix modelo A 6302 (N9B039036) e um amplificador de corrente (Current Probe Amplifier) modelo AM 503, cuja montagem está mostrada de forma esquemática na Fig.3.1.

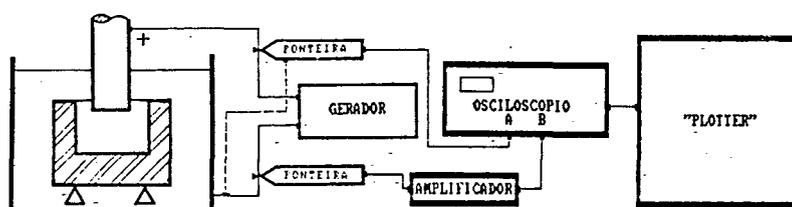


FIG. 3.1 - Esquema da montagem dos instrumentos para o levantamento das características do gerador de impulsos.

### 3.2.1. Procedimento adotado para o levantamento dos dados.

Usou-se como material da peça o aço VC-131 temperado com superfície retificada, como material do eletrodo o cobre eletrolítico com diâmetro de 20 mm e superfície frontal usinada e como fluido dielétrico o querosene. Para cada ensaio os parâmetros desejados foram regulados no painel da máquina de eletroerosão e a cuba enchida com dielétrico. Sempre no início dos trabalhos deixou-se o equipamento funcionando com circulação do fluido dielétrico por um período nunca inferior a 30 minutos, para estabilizar o sistema e as temperaturas, dando início ao processo. Registrou-se no osciloscópio a tensão e a corrente que ocorrem na fenda de trabalho (Fig.3.2 e 3.3).

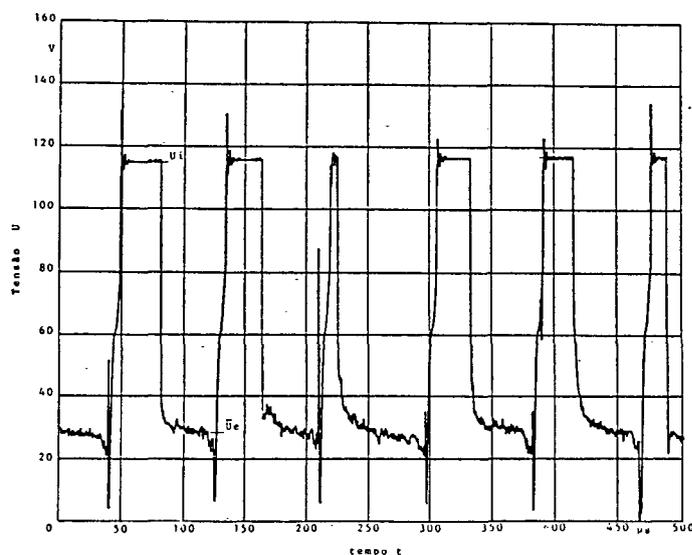


FIG. 3.2 - Curvas da tensão em função do tempo.

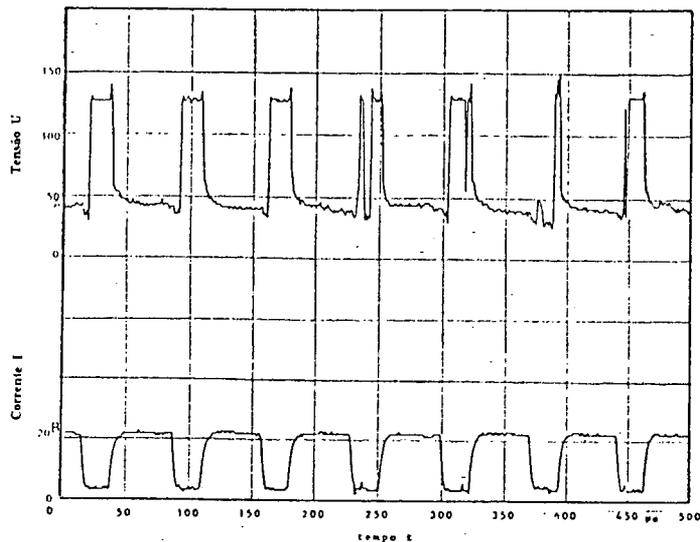


FIG. 3.3 - Comportamento da tensão e da corrente num determinado instante. A curva superior é da tensão e a inferior é da corrente.

As curvas registradas através do plotter oferecem a possibilidade de se medir as características de tensão, corrente e tempo para um ou vários impulsos. Introduzindo-se os valores obtidos no ensaio na equação (4) da secção 2.1.4, calcula-se a relação de contato.

Na tabela 1 do anexo A, estão registradas as características do gerador de impulsos para uma faixa de valores obtidos e calculados.

### 3.3. Determinação das vazões na fenda de trabalho

O equipamento disponível para os ensaios, a máquina EDM 200 MX Engemaq [8], não possui uma instrumentação adequada para medir a vazão do dielétrico. Para poder medir a vazão nas diferentes situações de trabalho houve a necessidade de instalar um rotâmetro no circuito de circulação do dielétrico. Estes podem ser mecânicos (como os empregados para medição da vazão de água e gás domésticos) ou trabalham pelo princípio da flutuação de um flutuador em um duto cônico vertical transparente. O princípio de funcionamento do rotâmetro com flutuador é explicado pelo equilíbrio entre a soma das pressões abaixo e acima do flutuador, e o seu peso. Com o aumento da vazão a pressão inferior aumenta, impulsionando o flutuador para cima. Com isto a área livre circunferencial em torno do flutuador aumenta, já que a tubulação apresenta um diâmetro crescente para cima, e o flutuador encontra uma nova posição de equilíbrio. Os tubos dos rotâmetros podem ser fabricados com diâmetros e conicidades variáveis, permitindo a medição de uma grande gama de medições de vazão. A precisão de medição com um rotâmetro com flutuador pode chegar a  $\pm 2,5\%$ .

#### 3.3.1. Projeto e construção de um rotâmetro

Não havendo dados reais sobre a vazão na fenda de trabalho e para poder projetar o rotâmetro pelo princípio do flutuador, teve-se que efetuar uma medição preliminar grosseira

da vazão do dielétrico. Estudaram-se duas situações distintas sendo a primeira com a vazão através das canalizações sem obstáculos e a segunda com a vazão real da fenda de trabalho sem provocar alterações nos fenômenos que nela ocorriam. Levou-se em conta o espaço disponível para instalar e fixar o rotâmetro no painel de comando do sistema de lavação. A densidade do fluido tem influência na forma e tamanho do flutuador, devendo este ser adequado ao líquido usado.

Conhecidos os valores limites da vazão no processo e empregando um tubo de vidro cônico de um rotâmetro para medição de gases testou-se diversos flutuadores e aquele que melhor se adequou às vazões requeridas foi instalado de forma definitiva no rotâmetro construído. (Fig.3.4)

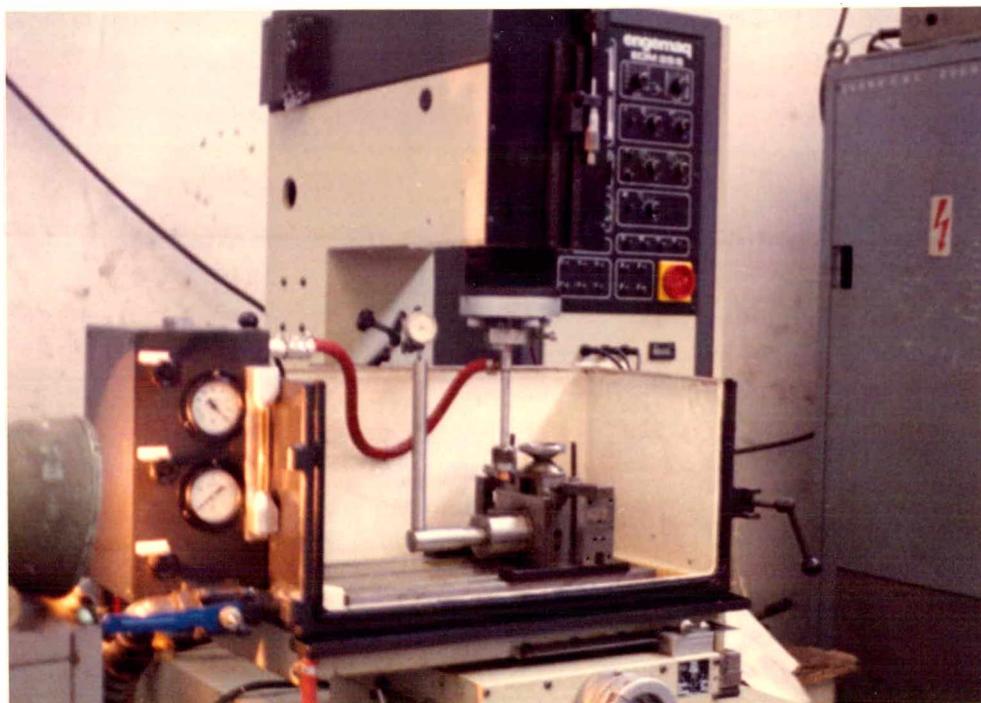


FIG.3.4 - Dispositivo de ensaio e rotâmetro, na máquina de eletroerosão EDM 200 MX.

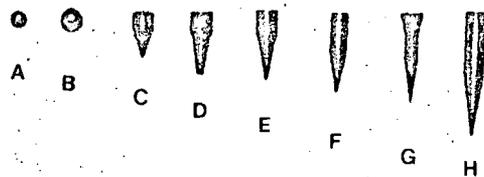


FIG.3.5 - Formas construtivas de flotores testados no rotâmetro.

Nos ensaios realizados com os diversos flotores verificou-se que :

- apesar da forma esférica (A-B) apresentar uma forma de equilíbrio estável, o fluxo do fluido faz a esfera girar, dificultando a leitura na escala do rotâmetro.

- a forma cilíndrica com ponta cônica (C-D-E-F-H) apresenta dificuldades de estabilidade, nas diferentes vazões, mesmo para aqueles tipos com a haste cilíndrica mais longa e cone agudo.

- o flotor com a forma combinada, duplo cônica e duplo cilíndrica (G), construída em tungstênio foi o que melhor se adaptou à nossa necessidade já apresentando um equilíbrio estável para as vazões acima de  $6.10E^{-5}$  [l/s], favorecendo a leitura na escala do instrumento.

### 3.3.2. Calibração do rotâmetro

Para obter informações confiáveis do rotâmetro na faixa de vazão requerida, efetuou-se a sua calibração. Na calibração do rotâmetro usou-se um balão graduado com capacidade de 100 ml e um cronômetro digital. Para simular a perda de carga, equivalente à que ocorre na fenda de trabalho, instalou-se um registro na saída do rotâmetro (Fig.3.6).

Procedimento de calibração:

1- Após verificado o funcionamento dos instrumentos envolvidos e ligada a bomba do sistema, deixou-se circulando o dielétrico por um período de trinta minutos para que o sistema entrasse em regime, dando então início aos ensaios. Abrindo a vazão para o rotâmetro e regulando o registro na saída do mesmo, obtém-se uma vazão com pressão constante.

2- Estabilizando as indicações nos instrumentos, o balão foi colocado na saída do registro, sendo cronometrado o tempo para o escoamento de 100 ml.

3- O procedimento foi repetido na mesma sistemática para os demais valores de pressão e vazão, na ordem crescente e depois na ordem inversa, varrendo toda a escala do manômetro e do rotâmetro. Efetuou-se três leituras, para obtenção de um valor médio. A variação de valores medidos não ultrapassou a faixa de  $\pm 1\%$ .

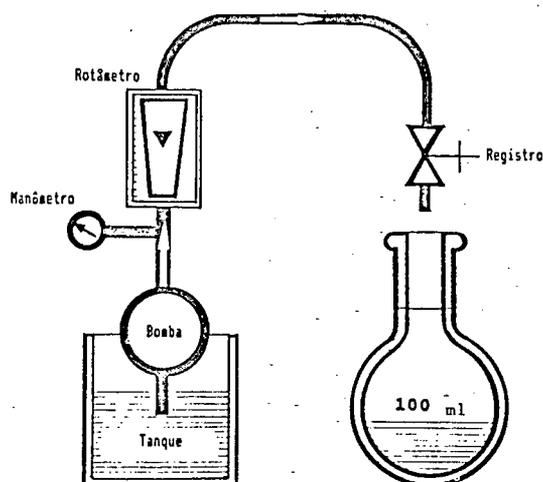


FIG. 3.6 - Forma esquemática do sistema utilizado na calibração do rotãmetro.

A Fig.3.7 - mostra, na forma de um gráfico tridimensional, os valores obtidos na calibração do rotãmetro como função da pressão e da escala do rotãmetro. (Os valores obtidos estão na tabela 2 do anexo A).

