

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

USINAGEM POR ELETROEROSÃO COM VARIAÇÃO
DA ÁREA DO ELETRODO

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

JÂNIO RODRIGUES LOPES

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 1991

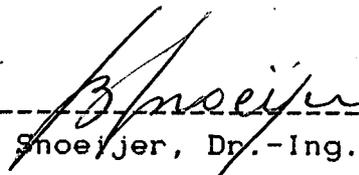
USINAGEM POR ELETROEROSÃO COM VARIAÇÃO
DA ÁREA DO ELETRODO

JÂNIO RODRIGUES LOPES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA
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 da Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

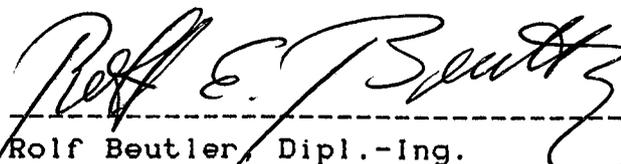
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.



Prof. Jaik Carlos Dutra, Dr.-Eng.



Rolf Beutler, Dipl.-Ing.

A minha esposa

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, pelo apoio e pela orientação deste trabalho.

Ao Prof. Dr.-Ing. Berend Snoeijer, ao Prof. Dr.-Eng. Jair Carlos Dutra e ao eng. Rolf Beutler, pelo auxílio prestado.

A ETF/SC, pelo fornecimento dos equipamentos, materiais, ferramentas e pelo financiamento deste trabalho.

Aos professores, técnicos e bolsistas dos Laboratórios de Máquinas Operatrizes, Metrologia, Tratamento Térmico e Metalografia da ETF/SC, pelo auxílio prestado.

Aos colegas de curso e professores do Departamento de Engenharia Mecânica.

Em especial, aos colegas de curso Moacir Eckhardt, Juan Carlos Castillo Villarroel, Rolf Bertrand Schroeter, Marzely Gorges e aos meus pais e a minha esposa Zelita Weiss Lopes, pelo apoio prestado.

Ao Eng. Larry Fiori Ollé pelo auxílio na montagem dos experimentos.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

INDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1. Eletroerosão por faíscas	3
2.2. Histórico	12
2.3. Experiências sobre o efeito da área do eletrodo sobre a performance da eletroerosão	19
3. OBJETIVOS DO TRABALHO	22
4. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	23
4.1. Generalidades	23
4.2. Projeto e fabricação dos eletrodos	24
4.2.1. Eletrodo-ferramenta	24
4.2.2. Eletrodo-peça	26
4.3. Equipamentos utilizados nos trabalhos experimentais	27
4.4. Fluido dielétrico	27
4.5. Sistema de limpeza	28
4.6. Calibração	29
4.6.1. Calibração da corrente de usinagem	29
4.6.2. Calibração do tempo de impulso e pausa	31
4.7. Determinação da profundidade de usinagem	33
4.8. Metodologia de ensaio	34

5. DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS	37
5.1. Preparação dos ensaios	37
5.1.1. Planilha de ensaio	37
5.1.2. Codificação dos eletrodos-peça e ferramenta	37
5.2. Realização dos ensaios	38
5.2.1. Regulagem do servo-comando	38
5.2.2. Regulagem do tempo de impulso e do tempo de pausa	38
5.2.3. Sistema de limpeza da fenda de trabalho	39
5.2.4. Ensaio propriamente dito	41
5.3. Verificação da rugosidade frontal	41
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
6.1. Efeito da área de usinagem do eletrodo sobre a qualidade superficial	43
6.2. Efeito da área de usinagem do eletrodo sobre a taxa de remoção	46
6.3. Efeito da área de usinagem do eletrodo sobre o desgaste do eletrodo	48
6.4. Efeito da área de usinagem do eletrodo sobre o desgaste relativo	49
6.5. Otimização do processo de usinagem por eletroerosão	51
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO	55
7.1. Conclusões	55
7.2. Sugestões para continuidade do trabalho	56

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXO A	59
ANEXO B	78
ANEXO C	81

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

2.1. Sistema de usinagem	4
2.2 a e b. Representação esquemática das etapas de descarga	5 e 6
2.3. Características elétricas no gerador de impulsos estático	8
2.4. Alguns tipos de pulsos medidos por analisador transiente	11
2.5. Circuitos básicos para geradores de faíscas	12
2.6. Erosão convencional e planetária	14
2.7. Desgaste da aresta do eletrodo na usinagem convencional e planetária	15
2.8. Exemplos dos vários tipos de movimentos planetários	15
2.9. Flexibilidade da usinagem planetária CNC	16
2.10 a e b. Ciclos de usinagem CNC	17 e 18
2.11. Compensação automática do processo de usinagem	19
2.12. Gráfico de taxa de remoção (VW), desgaste do eletrodo (VE) e desgaste relativo (V) em função da área do eletrodo	21
2.13. Efeitos da densidade de corrente sobre a Taxa de remoção (VW), Desgaste do eletrodo (VE) e desgaste relativo (V)....	21

CAPÍTULO 4

4.1. Eletrodos-Ferramenta	24
---------------------------------	----

4.2. Conjunto eletrodo-ferramenta e haste de fixação	25
4.3. Eletrodos-Peça	26
4.4. Sistema de limpeza da fenda de trabalho	28
4.5. Esquema de montagem do Multímetro Analógico	
Elavi 5n	30
4.6. Esquema de montagem para calibração do tempo	
de impulso e pausa	31
4.7. Impulsos registrados no "Plotter"	32
4.8. Ampliação do impulso, para medição do tempo de	
impulso (t_i) e do tempo de pausa (t_o)	33
4.9. Estudo da repetibilidade dos ensaios	36

CAPÍTULO 5

5.1. Influência da área do eletrodo sobre taxa de	
remoção (VW) e desgaste do eletrodo (VE)	39
5.2. Sistema de limpeza por lavagem lateral	40
5.3. Sistema de limpeza por sucção através do eletrodo	40

CAPÍTULO 6

6.1. Influência da área do eletrodo sobre a rugosidade (R_a).....	44
6.2. Influência da área do eletrodo sobre a rugosidade (R_t).....	44
6.3. Influência da corrente de usinagem	
sobre a rugosidade (R_a)	46
6.4. Taxa de remoção (VW) em função da área do eletrodo.....	46
6.5. Taxa de remoção (VW) em função da densidade de corrente.....	47
6.6. Desgaste do eletrodo (VE) em função da área do eletrodo.....	49
6.7. Desgaste relativo (V) em função da área do eletrodo.....	50