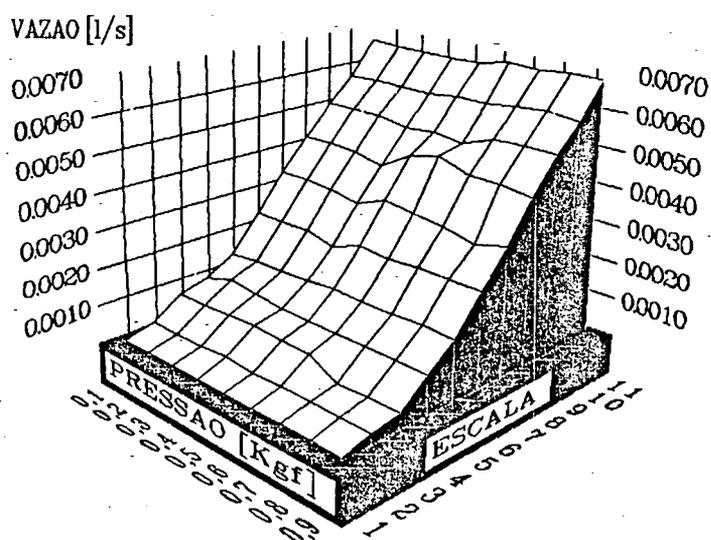


Fig.3.7 - Comportamento da vazão em função da pressão e da escala do rotãmetro.

Conforme esperado a variação da pressão de alimentação do dielétrico no rotâmetro não tem influência sensível sobre a vazão. O comportamento nas diversas pressões pode ser resumido por apenas uma reta obtida por regressão linear das médias das vazões para as diversas pressões de alimentação.

$$Q = (70,3335 X + (-)134,347) 10^{-8} \text{ [l/s]} \quad (9)$$

### 3.4. Construção do dispositivo para medir a abertura da fenda de trabalho

No estudo da vazão na fenda de trabalho deve-se variar a abertura da mesma. Com isto se torna possível simular os diversos regimes de trabalho. Numa máquina convencional de eletroerosão por faíscas, o sistema de avanço do eletrodo ferramenta pode ser eletro-mecânico ou hidráulico. A máquina disponível para os ensaios, uma EDM 200, apresenta avanço hidráulico do porta eletrodo. Este sistema não permite efetuar posicionamentos do eletrodo para aberturas variáveis. Em regime de trabalho a abertura da fenda de trabalho se estabiliza de acordo com os parâmetros de entrada do processo. Para poder efetuar uma variação da fenda de trabalho de forma manual contruiu-se um dispositivo que movimenta a peça verticalmente sobre a mesa da cuba com o cabeçote porta eletrodo travado. Este dispositivo simula a fenda de trabalho em condições reais de eletroerosão para obter as vazões correspondentes a diversas situações de abertura. Consta de um suporte fixo, na mesa da máquina ferramenta e uma parte móvel que se desloca em guias com forma de cauda de andorinha. O movimento vertical é efetuado por um fuso acionado manualmente permitindo a variação da abertura da fenda. Na parte deslizante do dispositivo fixou-se uma haste vertical, com altura suficiente para ultrapassar o nível máximo do dielétrico na cuba (Fig.3.8). Esta haste serve para se efetuar a medição do movimento do carro empregando um relógio comparador. A peça é fixa de forma centrada em relação

ao eletrodo sobre a estrutura do carro móvel do dispositivo. Mantendo-se o eletrodo em uma posição fixa (máquina desligada) a peça é deslocada até o contato com o eletrodo. Nesta posição o relógio comparador é zerado. Abrindo-se a fenda para valores préestabelecidos, verificam-se as vazões e pressões correspondentes.

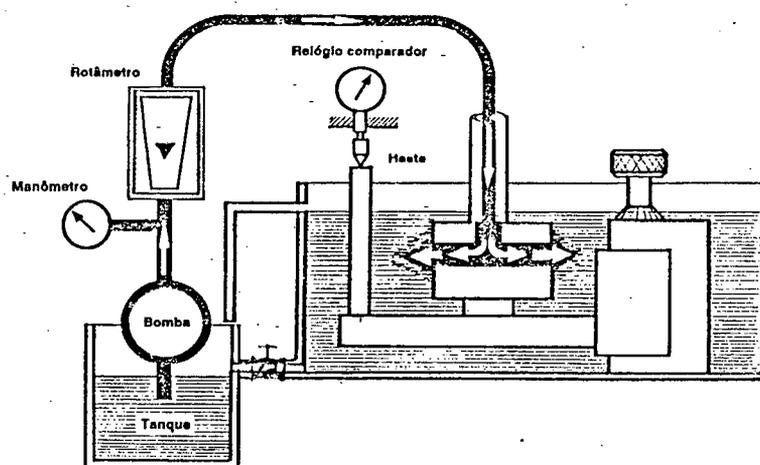


FIG. 3.8 - Esquema do dispositivo construído para medir a abertura entre o eletrodo e a peça.

### 3.5. Material utilizado nos ensaios

Nos ensaios foram utilizados para o eletrodo o cobre eletrolítico, para a peça o aço VC-131 da Villares, e para o dielétrico o querosene comercial.

#### 3.5.1. Especificação dos materiais usados

##### a) Propriedades do cobre eletrolítico [25]

- peso específico.....8,93 g/cm<sup>3</sup> [a 20 °C]
- ponto de fusão.....1084,5 °C
- ponto de ebulição.....2310 °C
- resistividade elétrica.....0,017 Ohm mm<sup>2</sup>/m
- condutividade.....58 m/Ohm mm<sup>2</sup>

##### b) Composição química do aço VC-131 da Villares [26]

peso específico.....	8,4 a 9,0 g/cm <sup>3</sup>		
C = 2,12 %	Si = 0,34 %	Mn = 0,310 %	
Cr = 11,70 %	W = 0,67 %	V = 0,20 %	
P = 0,020 %	S = 0,012 %		

##### c) Determinação da rigidez dielétrica dos fluidos

Os testes para a determinação da rigidez dielétrica de diversos fluidos foram feitas pelo método dos eletrodos de disco segundo a norma ABNT/IBP - 330, correspondente ao método ASTM (D-877)80 utilizando um testador portátil usado para testar

a rigidez dielétrica do óleo mineral de transformadores elétricos.

O aparelho utilizado possui as seguintes especificações :

fabricante : General Electric

modelo nº 971178454

valor mínimo lido na escala : 5 kV

precisão da distância entre os discos +/- 0,01 mm

unidade de medição kV/2,5 mm ou kV/0,100"

O procedimento para testar uma amostra obedece uma seqüência de etapas, desde a verificação inicial da cuba, a distância entre os discos, o repouso do líquido, a eliminação das bolhas que podem estar dentro da cuba, e a quantidade mínima para se retirar de uma amostra, as temperaturas ambiente e do líquido, e a repetibilidade dos ensaios aplicado ao critério da consistência estática dado pela relação entre o desvio padrão e a média dos cinco valores individuais. Se essa relação for maior do que 0,1 é provável que o desvio padrão dos 5 valores obtidos seja excessivo. O valor médio dos cinco valores individuais e o do desvio padrão podem ser obtidos com o emprego das fórmulas :

$$\bar{X} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 X_i \quad (10)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{4} \left[ \sum_{i=1}^5 X_i^2 - 5\bar{X}^2 \right]} \quad (11)$$

$\bar{X}$  = média dos 5 valores individuais

$X_i$  = tensão de ruptura de ordem i

S = desvio padrão

O teste consiste em aumentar a tensão entre os discos imersos no fluido cuja rigidez dielétrica deseja-se medir, até abrir o arco. Continuando a aumentar a tensão que permanecerá num valor constante sendo este o valor lido para a rigidez dielétrica do fluido em teste.

Dentre os fluidos testados a benzina apresentou uma característica diferente dos demais. Apesar de possuir ponto de fulgor baixo, ela necessita de 15 kV para abrir o arco, vindo a estabilizar na média de 9,5 kV/2,5mm. A tabela abaixo mostra os valores obtidos nos ensaios para diferentes fluidos.

AGUA			OLEO				OUTROS		
A	B	C	D	E	F	G	QUERO- ZENE	BEN- ZINA	MIS- TURA
<< 5	<< 5	<< 5	3	4	4	5	11,0	9,0	9,0
<< 5	<< 5	<< 5	3	4	5	6	9,0	10,0	9,0
<< 5	<< 5	<< 5	3	4	5	6	8,0	9,5	9,5
<< 5	<< 5	<< 5	3	4	5	6	8,5	10,0	9,0
<< 5	<< 5	<< 5	3	4	5	6	9,0	9,0	9,0

VALOR DA RIGIDEZ DIELETRICA OBTIDA

<< 5	<< 5	<< 5	3	4	4,8	5,8	9,1	9,5	9,1
------	------	------	---	---	-----	-----	-----	-----	-----

A - AGUA DESTILADA

D - OLEO DE CORTE

G - OLEO MA 20

B - AGUA DEIONIZADA

E - OLEO MA 5

C - AGUA DE TORNEIRA

F - OLEO MA 10

TABELA 3.1 - Rigidez dielétrica da água e hidrocarbonetos.

### 3.5.2. Corpos de prova

Os corpos de prova foram projetados, e construídos com forma definida havendo a necessidade de um dispositivo para sua fixação. Este consta de uma haste retificada, com um furo central por onde passa o dielétrico, tendo na parte frontal um rebaixo onde o eletrodo é fixado por uma porca externamente recartilhada, a Fig.3.9 mostra em detalhes o porta eletrodo.

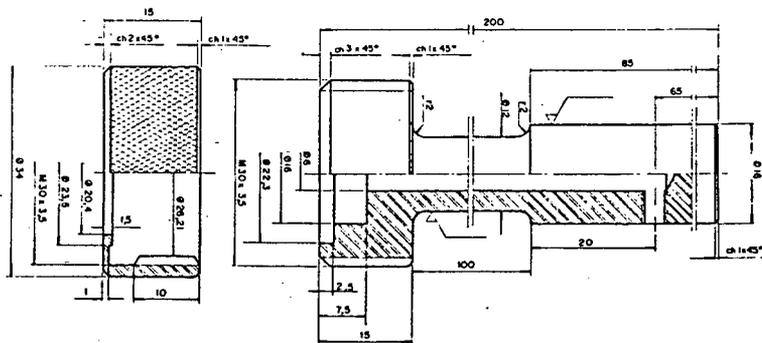


FIG. 3.9 - Porta eletrodo construído para os ensaios.

#### a) Eletrodo-ferramenta

Os eletrodos foram confeccionados em cobre eletrolítico com um furo interno para a passagem do fluido. Para os ensaios, estes, foram confeccionados em dois comprimentos (Fig.3.10).

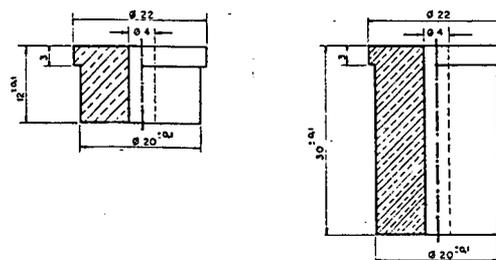


FIG. 3.10 - Formas do eletrodo ferramenta.

## b) Eletrodo-peça

Devido as formas de ensaios planejadas, construiu-se as peças com geometrias diferentes sempre usando o VC-131 temperado e retificado conforme mostrado na Fig.3.11..

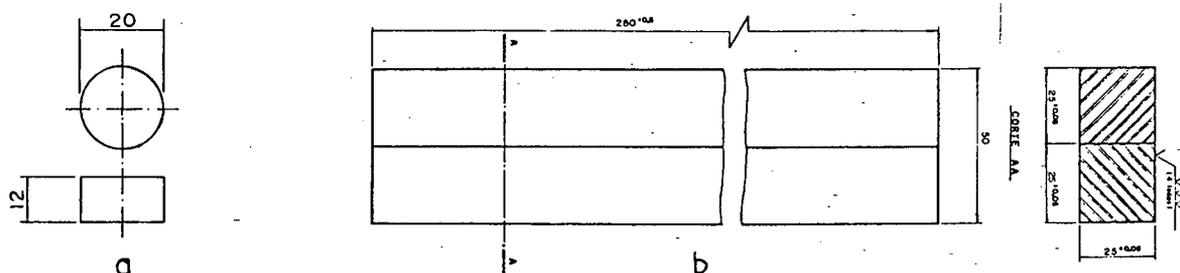


FIG. 3.11 - Formas dos eletrodos-peça usado nos ensaios.

## c) Identificação dos eletrodos e peças

Os eletrodos foram codificados com letra(s). As peças, foram codificadas com número para as peças cilíndricas (Fig.3.11 (a)), e os quadrados (Fig.3.11 (b)), com um número ao centro e as letras (A-B-C) nos lados, sendo o quarto lado sem marcação. Estas letras foram estampadas apenas numa cabeceira da peça na outra consta apenas o número. Como os ensaios para os quadrados são efetuados com duas peças juntas, as faces que contém a mesma letra ficam justapostas, e os ensaios são realizados ao longo dos corpos de prova.

### 3.6. Máquina ferramenta

A máquina EDM 200 MX usada nos ensaios é de fabricação nacional, produzida pela Engemaq-Equipamentos, Máquinas e Eletrônica S/A de Caxias do Sul, RS (Fig.3.12) item 1 anexo B.

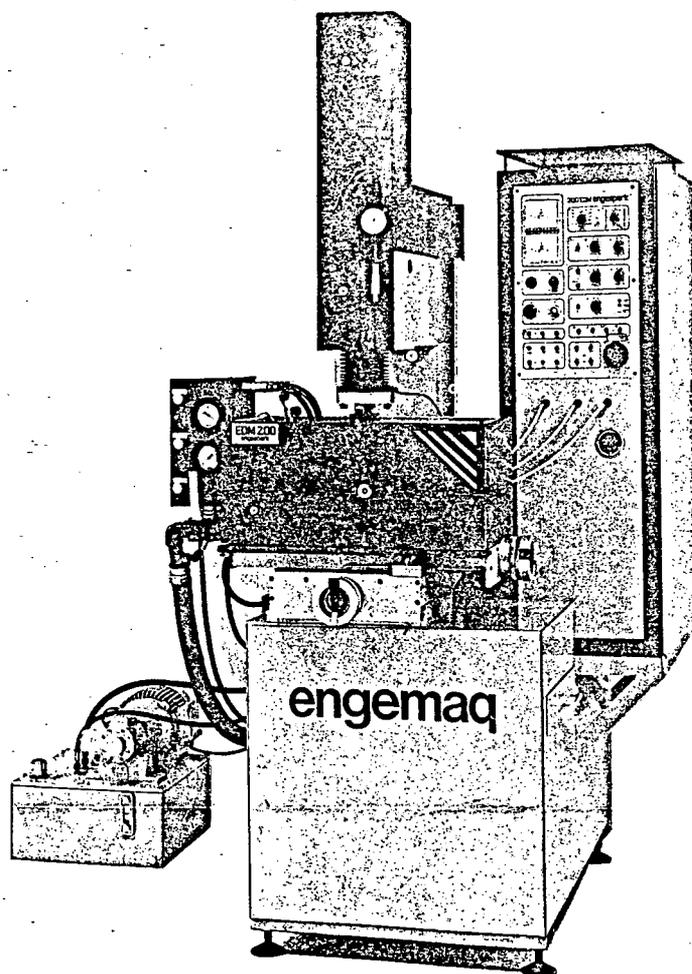


FIG. 3.12 - Máquina de eletroerosão EDM 200 MX por faísca, utilizada nos ensaios [8].

### 3.7. Equipamentos utilizados

#### 3.7.1. Equipamentos usados no levantamento das características do gerador de impulsos

Conectou-se ao gerador de impulsos um osciloscópio de memória, um "plotter" e um amplificador de corrente, para obter os valores produzidos de tensão e corrente aplicados entre a peça e o eletrodo; a montagem foi efetuada conforme mostrado no esquema da Fig.3.2

a) Osciloscópio com memória digital, quatro canais e 35MHz (Fig.3.13) item 2 do anexo B.

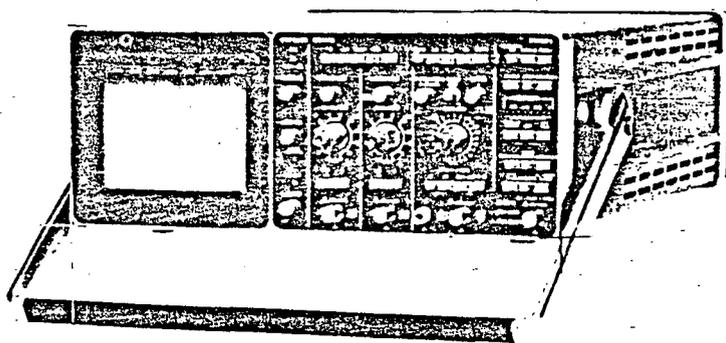


FIG. 3.13 - Osciloscópio com memória e quatro canais com 35 Mhz.

b) "Plotter" digital com "buffer", utilizado para registrar a transferência dos dados obtidos no osciloscópio com memória para o papel, possibilitando a obtenção da leitura dos

tempos de pulso, pausa, da tensão e corrente que ocorrem durante cada pulso emitido pelo gerador (Fig. 3.14) item 3 do anexo B.

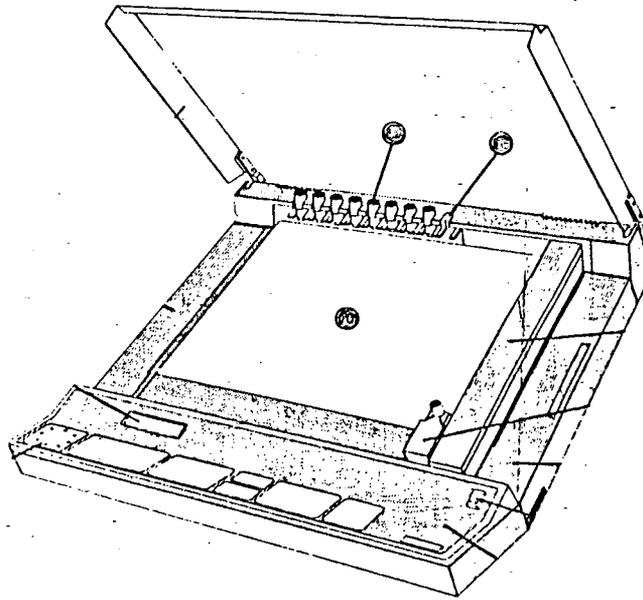


FIG. 3.14 - "Plotter" digital A3 modelo FM 3305.

c) Amplificador de corrente, conectado a uma ponteira para captar os sinais de corrente emitidos pelo gerador de impulsos e registrados na tela do osciloscópio através de um canal de entrada (item 4 anexo B).

## d) Calibração do manômetro

A calibração do manômetro instalado na máquina de eletroerosão foi efetuada utilizando o processo indireto com o uso de um manômetro padrão aferido fabricado por Wallace & Tiernan GMBH, série 1500 modelo NO 062A ser 7699-87. Após estabilizar o sistema foram efetuadas as leituras, variando de 0,1 no manômetro a ser calibrado e feita a leitura no manômetro padrão até atingir o valor de 1,5 kgf/cm<sup>2</sup>, obtendo os valores que constam da tabela nº 3 no anexo A. A Fig.3.15 mostra os valores obtidos na calibração.

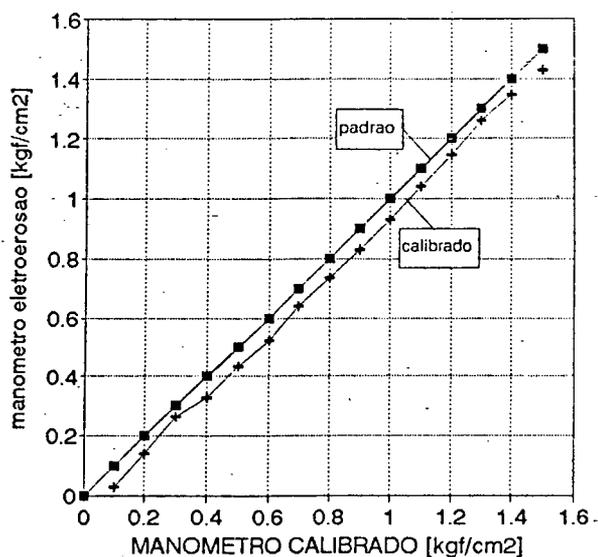


FIG. 3.15 - Curvas de calibração do manômetro.

## CAPÍTULO 4

### DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO

#### 4.1. Dos ensaios experimentais

Com a calibração do rotâmetro e do manômetro e a confecção dos eletrodos-ferramenta e dos eletrodos-peça, o material e os instrumentos para os ensaios estavam prontos, sendo preparadas as planilhas para o registro dos valores obtidos nos ensaios.

#### 4.2. Preparação dos ensaios

##### 4.2.1. Regulagem do gerador

Para ter informações sobre a influência do tempo de impulso [ $T_{on}$ ] e tempo de repouso [ $T_{off}$ ], variou-se o tempo de impulso de 100 a 150  $\mu s$  e o tempo de repouso de 10 a 14  $\mu s$ .

A tensão de descarga no regime de trabalho oscilou na faixa de 25 a 100 V, sendo o acabamento superficial e a taxa de remoção influenciados pela faixa de trabalho de 1 a 25 A que é o limite da máquina de ensaios.

#### 4.2.2. Vazão e pressão do fluido dielétrico

A forma de lavagem da fenda de trabalho por sucção através do eletrodo mostrada por Lopes [19] apresentou os melhores resultados em seu trabalho. Em consequência da dificuldade de medir a vazão de sucção através do eletrodo optou-se pela lavagem por pressão, que é uma forma muito usual na prática.

As pressões adotadas neste estudo, abrangem desde 0,1 [bar] até 1,5 [bar], fazendo uma varredura na faixa operacional do sistema empregado. Em decorrência da variação da pressão as vazões através da fenda de trabalho variaram de  $6,83 \times 10^{-5}$  l/s à  $685,4 \times 10^{-5}$  l/s.

A tabela 2 do anexo A mostra valores de vazão em função da escala do rotâmetro e pressão do manômetro.

#### 4.3. Realização dos ensaios

Na obtenção dos dados foi utilizada uma seqüência programada de etapas, para que a qualquer dúvida levantada sobre os resultados, fosse possível analisar e entender o que acontece a cada instante do ensaio, inclusive garantir sua repetibilidade confirmando ou não a conclusão chegada. Assim sendo os ensaios foram divididos em duas etapas principais.

Na primeira etapa foi ensaiada a perda de carga na fenda de trabalho frontal ao eletrodo e peça. Para evitar a influência da fenda lateral na vazão e lavagem da fenda de trabalho, trabalhou-se com um eletrodo de mesmo diâmetro que a

peça. Desta maneira mesmo havendo deslocamento de avanço do eletrodo não temos a formação de uma cavidade e a fenda permanece constante.

Os eletrodos e as peças estão mostrados nas Fig.3.10 e 3.11.e os dados constam do anexo A tabelas 4-5-6-7.

O gerador de impulsos foi regulado para uma corrente de 1A.

A pressão e a vazão somente são reguladas após iniciado o processo, para compensar as perdas decorrentes da tubulação e da fenda de trabalho para os valores de 0,1 à 0,5 [bar] com incremento de 0,1 [bar].

Programou-se a erosão para uma profundidade de 1 mm, e assim o tempo para cada ensaio variou em função da corrente aplicada.

Na segunda etapa de ensaios, o diâmetro do eletrodo continuou o mesmo, mas as peças nesta apresentam uma dimensão maior com forma retangular bipartida [Fig.3.11].

Para reduzir o número de ensaios fixou-se uma regulagem dos parâmetros do gerador de impulsos e para cada ensaio, alterou-se a pressão inicial para uma faixa de 0,4 a 0,6 [bar]. A cada 10 minutos foram anotados os valores de pressão, vazão e profundidade erodida. Nesta etapa cada ensaio era suspenso sempre que houvesse uma estabilização na variação da pressão e vazão.

#### 4.4. Topografia da superfície

Uma superfície é qualificada segundo os valores de rugosidade  $R_a$  e/ou  $R_z$ . Segundo o padrão VDI 3400 subdividindo-se a qualidade das superfícies de rugosidade  $R_a$  em 12 classes obtidas para eletroerosão por faísca, podendo variar de  $0,4 \mu\text{m}$  a  $18 \mu\text{m}$  [2].

Para a qualificação da superfície frontal erodida dos eletrodos e das peças, usou-se um rugosímetro S8P, marca Perthometer cujas características técnicas estão no item 5 do anexo B.

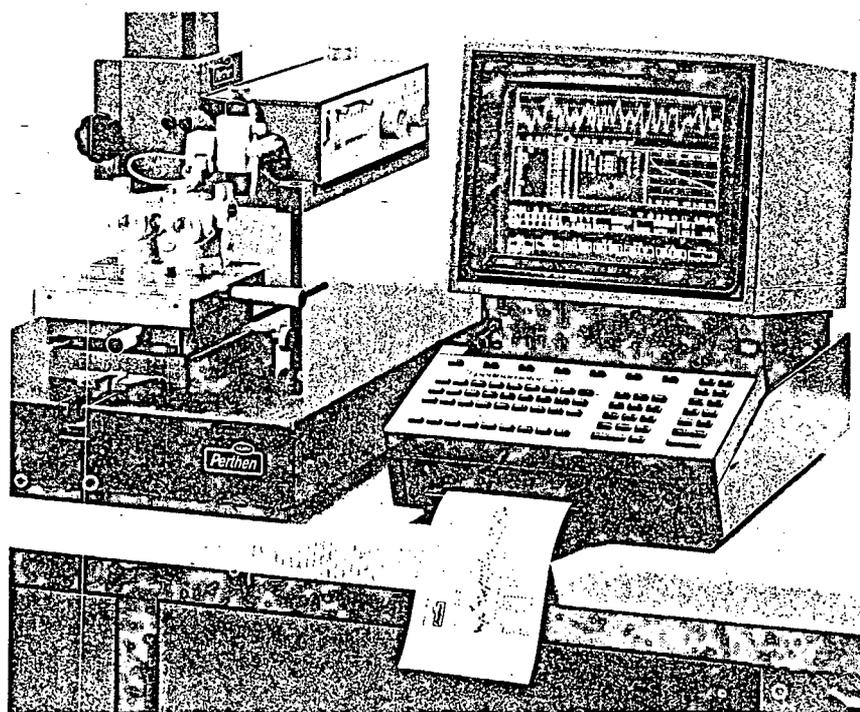


FIG. 4.1 - Rugosímetro Perthometer S8P

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 5.1. Influência da vazão na fenda de trabalho

A vazão do fluido dielétrico na fenda de trabalho tem uma grande influência tanto nos fenômenos físicos, como na remoção das partículas usinadas.

Como visto anteriormente além das partículas removidas temos a formação de bolhas de vapor do dielétrico, bem como resíduos decorrentes da decomposição do dielétrico.