- 6.8. Taxa de remoção (VW), desgaste do eletrodo (VE) e
desgaste relativo (V) em função da área (A) para
corrente de 2,5 ampères 51
- 6.9. Taxa de remoção (VW), desgaste do eletrodo (VE) e
desgaste relativo (V) em função da área (A) para
corrente de 5,0 ampères 52
- 6.10. Taxa de remoção (VW), desgaste do eletrodo (VE) e
desgaste relativo (V) em função da área (A) para
corrente de 10,0 ampères 53
- 6.11. Taxa de remoção (VW), desgaste do eletrodo (VE) e
desgaste relativo (V) em função da área (A) para
corrente de 20,0 ampères 54

SIMBOLOGIA

A	mm ²	Área do eletrodo
C	μF	Capacitância
CA		Corrente alternada
CC		Corrente contínua
d	mm	Diâmetro do eletrodo
f _e	Hz	Frequência de descargas
f _p	Hz	Frequência de impulsos
HRC		Dureza Rockwell C
i	Ampère	Corrente
i _e	Ampère	Corrente de descarga
\bar{i}_e	Ampère	Corrente média de descarga
I	Ampère	Corrente de trabalho
J	A/cm ²	Densidade de corrente
p _p	g/cm ³	Peso específico do eletrodo-peça
(P _p) _i	g	Peso inicial do eletrodo-peça
(P _p) _f	g	Peso final do eletrodo-peça
(P _e) _i	g	Peso inicial do eletrodo-ferramenta
(P _e) _f	g	Peso final do eletrodo-ferramenta
p _e	g/cm ³	Peso específico do eletrodo-ferramenta
P ₁	kg	Pré-carga
P ₂	kg	Carga
P _i	kg/cm ²	Pressão de injeção
P _s	kg/cm ²	Pressão de sucção
R		Resistência
R _a	μm	Desvio médio aritmético (rugosidade R _a)
R _z	μm	Rugosidade média (rugosidade R _z)

R_t	μm	Altura máxima das irregularidades (rugosidade R_t)
t	s	Tempo
t_d	μs	Tempo de retardo
t_e	μs	Tempo de descarga
t_i	μs	Tempo de impulso
t_o	μs	Tempo de intervalo (tempo de pausa)
t_p	μs	Tempo do período
t_u	min	Tempo de usinagem
u	volts	Tensão
u_e	volts	Tensão de descarga
\bar{u}_e	volts	Tensão média de descarga
u_i	volts	Tensão em aberto
U	volts	Tensão de trabalho
ΔE	g	Variação de massa do eletrodo
Δp	g	Variação de massa da peça
v	%	Desgaste relativo
VE	mm^3/min	Taxa de desgaste (desgaste do eletrodo)
VE_e	$\text{mm}^3/\text{descarga}$	Desgaste por descarga
V_p	mm^3	Volume de material a remover
VW	mm^3/min	Taxa de remoção
\bar{VW}	mm^3/min	Taxa de remoção média
VW_e	$\text{mm}^3/\text{descarga}$	Remoção por descarga
W_e	mJ	Energia de descarga
λ	%	Relação de frequência
τ		Relação de contato

RESUMO

O objetivo deste trabalho é determinar as condições de usinagem por eletroerosão onde se tenha a maior taxa de remoção e o menor desgaste relativo, verificando o comportamento do acabamento superficial, quando se tem uma variação na área do eletrodo. São estudados os efeitos das variáveis do processo - corrente de usinagem, relação de contato (tempo de impulso e pausa) e área de usinagem do eletrodo - sobre a qualidade superficial, taxa de remoção, desgaste do eletrodo e desgaste relativo.

Verifica-se que existem valores de áreas de eletrodos mais apropriadas para se obter a maior taxa de remoção com o menor desgaste do eletrodo. Os ensaios mostram que é possível diminuir os tempos de usinagem, mantendo o desgaste relativo em valores inferiores a 1% para as diversas correntes de usinagem.

ABSTRACT

The objective of this work is to determinate the conditions of electrical discharge machining where we have higher metal removal rate and less wear ratio, checking the surface finishing behavior, for variations of the electrode area. The effects of the variation of the parameters - current, touch relation (impulse time and pause) and electrode machining area - are studied on the surface finishing, metal removal rate, electrode wear rate and wear ratio.

It is observed that optimization of the electrode area is possible and higher metal removal rate with less electrode wear rate. The tests show that it is possible to reduce machining time, keeping the wear ratios values lower than 1% for the machining currents used.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A usinagem por eletroerosão por faíscas (EDM) é um processo de fabricação com remoção de material pela ação de descargas elétricas sobre a superfície da peça. O processo pode ser empregado na remoção de materiais condutores de eletricidade, metálicos ou não metálicos. Devido à característica reprodutiva da imagem do eletrodo-ferramenta na peça, o processo é empregado amplamente na fabricação de ferramentas de conformação, de corte e de injeção, bem como na fabricação de componentes de protótipos e pequenas séries. A eletroerosão por faíscas sofreu um desenvolvimento muito grande nos últimos anos e hoje está representada em fábricas de quase todos os ramos da fabricação mecânica, com grande aplicação em ferramentarias, abrangendo dimensões de componentes com alguns milésimos de milímetro até 2,0 m² de área frontal do eletrodo.

O aperfeiçoamento dos equipamentos de usinagem por eletroerosão por faíscas é uma constante nas indústrias que trabalham neste setor, no Brasil. A retração do mercado brasileiro faz com que os fabricantes de máquinas de eletroerosão por faíscas aperfeiçoem os modelos já existentes no mercado e lancem novos modelos. Segundo publicação na revista Máquinas e Metais, Fiorillo afirma: "Em apenas 12 meses os fabricantes do setor colocaram 17 novas versões à disposição dos usuários"/1/.

Pesquisas recentes (1989) mostram que a maioria das máquinas de eletroerosão por faíscas fabricadas no Brasil são de penetra-

ção, partindo-se para introdução do comando numérico e erosão a fio.

Hoje, a usinagem por eletroerosão por faíscas é realizada com corrente média constante ao longo de toda usinagem, mesmo que a área a usinar seja variável. Isto é encontrado, por exemplo, na usinagem de um tronco de cone, onde a corrente é escolhida em função da taxa de remoção, desgaste relativo e acabamento. Neste caso, a área varia ao longo do processo, e com a utilização do comando numérico seria possível, conhecendo os pontos onde a remoção é maior para um desgaste relativo menor, variar a corrente, otimizando o processo.