No caso de não promovermos a movimentação do fluido dielétrico no processo de eletroerosão por faísca de penetração, o meio fluido é saturado com partículas e as descargas ocorrerão sobre estas, refundindo as mesmas e dificultando a formação do canal de plasma.

Através da vazão do dielétrico na fenda de trabalho, remove-se fragmentos erodidos, mantendo estável o grau de contaminação do meio, retirando as bolhas de gás, estabilizando a temperatura favorecendo assim o desenvolvimento normal do processo.

Para poder ter um parâmetro comparativo da vazão entre os eletrodos na eletroerosão por faísca, efetuou-se um ensaio prévio, no qual verifica-se a vazão entre duas superfícies com elevado acabamento superficial.

A alimentação do dielétrico se dá através do eletrodo por um orifício central com 4 mm de diâmetro.

No gráfico da Fig.5.1, estão mostradas, a variação da vazão em função da pressão do dielétrico para diferentes aberturas entre uma superfície de aço retificada com  $Ra=0,323^{+/-0,1}$   $\mu\text{m}$  e contra peça de cobre com furo e outra superfície usinada  $Ra=1,1^{+/-0,1}$   $\mu\text{m}$  (anexo A, 14-15).

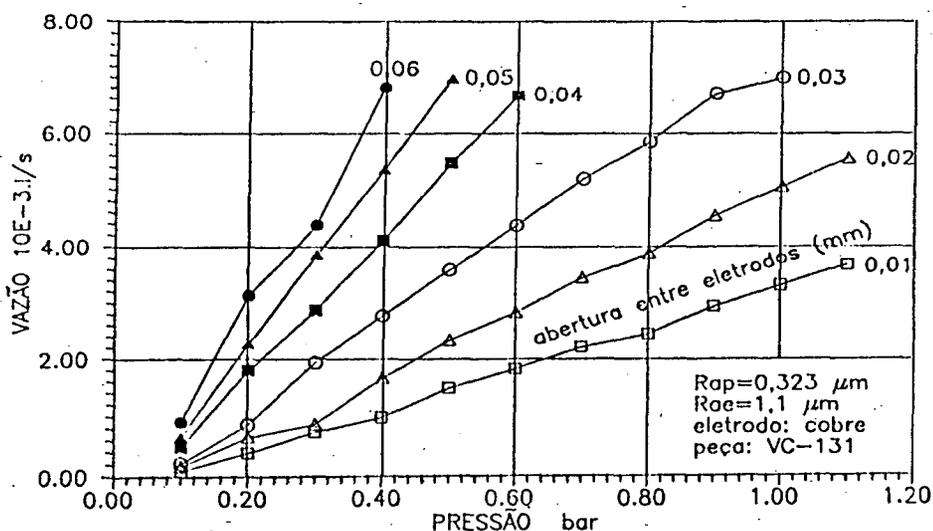


FIG. 5.1 - Vazão em função da pressão para diversas aberturas da fenda e superfície retificada ( $Rap = 0,323 \mu\text{m}$ ).

Neste ensaio inicial o fluido não sofre nenhuma perda de carga além da perda entre as superfícies paralelas.

Observamos que, a medida que a abertura entre as superfícies aumenta, as vazões também aumentam. Se desejarmos uma vazão constante em uma fenda variável, teremos que alterar a pressão de alimentação.

Por exemplo para a abertura da fenda de 0,01 mm necessitamos uma pressão de 1 bar para conseguir uma vazão e  $3,30 \cdot 10^{-3}$  l/s, ao

passo que para a fenda de 0,06 mm a pressão necessária para a mesma vazão é de aproximadamente 0,21 bar.

A medida que a rugosidade do eletrodo e da peça aumenta, a variação da fenda de trabalho tem uma influência menor sobre a vazão. Ao passo que para as superfícies retificadas uma variação da fenda de trabalho de 0,01 mm à 0,06 mm para pressão de alimentação do dielétrico de 0,2 bar, leva a uma variação de vazão de  $(0,2 \text{ a } 3,2) \cdot 10E^{-3} \text{ l/s}$ , (Fig.5.1) e para as superfícies erodidas temos uma variação da vazão decrescente com o aumento da rugosidade. Nas Fig.5.3 a 5.5. observa-se ainda que para aberturas da fenda menores (0,01 e 0,02 mm) mantendo a pressão fixa, a vazão aumenta à medida que se aumenta a rugosidade do eletrodo e da peça e que para fendas maiores (0,05 e 0,04 mm) a vazão diminui com as maiores rugosidades do eletrodo e da peça. Este comportamento pode ser explicado pela influência da rugosidade do eletrodo e da peça [Fig.5.2].

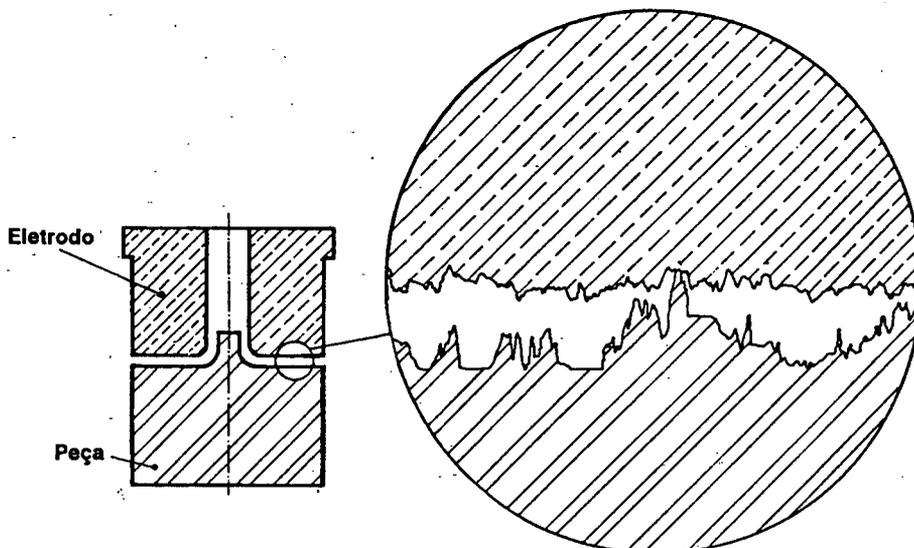


FIG. 5.2 - Vista ampliada das condições superficiais do eletrodo e da peça em contato (anexo A, 16 e 17).

Quando se determina o contato entre as superfícies adjacentes apenas os picos se tangenciam. Todos os flancos e vales de rugosidade permanecem sem contato e assim, mesmo para o contato pontual entre eletrodo e peça ainda tem-se a possibilidade de escoamento do dielétrico. Tanto maior for a rugosidade, tanto maior é a fenda real inicial. Analisando a soma da rugosidade  $R_t$  dos eletrodos e das peças, verificou-se valores entre (30 e 105)  $\mu\text{m}$ . A soma da rugosidade  $R_e$  permite concluir sobre os afastamentos entre superfícies.

Em consequência da distribuição regular da rugosidade (anexo A, 8 à 13) no contato de dois picos de rugosidade ainda temos uma abertura entre eletrodos igual a aproximadamente a metade da soma das rugosidades  $R_e$ . Isto significa que, para o regime de desbaste, temos uma fenda inicial, no momento do contato de dois picos adjacentes mais afastados de aproximadamente 0,05 mm. Para um afastamento de 0,01 mm temos uma fenda real de 0,06 mm.

Quando se compara a vazão para o par retificado e abertura de 0,06 mm da Fig.5.1, verifica-se a mesma vazão que para o par obtido em regime de desbaste para uma abertura medida (contato) de 0,01 mm ou seja abertura real de 0,06 mm.

A diminuição da vazão para aberturas grande com o aumento da rugosidade é explicado pelo escoamento mais turbulento entre os eletrodos.

As Fig.5.3 a Fig.5.5, apresentam a variação da vazão em função da pressão do dielétrico para diferentes fendas de trabalho e superfícies erodidas. Observa-se que existe perdas de vazão devido a rugosidade superficial do eletrodo e da peça.

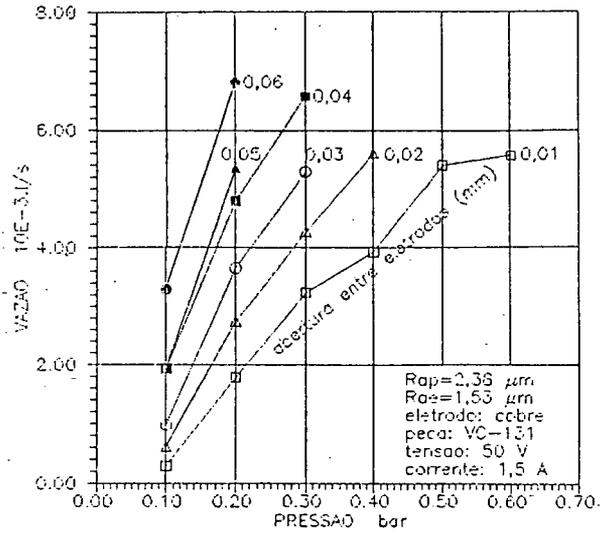


FIG. 5.3. Vazão em função da pressão para diversas aberturas entre eletrodos para rugosidade superficial da peça ( $R_{ap}=2,38 \mu\text{m}$ ).

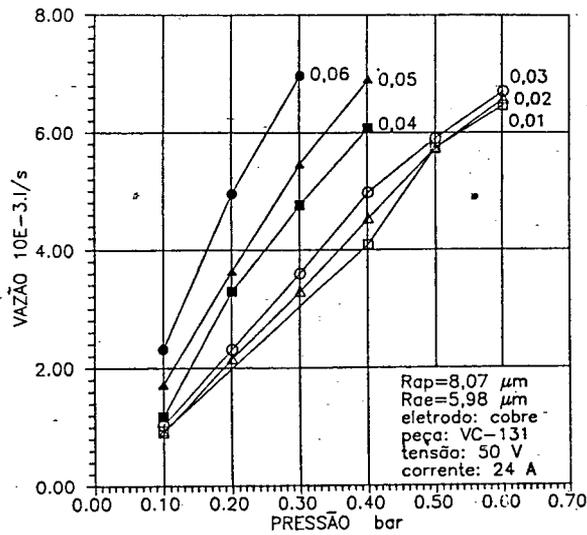


FIG. 5.4 - Vazão em função da pressão para diversas aberturas entre eletrodos para rugosidade superficial da peça ( $R_{ap}=8,07 \mu\text{m}$ ).

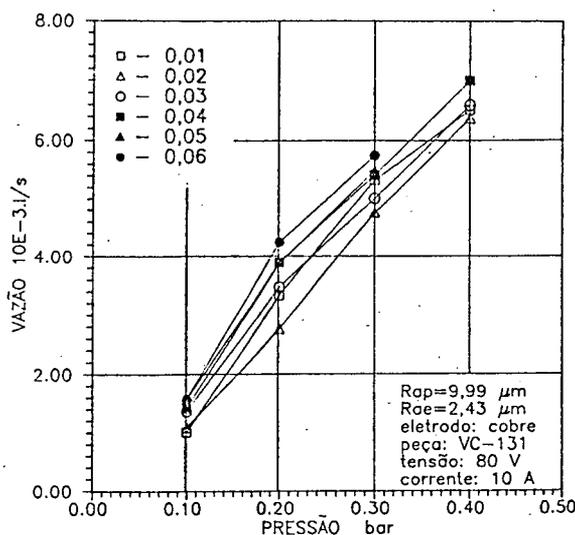


FIG. 5.5 - Vazão em função da pressão para diversas aberturas entre eletrodos para rugosidade superficial da peça (Rap=9,99 μm)

No início de cada ensaio, observa-se a maior queda de vazão, seguido de uma estabilização do mesmo.

Para poder avaliar o comportamento da vazão em uma situação real de eletroerosão por faísca efetuaram-se ensaios nos quais a vazão do dielétrico era observado em função da penetração do eletrodo para diversas pressões de alimentação.

As Fig.5.6 e 5.7 apresentam as curvas obtidas de vazão em função da profundidade de penetração do eletrodo na peça, para pressão variando entre 0,4 e 0,6 bar e tempos de erosão ( $T_{on}$ ) de 150 μs e 50 μs. Observa-se que ocorre a queda de vazão devido as mudanças de direção a que o fluido é submetido em seu percurso na fenda de trabalho.

Inicialmente se repete a situação idealizada nos ensaios anteriores. A superfície do eletrodo-peça é plana e o dielétrico flui livremente para fora da fenda de trabalho.

A medida que o eletrodo penetra na peça forma uma cavidade recíproca à geometria do eletrodo. Na parte central forma-se uma elevação restringindo a saída do dielétrico pelo orifício de alimentação.

Na saída da superfície frontal o dielétrico sofre uma mudança de direção e é obrigado a fluir pela lateral entre as superfícies cilíndrica do eletrodo e da cavidade erodida. A medida que a cavidade aumenta de profundidade, as perdas de carga aumentam como consequência do aumento do percurso que deve ser percorrido. A Fig.5.8 mostra o eletrodo e a peça no início e após um tempo de erosão penetrando na peça.