Para a otimização do processo, obtendo-se um aumento na taxa de remoção e como consequência uma diminuição nos custos através da diminuição do tempo de usinagem, foram realizados estudos para verificar o comportamento dos parâmetros de usinagem quando a área varia ao longo do tempo em uma máquina de eletroerosão com gerador de impulsos estáticos.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1. Eletroerosão por faíscas

Eletroerosão por faíscas é um processo térmico onde o material é removido por uma sucessão de descargas elétricas que ocorrem entre um eletrodo e uma peça imersos em um fluido dielétrico (fig. 2.1). Koenig, Wertheim e outros tentaram explicar os fenômenos físicos durante uma descarga elétrica /3,5,15/. No início de cada descarga observa-se uma ionização localizada, sucedida da ruptura do dielétrico e formação de um canal de plasma. Segundo Hensgen, a ruptura do dielétrico é tida quando observa-se a existência de um canal de elétrons livres na região de descarga. Esses elétrons podem ser emitidos pela superfície metálica catódica para diferenças de tensão maiores que 10^7 V/cm, como são atingidas na eletroerosão por faíscas. A emissão de elétrons está baseada na permeabilidade da barreira de potencial que envolve a superfície do eletrodo, baseado na teoria quântica do efeito de "Tunnel". Além disso, a emissão condicionada pela temperatura pode levar a um aumento dos transportadores de carga na fenda de trabalho (GAP). Na eletroerosão por faíscas temos uma superposição de ambos os efeitos, uma vez que ambas as condições, de campo elétrico elevado e temperatura elevada, podem ser preenchidos.

Sob a influência do campo elétrico aplicado, os elétrons movem-se do cátodo para o ânodo e, por ionização por impacto aumentam o nú-

mero de transportadores de carga. A avalanche de elétrons assim formada se torna crítica para um número de aproximadamente 10^8 transportadores de carga, isto é, para este número o canal de plasma começa a formar-se a partir da cabeça da avalanche.

A partir da parte central da fenda formam-se braços de canal que se orientam para o ânodo e para o cátodo e que se propagam com uma velocidade de aproximadamente 10^5 m/s. O braço do canal orientado para o ânodo atinge o ânodo antes do braço oposto atingir o cátodo. Com isto supõe-se que a remoção de material possa iniciar no ânodo antes mesmo do canal de plasma ter sido completado. Decorrente do impacto dos elétrons na superfície anódica, o canal de plasma está completo quando o braço orientado para o cátodo atingir a superfície catódica.

O tempo necessário para unir os dois eletrodos pelo canal de plasma é indicado como sendo de 10^{-7} a 10^{-8} segundos para gases e de 10^{-4} a 10^{-5} segundos para dielétricos líquidos /17/.

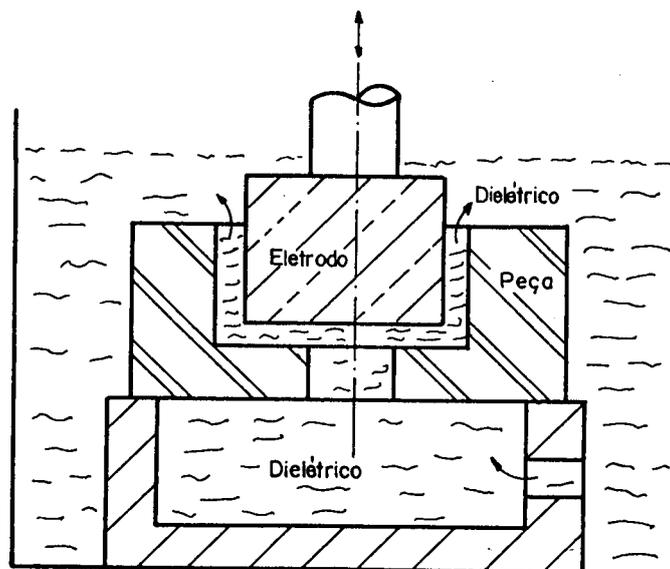
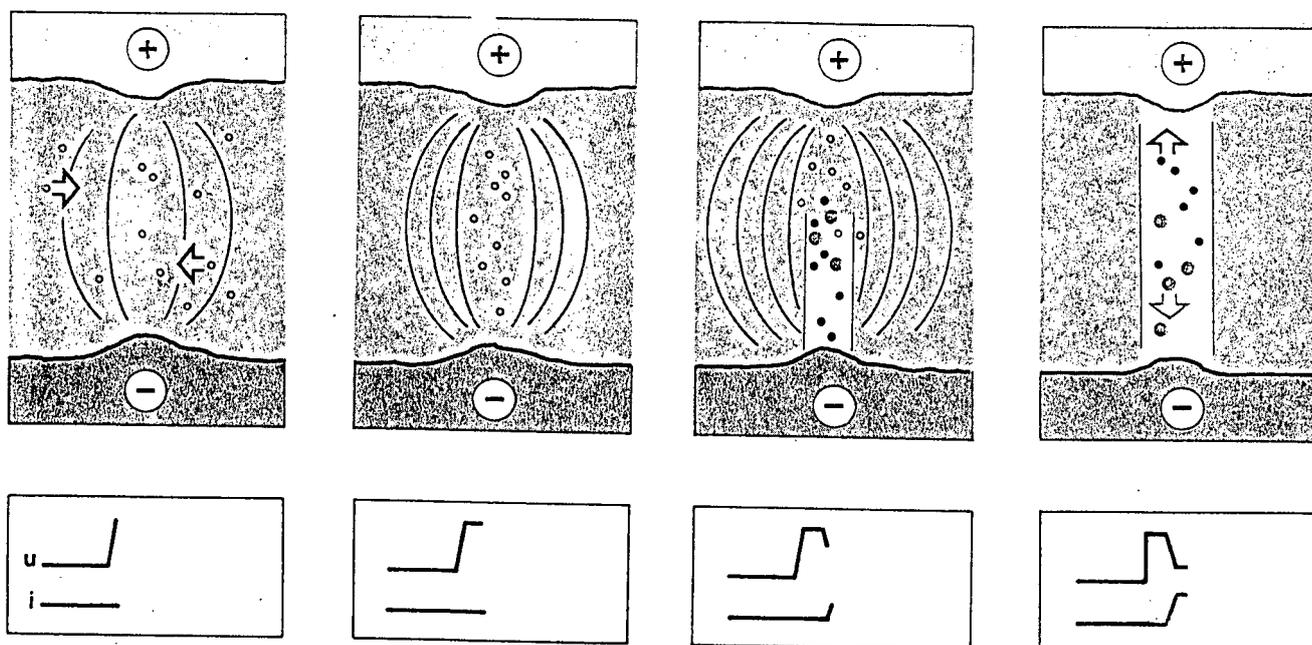


FIG. 2.1 - Sistema de usinagem /13/.

Após a formação do canal de plasma, a temperatura pode tornar-se muito alta (maior que 10.000 K), gerando fusão e vaporização localizada do metal na face dos eletrodos (fig. 2.2 a e b). A vaporização é crescente, e a pressão localizada pode ser muito alta (acima de 100 bar). Com a interrupção da corrente de descarga, devido à troca rápida de calor com o fluido dielétrico vizinho, uma parte do metal fundido é expulso da peça, formando pequenas partículas sólidas. Outra parte do metal fundido permanece e resolidifica no fundo das crateras [2/].



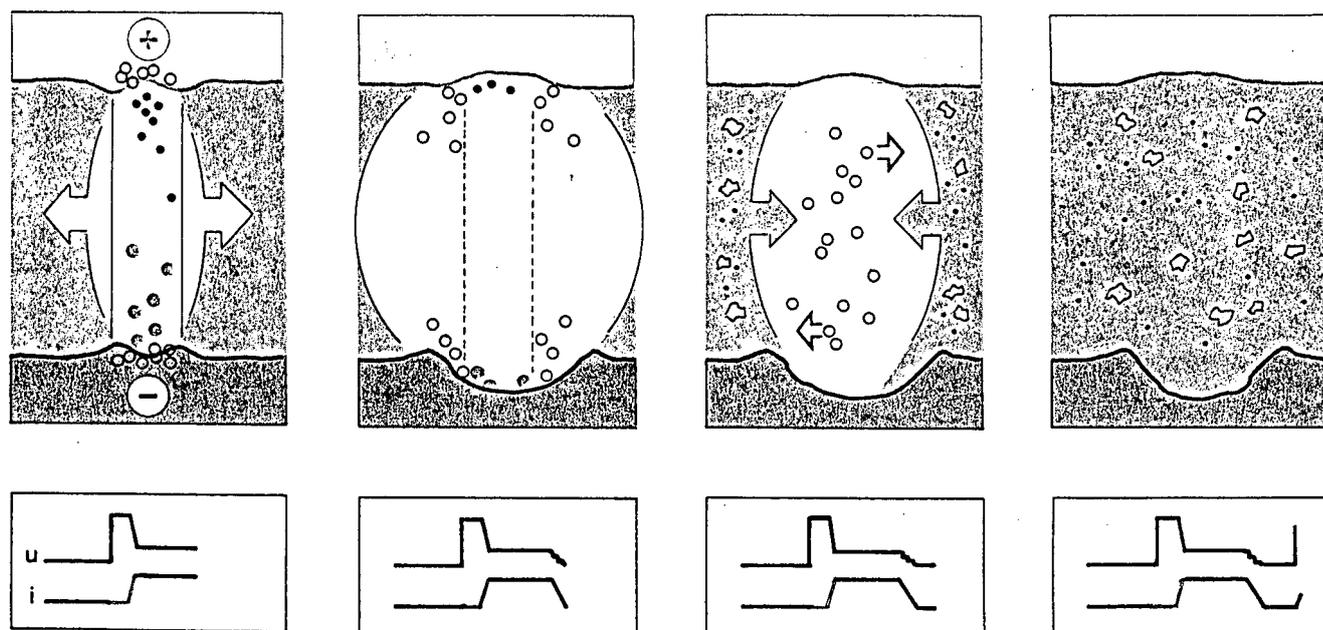
A - Tensão contínua na fenda de trabalho produz um campo elétrico.

B - Partículas transportadas de carga orientam-se na direção dos campos de formação de pontes

C - Sobre estas pontes de partículas forma-se (após o tempo de retardo) um canal de descargas.

D- As partículas positivas correm para o eletrodo negativo, as partículas negativas para o eletrodo positivo (fluxo de corrente). Pressão e temperatura atingem seu valor máximo.

FIG. 2.2 a - Representação esquemática das etapas de descarga [3/].



E - O canal de descarga aumenta, o que conduz a uma diminuição da pressão e da temperatura. Uma fusão se origina.

F - Desligamento da corrente para a condução das partículas carregadas. O canal de descarga se rompe.

G - A ruptura do canal de descarga (implosão) conduz a uma expulsão da massa fundida.

H - Partículas metálicas e produtos da erosão permanecem no líquido.

FIG. 2.2 b - Representação esquemática das etapas de descarga /3/.

Dependendo da fenda de trabalho que separa os eletrodos, quatro diferentes tipos de impulsos podem ser distinguidos: impulso em vazio, descarga elétrica, curto circuito e descarga falha. Eles são usualmente definidos com base na evolução da tensão de descarga e (ou) corrente de descarga no tempo (fig. 2.3). A efetiva remoção de material e desgaste do eletrodo podem diferir significativamente.

A queda de tensão em uma descarga normal entre dois eletrodos compõe-se de uma queda de tensão anódica, uma queda de tensão catódica e uma queda de tensão no comprimento do canal de plasma. A queda de tensão no canal de plasma não contribui para a remoção de material. Para polaridade anódica da peça a queda de tensão anódica

contribui significativamente na remoção de material nas descargas de curta duração (mecanismo de sublimação). Para polaridade catódica da peça a queda catódica contribui mais para a remoção de material em descargas de longa duração.

O impulso em vazio ocorre quando a distância entre eletrodos é muito grande, e não contribui para remoção de material ou desgaste do eletrodo.

Quando há um contato entre peça e eletrodo ocorre um curto-circuito com pequena contribuição para remoção de material, porque a queda de tensão através da fenda de trabalho é muito pequena e a energia é dissipada pelo efeito Joule nos pontos de contato ao longo dos condutores e no gerador de pulsos. No processo, o impulso de corrente é limitado externamente pelo gerador de pulso.

Entre esses dois casos extremos existe, dependendo da fenda de trabalho, a descarga elétrica e a descarga falha. Durante o processo estabilizado ocorrem predominantemente descargas boas, ao passo que no processo instável ocorrem descargas falhas. Se as descargas falhas ocorrem predominantemente em alguns pontos, a superfície do eletrodo pode sofrer severos danos. A descarga falha ocorre quando o canal de plasma do pulso anterior não é completamente desionizado. A corrente durante o impulso seguinte flui ao longo da mesma região. Para que haja um processo estabilizado é necessário que a desionização seja completa e se possa formar um novo canal de plasma. Impulsos falhos também ocorrem quando tem-se contato galvânico entre eletrodos e partículas de remoção. Não havendo tempo suficiente para a desionização da fenda de trabalho podem ocorrer descargas na forma de arcos elétricos.