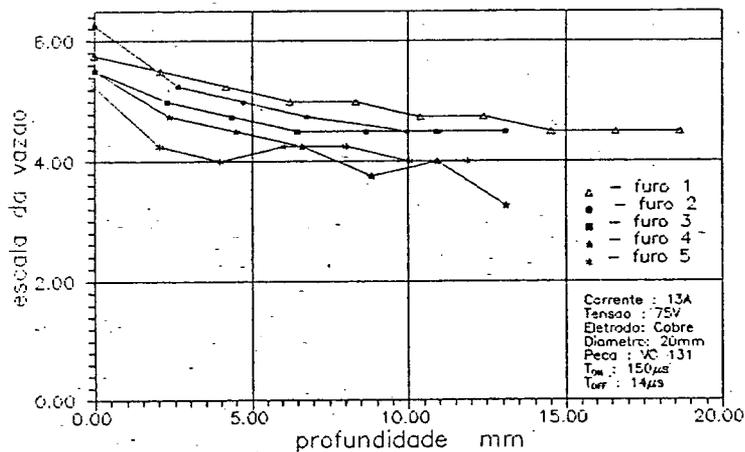


FIG. 5.6 - Comportamento da vazão em função da profundidade para operação de desbaste (pressão inicial 0,6 à 0,40 bar).

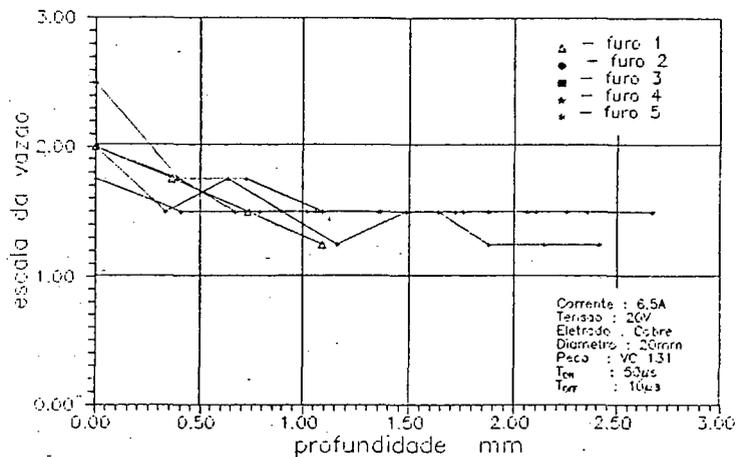


FIG. 5.7 - Comportamento da vazão em função da profundidade para operação de semi-acabto. (pressão ini.de 0,65 à 0,45 bar).

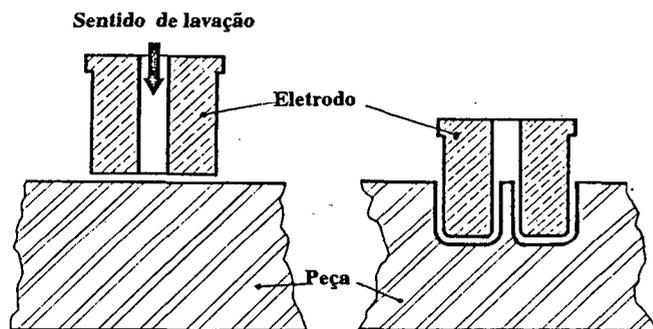


FIG. 5.8 - Eletrodo e peça, no início e no final do ensaio.

Observamos ainda que no início de cada ensaio, ocorre a maior taxa de remoção Fig. 5.9 e Fig. 5.10. Também aqui pode-se concluir que estas taxas de remoção mais elevadas estão diretamente associadas a maior vazão e conseqüentemente melhor limpeza da fenda de trabalho.

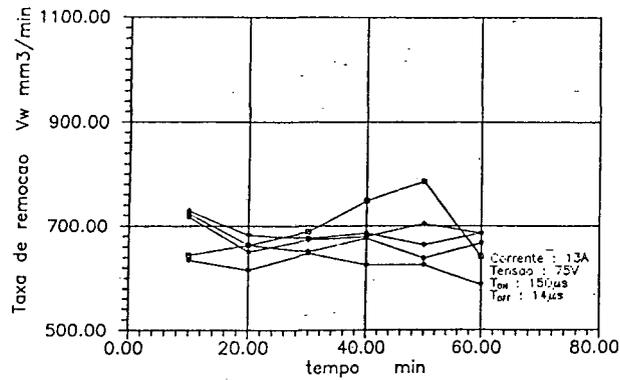


FIG. 5.9 - Taxa de remoção em função do tempo numa operação de desbaste.

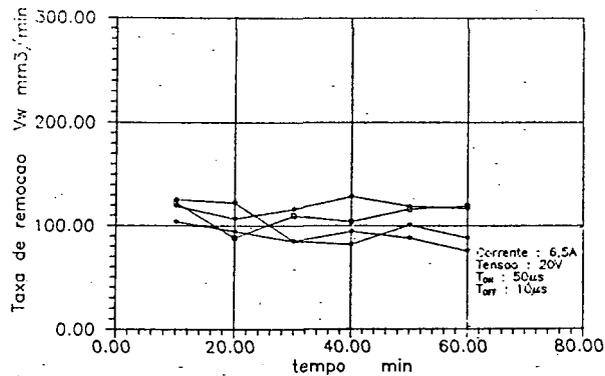


FIG. 5.10 - Taxa de remoção em função do tempo numa operação de semi-acabamento.

No anexo A, as Fig.18 à 23, mostram as curvas obtidas da vazão em função da escala do rotâmetro para diferentes aberturas entre os eletrodos, sobrepondo as curvas para quatro situações diferentes de acabamento superficial dos conjuntos de eletro e peça. As rugosidades  $R_a$  vão desde  $0,323 \mu\text{m}$  para superfície retificada até  $R_a = 9,99 \mu\text{m}$  para superfície erodida.

Observa-se na Fig.5.11, uma curva da média dos valores da vazão em função da escala do rotâmetro e as respectivas curvas da dispersão.

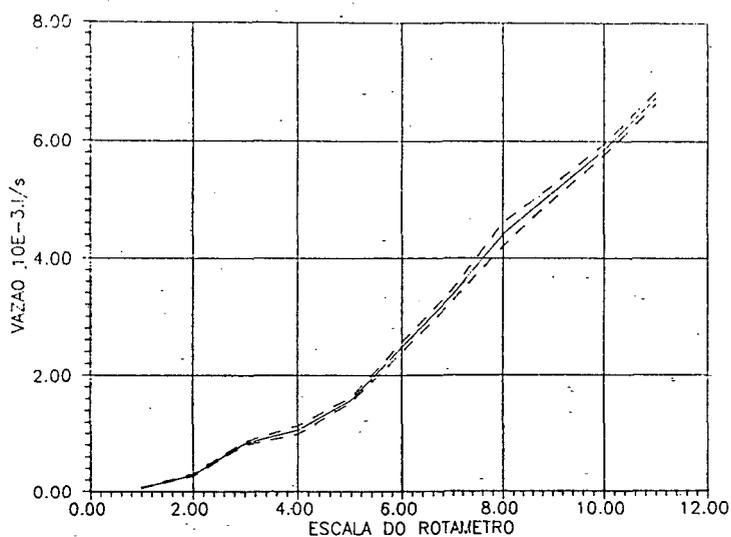


FIG. 5.11 - Curvas da média das vazões em função da escala do rotâmetro, e as curvas da dispersão.

## CAPÍTULO 6

### 6.1. Conclusão

Os ensaios de vazão efetuados sobre superfícies circulares concêntricas de mesmo diâmetro, com alimentação de dielétrico a pressão constante por um furo central em uma das superfícies mostraram que, para superfícies retificadas um aumento da abertura da fenda entre as superfícies de trabalho leva a um aumento da vazão.

Quando se trabalha com superfícies de escoamento obtidas no processo de eletroerosão observa-se o mesmo comportamento, desde que a rugosidade das superfícies seja baixa. A medida que se aumenta a rugosidade observa-se uma menor influência da abertura da fenda entre as superfícies sobre a vazão. Este fato é explicado pela inexistência de um contato pleno entre as superfícies quando se determina a fenda mínima. O contato se dá apenas pelos picos de rugosidade, Fig.5.2 restando uma fenda mínima igual a aproximadamente a metade da soma das rugosidades das superfícies justapostas. Para fendas reais (considerando a rugosidade) temos vazões bastante próximas.

Disto podemos concluir que, em regime de acabamento na eletroerosão por faísca, onde a fenda de trabalho é menor devido a menor energia de descarga entre os eletrodos, a rugosidade no eletrodo e na peça são menores, deve trabalhar com pressões do dielétrico mais elevadas para manter a vazão e garantir a limpeza na fenda de trabalho. Isto no entanto pode exigir uma

concepção mais rígida da máquina de EDM. Nos ensaios de escoamento realizados na eletroerosão por faísca de uma cavidade com eletrodo cilíndrico e alimentação de dielétrico por um furo central, pode-se observar que para condições elétricas constantes, uma diminuição da pressão de alimentação do dielétrico leva a uma diminuição da taxa de remoção. Esta diminuição é correlacionada com as piores condições de trabalho na fenda decorrente de uma limpeza ineficiente devido a diminuição da vazão com a diminuição da pressão de alimentação do dielétrico.

Sugestões para continuidade do trabalho:

- Otimizar a vazão do dielétrico no processo de eletroerosão por imersão.
- Avaliar a influência da variação das temperaturas do dielétrico no processo de eletroerosão.
- Proceder um estudo com a variação do grau de contaminação do dielétrico.
- Estudar a variação da forma geométrica do eletrodo e sua influência no processo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] OSENBRUGGEN, C.van. **High Precision Spark Machining.**  
Philips Technical Review, 1969 n.6/7, v.30, p.195-208.
- [2] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren Band III** Aachen WZL RWTH VDI  
Verlag, 1979. v.3
- [3] BEUTTLER, Rolf E. **Eletroerosão : seminário teórico.** FBL-  
Tec.Ind.Eletromecânica Ltda. Sto.Amaro, SP. 1988
- [4] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **Elektroerosive Bearbeitung.**  
VDI 3402 Blatt1 März 1976, Blatt2 November 1978 e Blatt 3  
Februar 1982.
- [5] VEREIN SCHWEIZERISCHER. **Machinen Industrieller Elektroero-  
sive Bearbeitung.** SN 237550/1-2 de 12/12/80 e SN 237550/3  
de 26/02/83.
- [6] WERTHEIM, Rafael. **Untersuchung der energetischer Vorgänge bei  
der funkerosiven Bearbeitung als Grundlage für eine Verbes  
serung des Prozessablaufs.** Aachen, RWTH März 1975 (Thesis)
- [7] MAQUINAS E METAIS. São Paulo : Aranda Editora Técnica n.297  
Out/1990. p.10-36
- [8] ENGEMAR-EQUIPAMENTOS, MAQUINAS E ELETRÔNICA S/A. **Catálogo  
da máquina de eletroerosão.** Caxias do Sul Rs. 1990
- [9] KRACHT, ERNST-WILHELM. **Grundlagen der funkerosiven Mehrkanal  
bearbeitung.** Aachen, RWTH Juni 1970 (Doktor - Ingenieurs)
- [10] RENOLUB et al. **Catálogo de fabricantes e distribuidores  
nacionais de fluido dielétrico para eletroerosão.** 1986

- [11] KOENIG, W. et al. The flow fields in the working gap with electro-discharge-machining. Annals of Cirp, v.25, p.71-76 1977.
- [12] BRUYN, H. E. De. Effect of a magnetic field on the gap Cleaning in EDM. Annals of Cirp, v.27, p.93-95 1978.
- [13] WIRTSCH & SCHUMACHER, B. M. About the role of debris in the gap during electrical discharge machining. Annals of the Cirp, v.39, p.197-199 1990.
- [14] FREI, C. et al. A new approach for contamination measurements for EDM dielectrics. Annals of the Cirp, v.36, p. 111-113 1987.
- [15] BRUYN, H.E. De some aspects of the influence of gap flushing on the accuracy in finishing by spark erosion. Annals of the Cirp, v.18, p.147-151 1970.
- [16] MASUZAWA, T. & HEUVELMAN, J. A self flushing method with spark erosion machining. Annals of the CIRP, v.32, p.109-111 1983.
- [17] SNOEYS, R. et al. Correlation between electro-discharge malant. Hallwag. p.83-88 jan.1975.
- [18] JESWANI, M.L. Effect of machining area and pulse parameters of EDM performance. Indian Journal of Technology. p.354-356 Sep.1980.
- [19] LOPES, Jânio Rodrigues. Usinagem por eletroerosão com variação da área do eletrodo. Florianópolis, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, março 1991. (Dissertação de mestrado).

- [20] SCHUMACHER, B. Das leitungsverhalten und der Werkzeugverschleiss bei der funkerosiven Bearbeitung von Stahl mit Speicher und Impulsgeneratoren. Aachen TH, 1966.  
(Diss)
- [21] MANUFACTURING ENGINEERING. Tech Report. p.65-71 July 1988.
- [22] AGIE AG. CNC Ausbildung für die betriebliche Praxis, Teil 6 Erodieren. München Carl Hanser Verlag. 1985
- [23] JESWANI, M.L. Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining. Lausanne Wear 70. Elsevier Sequoia S/A p.133-139 1981.
- [24] KOK, J. A. Electrical breakdown of insulation liquids. Philips Technical Library. Eindhoven. p.45-47 1961
- [25] AÇOS VILLARES S/A. Catálogo sobre aços especiais para trabalho a frio. São Paulo SP. p.8-9 [1986]

ANEXO A

**CARACTERISTICAS DO GERADOR DE IMPULSOS**  
UTILIZADO PARA OS ENCAIOS

VALOR REGULADO					VALOR REAL									
PAINEL	t <sub>E</sub> [μs]	t <sub>0</sub> [μs]	Volt. [U]	Corr. [U]	t <sub>E</sub> [μs]	t <sub>0</sub> [μs]	t <sub>D</sub> [μs]	t <sub>I</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	U <sub>I</sub> [U]	U <sub>E</sub> [U]	I <sub>E</sub> [A]	I <sub>E</sub> [A]	τ
50 x 12	50	12	85	18	50	5	21,25	71,25	81,8	131,25	45	30	26,25	0,939
50 x 14	50	14	50	23	45	6,25	13,1	58,1	64,35	137,5	42,5	30,625	27,5	0,983
50 x 18	50	18	50	20	45	5	15	68	65	132,5	37,5	26,25	25	0,923
75 x 18	75	18	40	19	77,5	7,5	28	97,5	185	127,50	35	23,75	22,5	0,929
100 x 10	100	18	40	25	100	7,5	21,25	121,25	128,75	125	37,5	28,75	22,5	0,942
150 x 18	150	18	45	26	150	5	22,5	172,5	177,5	122,5	37,5	26,25	21,875	0,972
50 x 20	50	20	50	25	45	5	12,5	57,5	68	127,5	37,5	28,75	26,25	0,958
75 x 20	75	20	45	25	72,5	5	20	92,5	127,5	130	37,5	30	26,25	0,961
100 x 20	100	20	40	27	92,5	7,5	20	112,5	182	130	35	28,75	22,5	0,926
150 x 20	150	20	40	27	155	7,5	20	175	182,5	130	35	30	22,5	0,959

**TABELA 1 - CARACTERISTICAS DO GERADOR DE IMPULSOS**

VAZAO EM FUNCAO DO MANOMETRO E ESCALA DO ROTAMETRO [ $10^{-3}$  l/s]  
CALIBRACAO DO ROTAMETRO

MANOMETRO [kgf/cm <sup>2</sup> ]	ESCALA										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,1	0,0683	0,2883	0,8094	1,0198	1,4789	2,4184	3,4153	4,2553	5,0942	5,7737	6,6934
0,2	0,0703	0,2724	0,7954	1,2435	1,5567	2,4402	3,3944	4,2974	5,0968	5,7670	6,6269
0,3	0,0606	0,2759	0,8482	1,1549	1,5511	2,4474	3,3750	4,2644	5,1125	5,7837	6,6401
0,4	0,0666	0,3386	0,8840	1,0453	1,5654	2,2841	3,2300	4,0816	4,9677	5,7537	6,6094
0,5	0,0648	0,2701	0,8133	1,0378	1,6287	2,5780	3,5448	4,5746	5,0531	5,8548	6,6489
0,6	0,0528	0,2888	0,8439	1,0443	1,5768	2,4963	3,4507	4,7870	4,9334	5,8480	6,8353
0,7	0,0734	0,2790	0,8648	1,0289	1,5896	2,5536	3,3784	4,4903	5,2687	5,9630	6,7751
0,8	0,0608	0,2799	0,8208	1,0239	1,6242	2,5336	3,1959	4,4964	5,2966	6,0205	6,8776
0,9	0,0677	0,2799	0,7943	1,0116	1,5798	2,5100	3,4153	4,4014	5,2938	5,9418	6,8540

TABELA 2 - VAZAO EM FUNCAO DO MANOMETRO E ESCALA DO ROTAMETRO (CALIBRACAO DO ROTAMETRO)

MANOMETRO A AFERIR [kgf/cm <sup>2</sup> ]	VALOR LIDO	
	bar [daN/cm <sup>2</sup> ]	[kgf/cm <sup>2</sup> ]
0,1	0,029	0,02958
0,2	0,139	0,14178
0,3	0,260	0,26520
0,4	0,320	0,32640
0,5	0,428	0,43656
0,6	0,513	0,52326
0,7	0,626	0,63852
0,8	0,722	0,73644
0,9	0,812	0,82824
1,0	0,910	0,92820
1,1	1,020	1,04040
1,2	1,122	1,14444
1,3	1,236	1,26072
1,4	1,320	1,34640
1,5	1,400	1,42800

TABELA 3 - CALIBRACAO DO MANOMETRO

ROTAMETRO EM FUNCAO DO MANOMETRO E FENDA DE TRABALHO (escala)

PARA SUPERFICIE RETIFICADA

MANOMETRO [kgf/cm <sup>2</sup> ]	FENDA DE TRABALHO [mm]									
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
0,1	1,25	1,45	1,75	2,40	2,70	3,00	3,40	4,80	5,30	6,05
0,2	2,30	2,70	3,50	5,20	5,70	6,55	7,20	8,00	9,70	
0,3	2,80	3,50	5,30	6,40	7,25	8,50	10,00	11,10		
0,4	3,80	5,00	6,25	7,50	9,00	10,80				
0,5	4,80	5,75	7,00	9,20	11,00					
0,6	5,20	6,30	7,80	10,45						
0,7	5,60	6,90	8,80							
0,8	5,95	7,45	9,75							
0,9	6,45	8,00	10,70							
1,0	6,80	8,60	11,00							
1,1	7,15	9,25								

TABELA 4 - ESCALA DO ROTAMETRO EM mm COMO FUNCAO DO MANOMETRO E DISTANCIA ENTRE ELETRODOS PARA SUPERFICIES RETIFICADAS.

**ROTAMETRO EM FUNCAO DO MANOMETRO E FENDA DE TRABALHO (escala)**

PARA SUPERFICIE ERODIDA (0-A)

MANOMETRO [kgf/cm <sup>2</sup> ]	FENDA DE TRABALHO [mm]						
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
0,1	2,75	3,00	4,50	5,50	5,50	6,50	6,80
0,2	5,80	6,50	7,25	8,25	9,25	10,75	
0,3	7,00	7,80	9,25	10,75			
0,4	8,00	10,00					
0,5	9,50						
0,6	10,50						

**TABELA 5 - ESCALA DO ROTAMETRO, COMO FUNCAO DO MANOMETRO E DA DISTANCIA ENTRE ELETRODOS - SUP.ERODIDA**

**ROTAMETRO EM FUNCAO DO MANOMETRO E FENDA DE TRABALHO (escala)**

PARA SUPERFICIE ERODIDA (5-6)

MANOMETRO [kgf/cm <sup>2</sup> ]	FENDA DE TRABALHO [mm]						
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
0,1	4,00	3,50	4,75	5,00	5,00	5,00	
0,2	7,00	6,50	7,25	7,50	7,50	8,00	
0,3	9,50	8,75	9,00	9,50	9,85	10,00	
0,4	11,00	10,75	11,00	11,50			

**TABELA 6 - ESCALA DO ROTAMETRO, COMO FUNCAO DO MANOMETRO E DA DISTANCIA ENTRE ELETRODOS - SUPERF.ERODIDA**

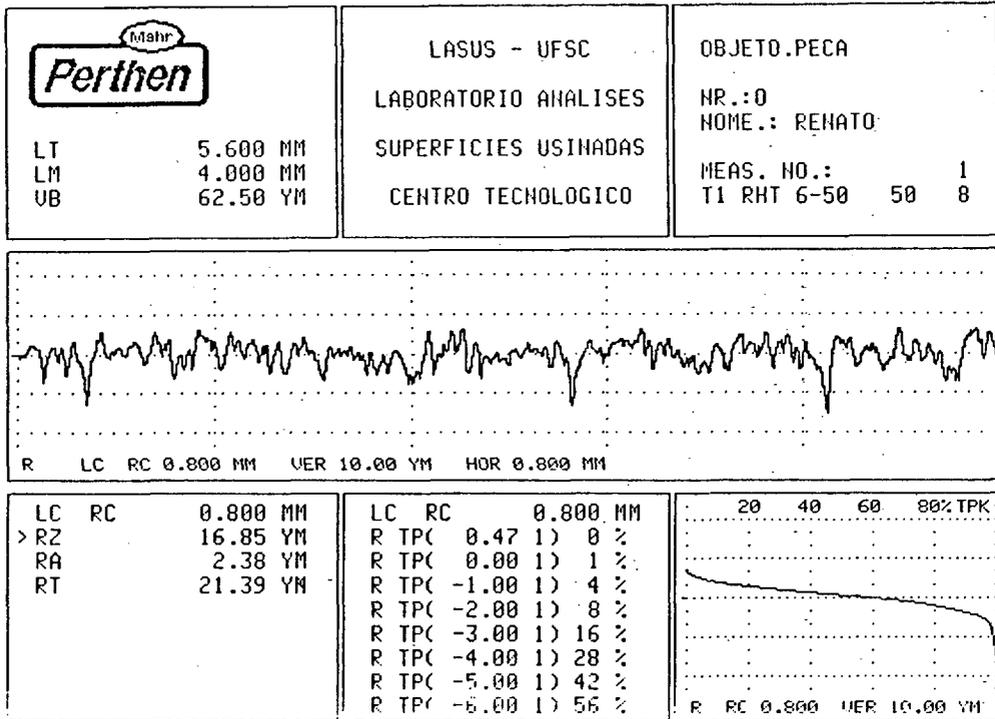
**ROTAMETRO EM FUNCAO DO MANOMETRO E FENDA DE TRABALHO (escala)**

PARA SUPERFICIE ERODIDA (13-Q)

MANOMETRO [kgf/cm <sup>2</sup> ]	FENDA DE TRABALHO [mm]						
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
0,1	4,75	3,00	3,75	4,25	5,00	5,75	5,25
0,2	5,25	5,50	5,75	6,75	7,00	8,50	8,75
0,3	6,50	6,75	7,00	8,25	9,00	11,00	
0,4	7,50	8,00	8,50	10,00	11,00		
0,5	9,50	9,50	9,75				
0,6	10,50	10,50	10,75				

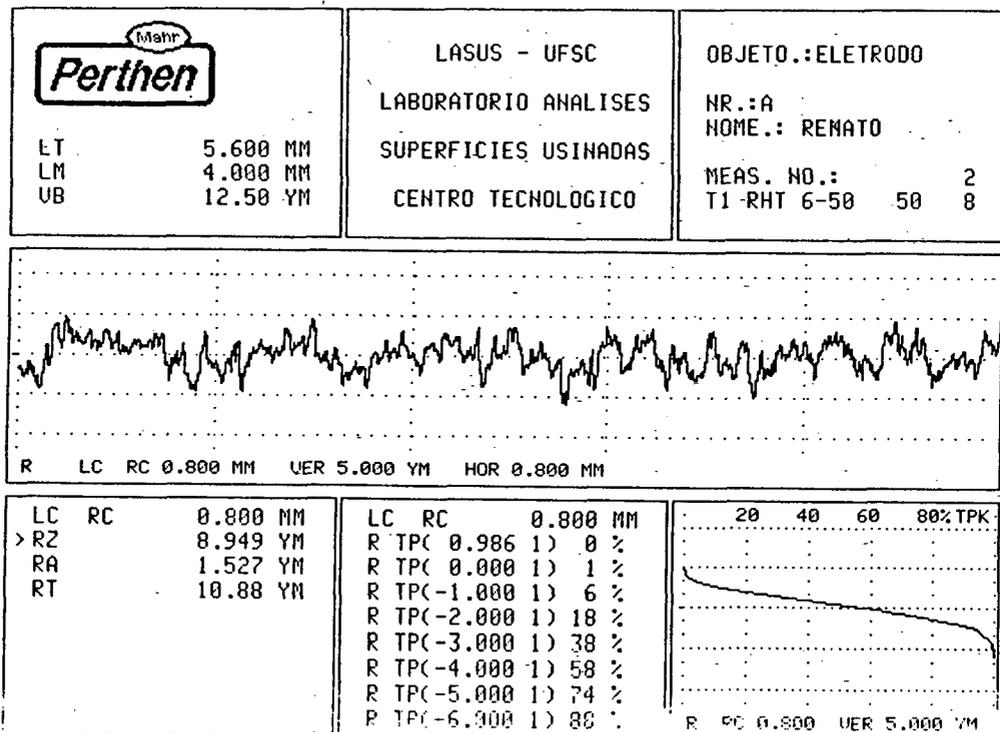
**TABELA 7 - ESCALA DO ROTAMETRO, COMO FUNCAO DO MANOMETRO E DA DISTANCIA ENTRE ELETRODOS - SUPERF.ERODIDA**