Acredita-se que somente a descarga elétrica realmente contribui para a remoção de material de modo desejado /4/.

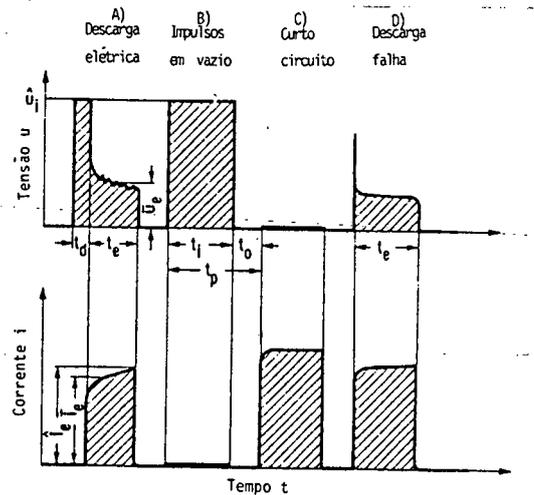


FIG. 2.3 - Características elétricas no gerador de impulsos estático /5/.

Com as informações da figura 2.3, é possível deduzir algumas grandezas importantes para caracterização e avaliação do processo, e defini-las de acordo com as recomendações da VDI 3402.

- A duração da descarga (t_e) é o tempo em que há corrente elétrica durante a descarga.

- A duração do retardo (t_d) é o tempo desde o início do impulso de tensão até o início da descarga, isto é, até o início do impulso da corrente. O tempo de retardo indica a ionização entre os eletrodos e é necessário para a formação do canal de descarga. Ele depende das condições da fenda de trabalho.

- A duração do impulso (t_i) é o tempo durante o qual a tensão está ligada (este parâmetro pode ser regulado no gerador de impulso). Ele é soma do tempo de descarga mais o tempo de retardo.

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

Para geradores de frequência constante (isofrequentes) e uma duração de impulso pré-determinada pode-se ter tempos de descarga diferentes, devido às condições variáveis na fenda de trabalho.

- A duração do intervalo (t_0) é o tempo entre os impulsos de tensão (regulável no gerador). Durante este tempo, o canal de descarga da faísca anterior é desionizado, de forma que a faísca seguinte pode se dar em local diferente.

- A duração do período (t_p) é o tempo entre o início de um impulso de tensão de uma descarga e o início do impulso de tensão da descarga seguinte. Ele é igual à soma do tempo de impulso (t_i) e o tempo de intervalo (t_0).

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

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

$$f_p = t_p^{-1} = 1/(t_i + t_0) \quad (3)$$

- A relação de contato (ζ) é a relação entre a duração do impulso (t_i) e a duração do período (t_p).

$$\zeta = t_i/t_p \quad (4)$$

- A frequência de descarga (f_θ) é o número de descargas na unidade de tempo.

- A relação da frequência (λ) é a relação da frequência de descarga (f_θ) e a frequência de impulsos (f_p).

$$\lambda = f_\theta/f_p \quad (5)$$

Esta grandeza pode ser utilizada para definir o bom andamento do processo de eletroerosão.

- A tensão em vazio (U_i) se caracteriza pela tensão máxima no impulso, quando não temos corrente. Geralmente ela pode ser regulada em estágios no gerador de impulsos e desta forma determina a abertura da fenda de trabalho para a qual teremos a ruptura do dielétrico.

A tensão de descarga (u_θ) ocorre durante a descarga quando a faísca está formada e temos fluxo de corrente. Como esta grandeza é geralmente dependente do tempo, geralmente é indicada a tensão média

de descarga (\bar{u}_e). A intensidade da tensão média depende do par eletrodo-peça e eletrodo-ferramenta e numa regra geral está situada na faixa de 15 a 40 V.

A corrente de descarga (i_e) ocorre durante a descarga. Também para esta grandeza, geralmente é indicado o valor médio (\bar{i}_e). Ela é limitada pela potência de saída do gerador de impulsos e geralmente pode ser regulada em escalões no gerador.

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

- A corrente de trabalho (I) é a média aritmética da corrente durante a descarga da faísca. A tensão de trabalho (U) e a corrente de trabalho (I) são dois parâmetros que são utilizados para o monitoramento do processo de eletroerosão.

- A energia de descarga (W_e) é a energia transformada durante a descarga da faísca.

$$W_e = \int_{t_e} u_e(t) \cdot i_e(t) dt = \bar{u}_e \cdot \bar{i}_e \cdot t_e \quad (6)$$

A energia de descarga determina o volume removido pela mesma e assim também determina a caracterização do acabamento superficial da peça eletroerodida. Para a avaliação da superfície eletroerodida e para o desempenho da eletroerosão definimos os seguintes parâmetros:

- A remoção por descarga (VW_e) é o volume removido por descarga na peça.

- O desgaste por descarga (VE_e) é o volume de material removido por descarga no eletrodo ferramenta.

- A taxa de remoção (VW) é o volume de material removido da peça na unidade de tempo.

- A taxa de desgaste (VE) é o volume de material desgastado no eletrodo-ferramenta na unidade de tempo.

- O desgaste relativo (V) é a relação entre a taxa de desgaste (VE) e a taxa de remoção (VW)

$$V = VE/VW \quad (7)$$

- Para a qualificação das superfícies produzidas são medidas as rugosidades R_z e R_a /5/.

A variação dos impulsos ao longo do tempo pode ser medida por meio de um analisador transiente. Este instrumento digitaliza em uma velocidade muito alta (5 MHz) a evolução da tensão ou corrente durante a descarga e permite visualizar claramente a ocorrência de pulsos normais durante a operação. A figura 2.4 representa a variação dos impulsos. Estas formas de pulso têm sido importantes na caracterização e classificação dos vários tipos de impulsos /4/.

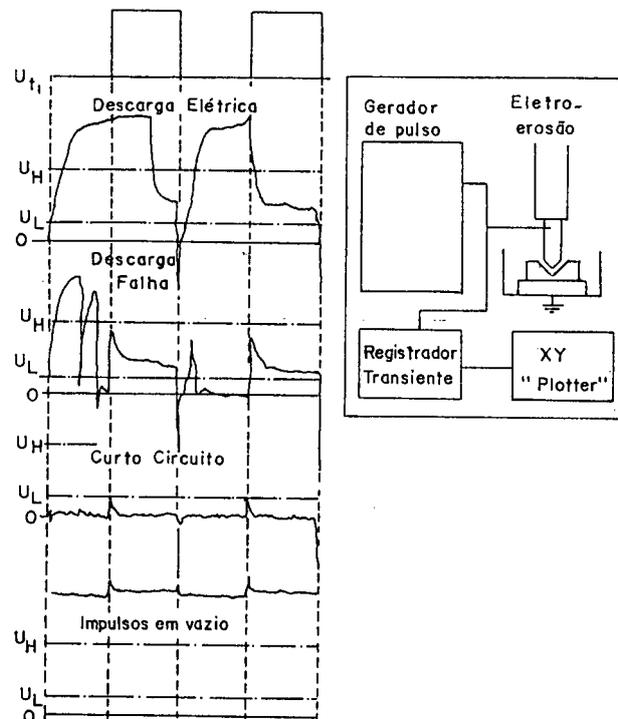


FIG. 2.4 - Alguns tipos de pulsos medidos por analisador transiente /4/.

2.2. Histórico

Lazerencos (1943) projetou o circuito de relaxação para aplicação em eletroerosão por faísca (fig. 2.5). Neste circuito encontramos uma fonte de corrente contínua e como elementos encontramos: acumuladores, capacitores, indutâncias ou combinações destes dois (acumuladores RC, RLC, ou LC). No circuito não controlado de descarga, a fenda de trabalho executa a função chave, isto é, quando a tensão no circuito ultrapassa a tensão de ruptura do dielétrico, tem-se a formação de uma faísca. A energia acumulada no gerador é consumida durante a descarga da faísca. É fácil de entender que tanto os fenômenos elétricos como os fenômenos de remoção geométrica do material na fenda de trabalho dificilmente são controlados no decorrer do processo, no qual a frequência de sequência das faíscas e o trabalho da faísca são influenciados. Através de elementos de controle no circuito de descarga pode-se almejar uma melhora do controle do processo. Hoje em dia, basicamente, só encontramos geradores de relaxação em máquinas para acabamentos muito finos com potência reduzida e pequena relação de contato ou superfície de trabalho pequena, como também em instalações para eletroerosão a fio /5/.

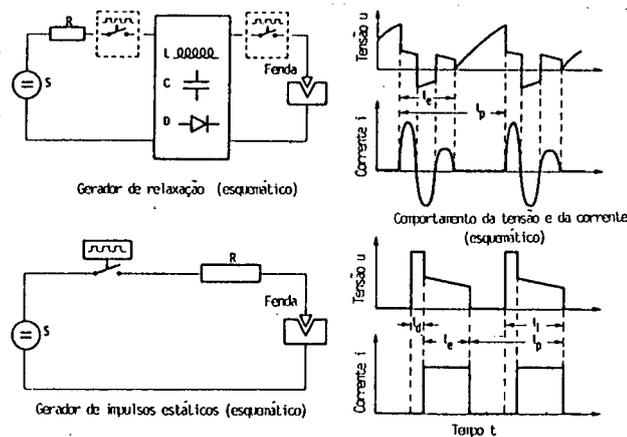


FIG. 2.5 - Circuitos básicos para geradores de faíscas /5/.

Back (1950), com a invenção do transistor de potência, possibilitou a substituição do gerador de relaxação por circuitos de descargas pulsadas. A concepção do circuito, bem como o comportamento da tensão e corrente, estão representados na figura 2.5 (parte inferior). Com geradores de impulso é possível otimizar as mais diversas exigências de trabalho, devido à possibilidade de regular uma grande quantidade dos parâmetros em uma larga faixa de operação. Por exemplo, a duração do impulso (t_i) pode ser regulada na faixa de 1 a 2000 microsegundos, a relação de contato (ζ) pode ser regulada entre 0,1 e 0,9. Os parâmetros elétricos, tensão de trabalho em aberto e corrente de descarga, em uma regra geral, podem ser regulados na faixa de $U_i = 60$ a 300V e $i_e = 1$ a 300A. A forma dos pulsos destes geradores é aproximadamente retangular. Porém, para frequências muito elevadas a limitação de corrente resistiva como o efeito capacitivo e indutivo dos condutores exercem um efeito negativo sobre os flancos dos impulsos. O efeito de polaridade que leva a uma remoção de material diferenciada no eletrodo-peça e eletrodo-ferramenta é integralmente aproveitado em geradores de impulso unipolares /5/.

Recentemente, o comando numérico foi incorporado às máquinas de eletroerosão por penetração, aumentando consideravelmente o campo de aplicação do processo.

O requisito básico para poder automatizar o processo de eletroerosão é poder contar com um desgaste mínimo de eletrodos e ter um perfeito controle do mesmo.

As máquinas de comando numérico permitem um deslocamento da mesa da máquina, impulsionada por motores de corrente contínua e fusos de esferas recirculantes, de uma precisão tal que, junto com o recurso da interpolação entre eixos X e Y, é perfeitamente possível

obter o movimento circular planetário (figura 2.6) /6/.

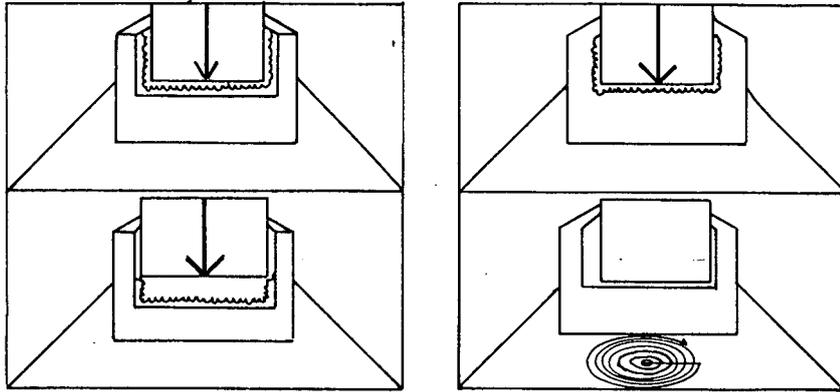


FIG. 2.6 - Erosão convencional e planetária /6/.

O movimento planetário realizado entre o eletrodo e a peça aumenta a precisão, a remoção e a limpeza na fenda de trabalho. Além disso, o número de eletrodos necessários para completar a usinagem da peça é menor.