perthometer S8P 4.51



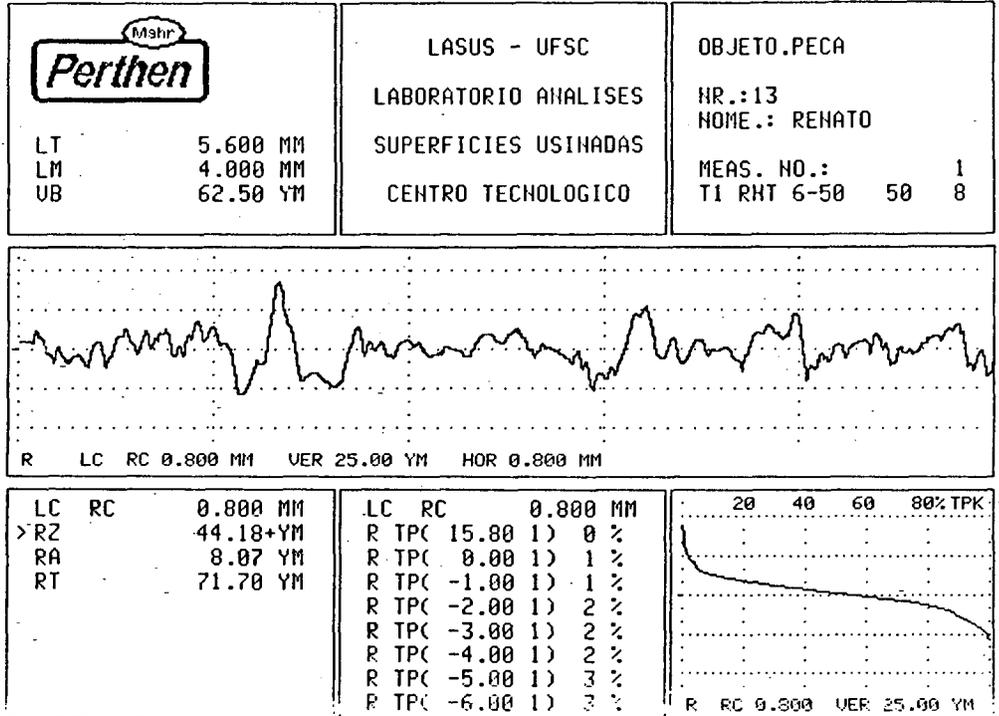
ANEXO A - Fig 8

perthometer S8P 4.51



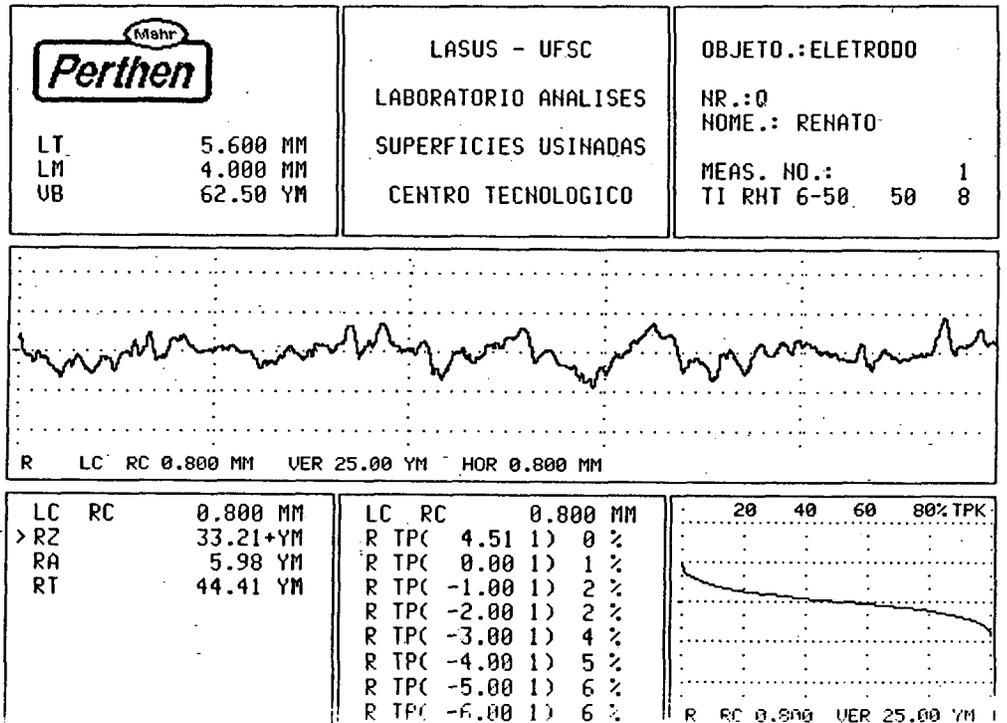
ANEXO A - Fig 9

perthometer S8P 4.51



ANEXO A - Fig 10

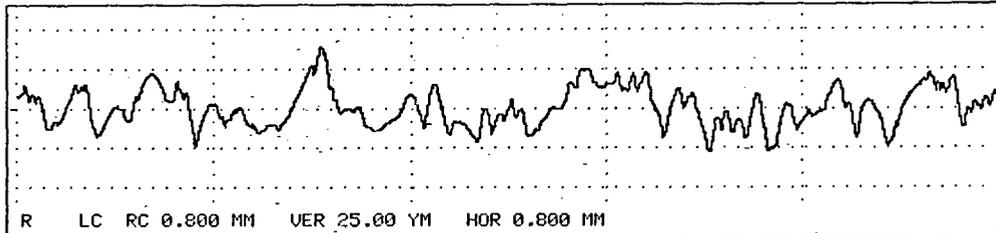
perthometer S8P 4.51



ANEXO A - Fig 11

perthometer S8P 4.51

	LASUS - UFSC		OBJETO.PECA	
	LABORATORIO ANALISES		NR.:5	
	SUPERFICIES USINADAS		NOME.: RENATO	
LT	5.600 MM	CENTRO TECNOLOGICO		MEAS. NO.: 1
LM	4.000 MM			T1 RHT 6-50 50 8
UB	62.50 YM			

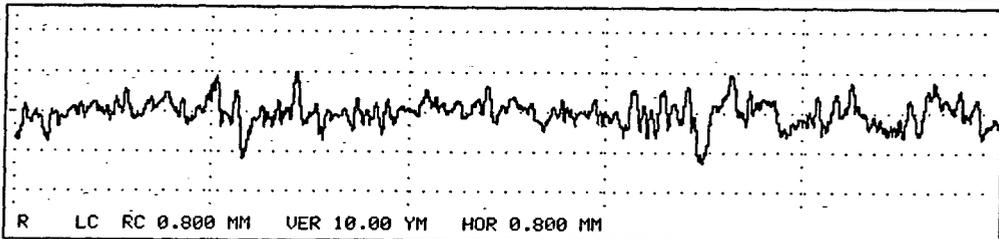


LC RC 0.800 MM	LC RC 0.800 MM	
>RZ 48.87+YM	R TPC 10.90 1) 0 %	
RA 9.99 YM	R TPC 0.00 1) 1 %	
RT 67.58 YM	R TPC -1.00 1) 1 %	
	R TPC -2.00 1) 1 %	
	R TPC -3.00 1) 1 %	
	R TPC -4.00 1) 2 %	
	R TPC -5.00 1) 3 %	
	P TPC -6.00 1) 3 %	R RC 0.800 UER 25.00 YM

ANEXO A - Fig 12

perthometer S8P 4.51

	LASUS - UFSC		OBJETO.:ELETRODO	
	LABORATORIO ANALISES		NR.:G	
	SUPERFICIES USINADAS		NOME.: RENATO	
LT	5.600 MM	CENTRO TECNOLOGICO		MEAS. NO.: 1
LM	4.000 MM			T1 RHT 6-50 50 8
UB	62.50 YM			

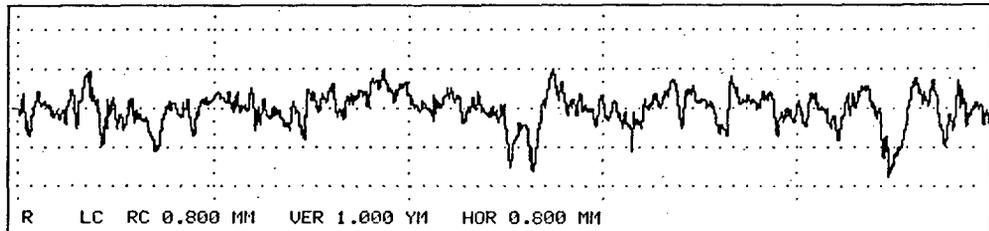


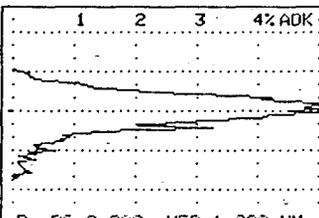
LC RC 0.800 MM	LC RC 0.800 MM		
>RZ 16.62 YM	R TPC 2.10 1) 0 %		
RA 2.43 YM	R TPC 0.00 1) 1 %		
RT 22.65 YM	R TPC -1.00 1) 2 %		
	R TPC -2.00 1) 3 %		
	R TPC -3.00 1) 6 %		
	R TPC -4.00 1) 9 %		
	R TPC -5.00 1) 15 %		
	R TPC -6.00 1) 24 %		R RC 0.800 UER 10.00 YM

ANEXO A - Fig.13

perthometer S8P 4.51

	LASUS - UFSC LABORATORIO ANALISES SUPERFICIES USINADAS CENTRO TECNOLÓGICO		OBJETO: PECA RETIF. NR.: 01 NOME.:	
	LT 5.600 MM LM 4.000 MM UB 12.50 YM			MEAS. NO.: 3 TI RHT 6-50 50 8



LC RC 0.800 MM > RMAX 2.576 YM RZ 2.166 YM RP 0.980 YM RPM 0.898 YM RA 0.323 YM RT 2.720 YM	LC RC 0.800 MM R TP( 0.176 1) 0 % R TP( 0.000 1) 1 % R TP(-1.000 1) 71 % R TP(-2.000 1) 98 % R TP(-3.000 1) 100 %	
P. RC 0.800 UER 1.000 YM		

ANEXO A - Fig 14

perthometer S8P 4.51

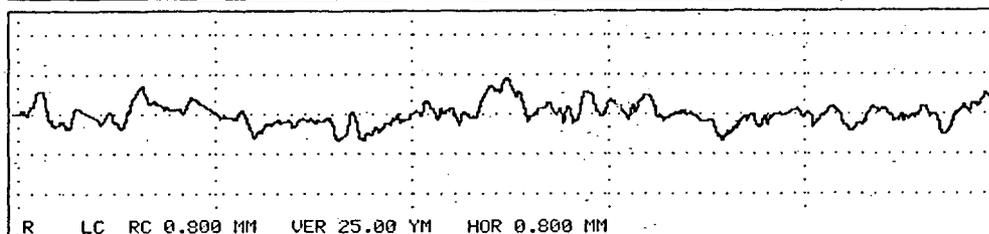
	LASUS - UFSC LABORATORIO ANALISES SUPERFICIES USINADAS CENTRO TECNOLÓGICO		OBJETO: ÉLET. USINADO NR.: 01 NOME.:	
	LT 5.600 MM LM 4.000 MM UB 62.50 YM			MEAS. NO.: 2 TI RHT 6-50 50 8

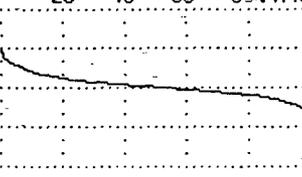
PARAMETER			STATISTICS N = 2						
	LC	RC 0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	10.23	3.48	4.92	12.70	7.77		
2	RZ	YM	7.47	0.89	1.26	8.11	6.84		
3	RP	YM	6.21	2.97	4.20	8.31	4.10		
4	RPM	YM	3.93	0.66	0.93	4.40	3.47		
5	RA	YM	1.10	0.22	0.31	1.26	0.94		
6	RT	YM	10.43	3.41	4.82	12.84	8.02		

ANEXO A - Fig.15

perthometer S8P 4.51 DAT 19.05.92 10:03

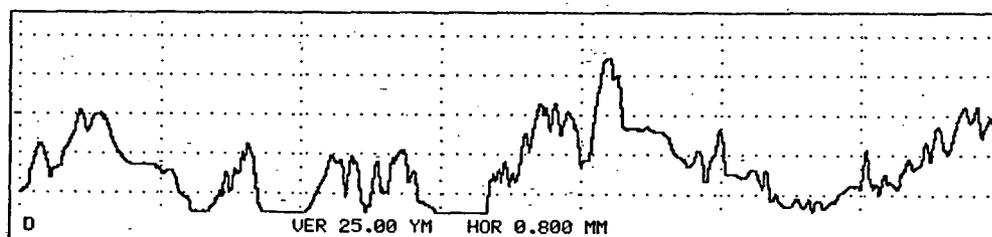
	LASUS - UFSC		OBJETO: ELETRODO
	LABORATORIO ANALISES		HR.: Q
	SUPERFICIES USUADAS		NOME.: RENATO
LT 5.600 MM	CENTRO TECNOLOGICO		MEAS. NO.: 1
LM 4.000 MM			T1 RHT 6-50 50 8
UB 62.50 YM			

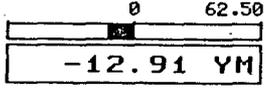


LC RC 0.800 MM	LC RC 0.800 MM	20 40 60 80%TPK
>RMAX 29.79 YM	R TPC 5.21 1) 0 %	
RZ 26.44+YM	R TPC 0.00 1) 1 %	
RA 5.42 YM	R TPC -1.00 1) 2 %	
RT 39.87 YM	R TPC -2.00 1) 2 %	
	R TPC -3.00 1) 3 %	
	R TPC -4.00 1) 5 %	
	R TPC -5.00 1) 6 %	
	R TPC -6.00 1) 8 %	
		R RC 0.800 VER 25.00 YM

ANEXO A - Fig 16

perthometer S8P 4.51 DAT 19.05.92 10:08



MEAS. NO.: 1	
T1 RHT 6-50 50 8	
OBJETO: PECA - ACO	
NR.: 13	
NOME.: RENATO	
UB 62.50 YM 000	
LT 5.600 MM 00000	
Z=5	

PRDG:

FLT GS <input checked="" type="checkbox"/> M5 M7 SF	<input checked="" type="checkbox"/> N S U	<input type="checkbox"/> 000000	<input type="checkbox"/> 000000	AUT <input type="checkbox"/> EXT <input type="checkbox"/>
PRF D G P U <input checked="" type="checkbox"/>	LC 0.800 MM	VER AUTOM.	HOR AUTOM.	NEG <input type="checkbox"/> TTR <input type="checkbox"/>

F1 LT	F2 UB	F3 TEXT	F4 PICK-UP	F5 PAUT	F6 INCLIN.	F7 INFO
-------	-------	---------	------------	---------	------------	---------

RUN: MESSEN: COPY

ANEXO A - Fig.17

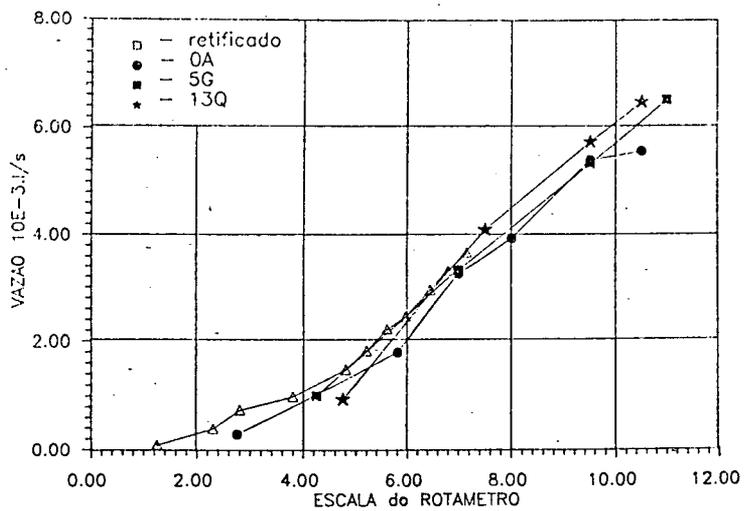


FIG. 18 - Curvas da vazão em função da escala do rotâmetro, para abertura entre eletrodos de 0,01 mm.

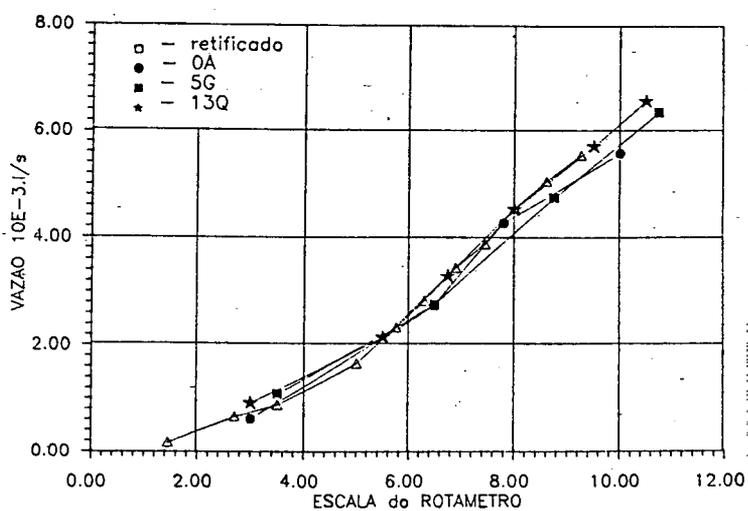


FIG. 19 - Curvas da vazão em função da escala do rotâmetro, para abertura entre eletrodos de 0,02 mm.

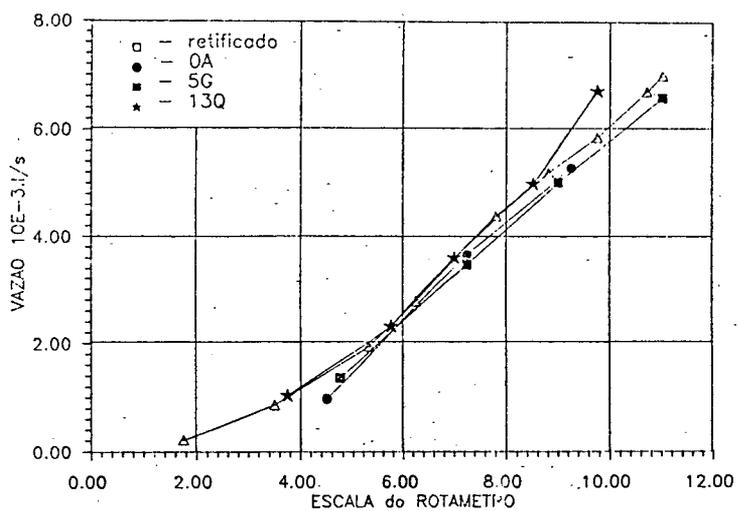


FIG. 20 - Curvas da vazão em função da escala do rotâmetro, para abertura entre eletrodos de 0,03 mm.

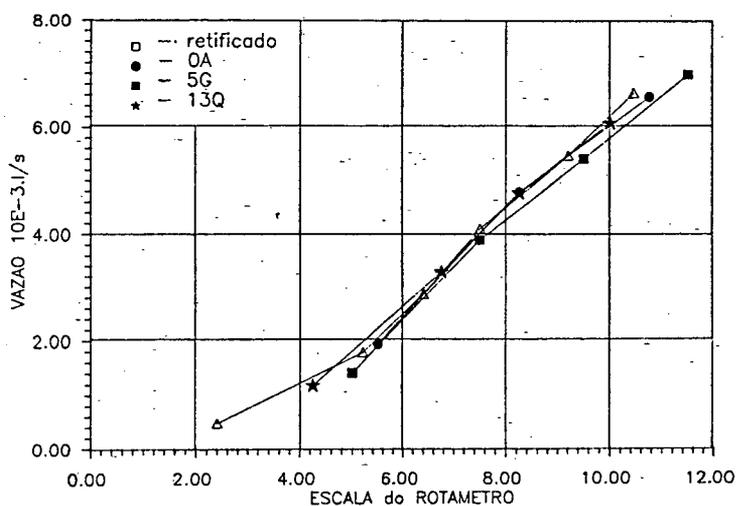


FIG. 21 - Curvas da vazão em função da escala do rotâmetro, para abertura entre eletrodos de 0,04 mm.

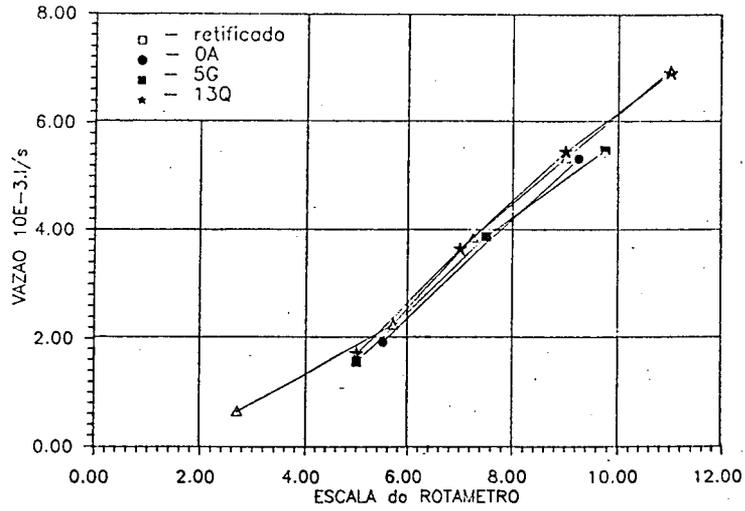


FIG. 22 - Curvas da vazão em função da escala do rotâmetro, para abertura entre eletrodos de 0,05 mm.

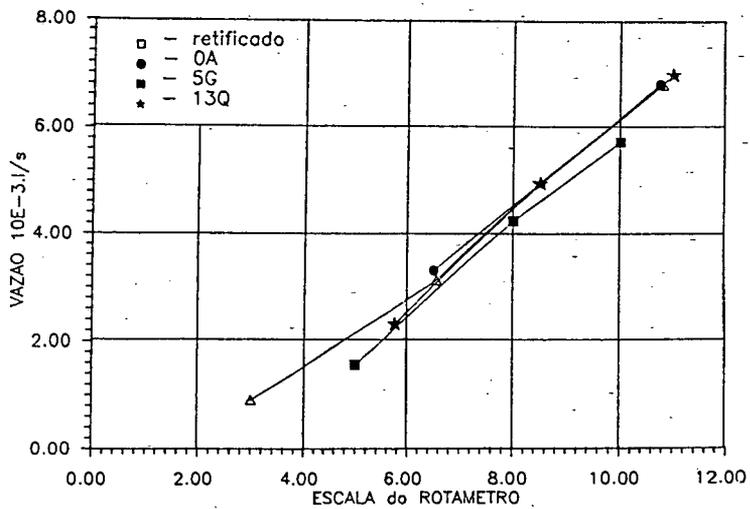


FIG. 23 - Curvas da vazão em função da escala do rotâmetro, para abertura entre eletrodos de 0,06 mm.

## ANEXO B

## ANEXO B (1)

## Máquina de eletroerosão

marca : Engemaq

modelo : EDM - 200 Mx/25A/380 V

cabecote vertical com deslocamento hidráulico

com um curso no eixo Z de.....140 mm

- perpendicularismo do eixo lat/fr .....0,008 mm

dimensão da mesa de trabalho.....450 x 230 mm

- curso longitudinal (X).....250 mm

- curso transversal (Y).....150 mm

- divisão do colar .....0,005 mm

- paralelismo no curso X-Y .....0,018 mm

## Cuba ou bandeja de trabalho

- tempo de enchimento .....45 seg

- tempo para esvaziar.....40 seg

- volume máximo de dielétrico..... 65 l

## sistema dielétrico

- capacidade do tanque.....300 l

- força motriz da bomba.....0,5 CV

- vazão da bomba.....3600 l/h

- pressão máxima da bomba..... 1,5 kgf/cm<sup>2</sup>

- numero de filtros de papel.....1

- capacidade de filtragem ..... 5 µm

## sistema hidráulico

- capacidade do tanque.....28 l
- força motriz.....1,5 CV
- pressão de trabalho.....16 a 22 kgf/cm<sup>2</sup>

## características elétricas

- tensão trifásica 60 Hz.....220/380V
- corrente máxima.....14/8,5 A
- consumo máximo.....5 kVA

## ANEXO B (2)

## Osciloscópio de memória

## Características técnicas:

- marca .....Philips
- modelo .....PM 3305 (U)
- fabricante...Philips International B.V.Industrial & Electro-Acoustic Systems Div.Eindhoven ,Netherlands
- visor da tela com reticulado, de fácil visualização, 10 kV de aceleração potencial, oferecendo uma alta intensidade nos traços e boa definição de sinal
  - tamanho da tela.....80 x 100 mm
- na vertical
  - número de canais.....2 (A - B)+ 2 canais auxiliares (C - D)
  - 2 mV/divisão sensível a 35 Mhz
- na horizontal
  - tempo base.....0,5 s/div a 0,1 µs/div
  - expandível na tela..... 4 vezes
- memória digital
  - com excelente resolução, porque os 4K x 8 bits de memória são colocados numa tela completa
  - modo comparativo, com no máximo 8 sinais na tela
  - modo min/máx.
  - 4 canais
  - velocidade max.de conversão 2Mhz AD

## ANEXO B (3)

## Plotter Pm 8153

## Características técnicas:

- marca.....Philips
- modelo.....PM 8153
- fabricante ....Philips International B.V.Industrial & Electro-Acoustic Systems Div.Eindhoven,Netherlands
- área máxima plotada.....294 x 420 mm
- papel - pode ser em folha avulsa até ISO A3 ou em forma de rolo com largura de 297 mm e 20 m de comprimento, com transporte programado para um incremento de 10 mm para um mínimo de 100mm.
- fixação do papel .....eletroestática
- número de canetas à disposição.....8
- resolução.....0,025 mm
- repetibilidade com uma caneta.....0,1 mm
- de caneta para caneta.....0,3 mm
- velocidade máxima da caneta.....1000 mm/s
- para programa.....50-1000 mm/s incremento de 10 mm/s
- velocidade para plotar caracteres.....5 caract./s
- altura máx.do caracter.....3 mm
- estilo.....matricial
- força da pena.....0,1 a 0,4 N
- interface .....serial RS-232-C/CCITT V.24 e 20 mA
- entrada para o"buffer".....1536 bytes

- fonte de caracteres Std ASCII e outras nacionalidades
  - fontes para os estilos:matrix-Simplex-Multiplex
- linguagem gráfica PM 8153 std, compatível com Pm 8151 e Pm 8154
- display.....duas linhas com 20 caracteres

## ANEXO B (4)

## AMPLIFICADOR DE CORRENTE

- características técnicas :
- marca.....Tektronix
- modelo.....AM 503
- fabricante.....Tektronix
- calibração de atenuação.....1,2,5 sequencial
- corrente de entrada.....AC ou DC
- limite para corrente de prova usado.....5 Mhz
- resolução de tempo..... $< 3,5$  ns

## PONTEIRA

- marca.....Tektronix
- modelo.....A 6302
- fabricante.....Tektronix
- capacidade de medição.....20 A e picos até 50 A
- resolução de tempo..... $< 7$  ns
- sensibilidade.....1 mA a 100 Mhz