A utilização do movimento circular planetário, para compensar a diferença de medida entre desbaste e acabamento, traz consigo a vantagem do eletrodo de acabamento não mais ter que erodir o material da peça frontalmente, o que leva a uma concentração do desgaste nas arestas do eletrodo e implica uma troca frequente de eletrodos (figura 2.7). Com a possibilidade da erosão lateral, com a introdução do movimento planetário, o desgaste é distribuído homogeneamente em toda a superfície lateral dos eletrodos, aumentando consideravelmente a sua vida útil.

Usando comando numérico é possível usinar peças simples, bem como peças complicadas com um eletrodo simples, apenas alterando os programas.

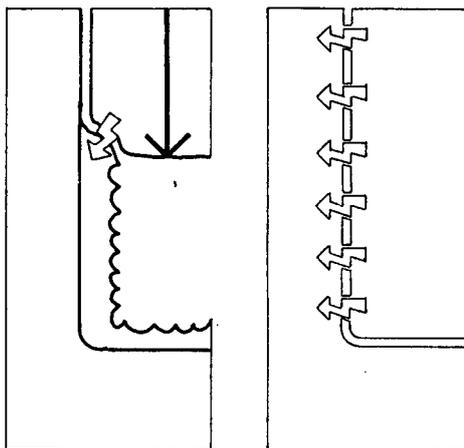


FIG. 2.7 - Desgaste da aresta do eletrodo na usinagem convencional e planetária /6/.

Neste sistema de usinagem a peça é sujeita ao movimento planetário em qualquer direção por alguns décimos de milímetro. A figura 2.8 apresenta exemplos dos vários tipos de movimentos planetários.

Movimentos	Planetários
A	
B	
C	
D	
E Expansão	
F Usinagem	

FIG. 2.8 - Exemplos dos vários tipos de movimentos planetários /8/.

Podendo-se fazer uma interpolação em X e Y, poder-se-á também interpolar com o eixo Z, de maneira que não só no plano será descrita uma circunferência mas, também, será gerado um corte no espaço em sua forma mais generalizada (figura 2.9).

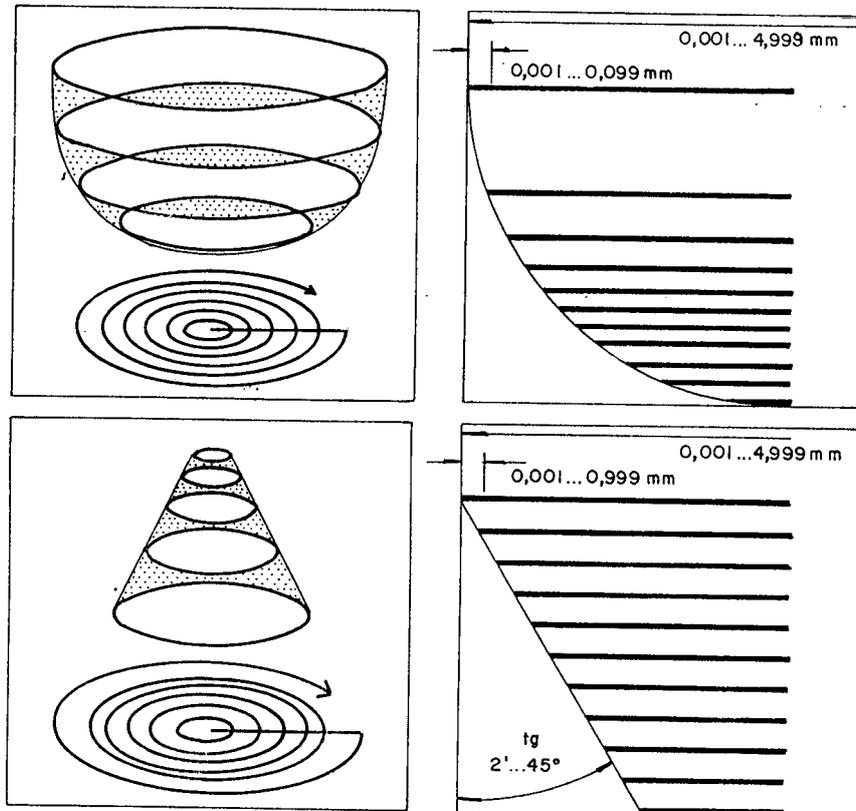
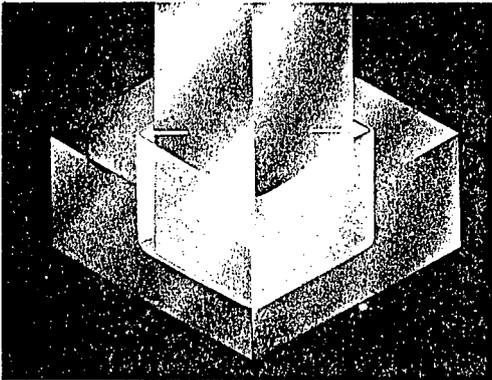


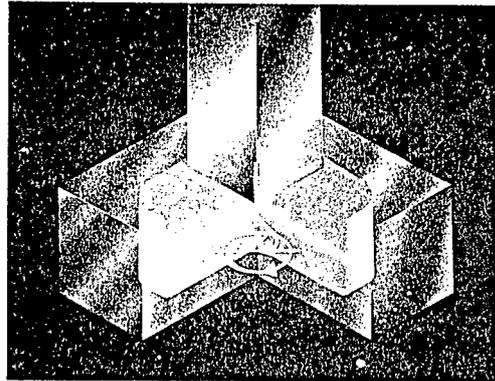
FIG. 2.9 - Flexibilidade da usinagem planetária CNC /6/.

Estes recursos permitem eletroerodir, por exemplo, formas negativas que são mais largas na parte inferior e mais estreitas na parte superior, conseguindo uma ampla variedade de ciclos de usinagem (figura 2.10 a e b).

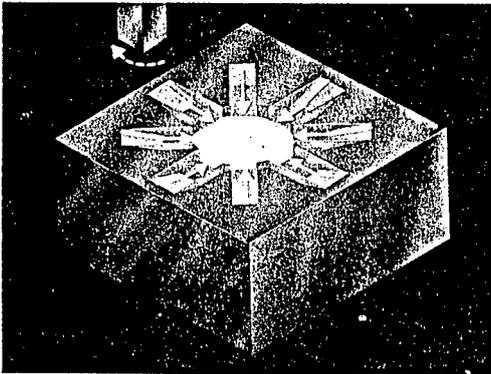
Na máquina de eletroerosão com comando numérico, a utilização de um trocador de eletrodos permite o trabalho 24 horas/dia sem supervisão humana.



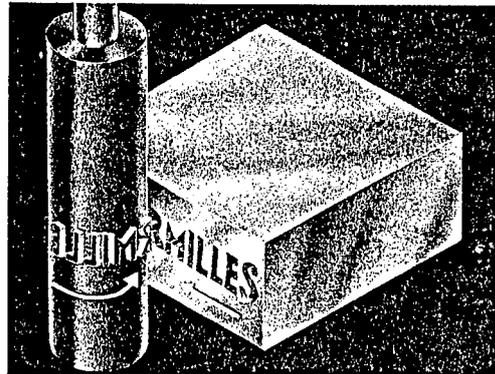
USINAGEM DE CAVIDADES - Movimento nos eixos X, Y ou Z é utilizado para obtenção de superfícies de desbaste.



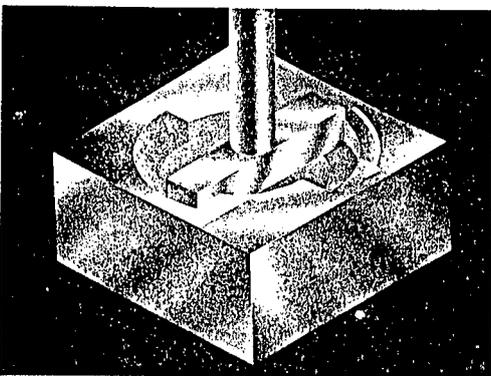
USINAGEM ORBITAL - Usinagem da cavidade seguida por movimentos orbitais em três dimensões permite usinagem de desbaste até acabamento. Usinagem nos eixos X, Y ou Z.



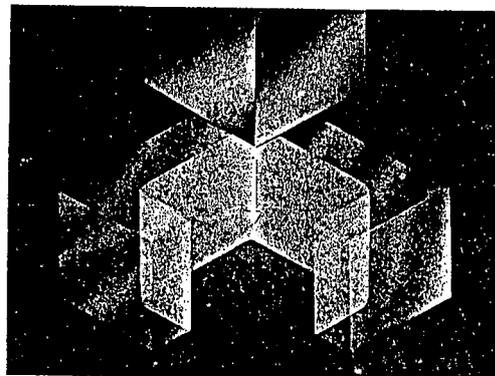
USINAGEM VETORIAL - Permite usinar cavidades ou formas em qualquer direção.



USINAGEM VETORIAL - Para usinagem servo-controlada ao longo dos eixos de rotação do eletrodo.

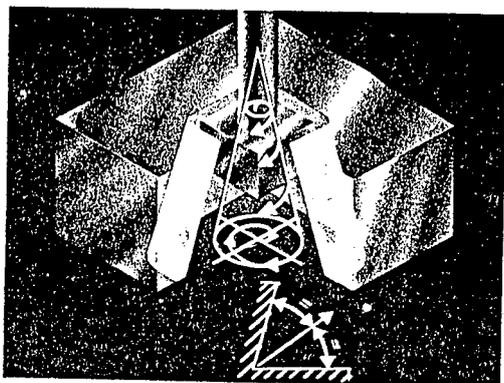


USINAGEM VETORIAL - Combinado com a rotação do eletrodo pode usinar formas intrincadas com eletrodo de forma simples.

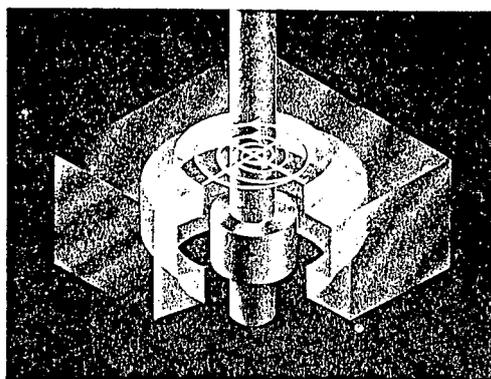


USINAGEM DIRECIONAL - Para obter cantos vivos. A translação é calculada automaticamente pelo CNC de acordo com a posição e valores dos ângulos para usinagem. Usinando nos eixos X, Y e Z.

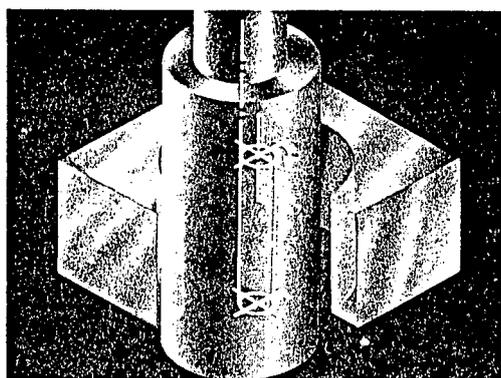
FIG. 2.10 a - Ciclos de usinagem CNC /7/.



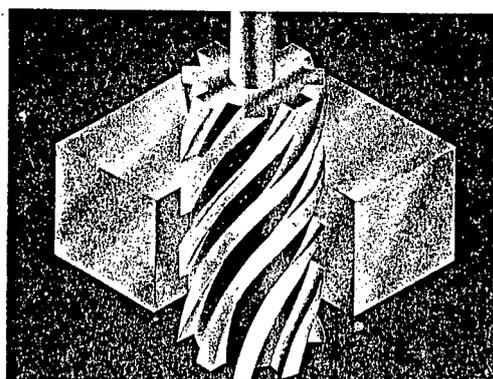
USINAGEM CÔNICA - Em formas negativas e positivas para ferramentas de moldes de injeção, por exemplo: ângulos de 0° a $\pm 90^\circ$. Usinagem em X, Y ou Z.



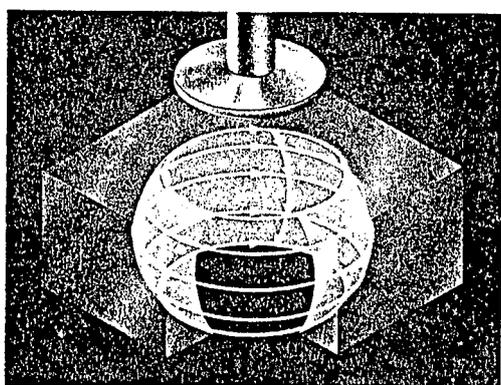
USINAGEM PLANETÁRIA HORIZONTAL - Para ranhuras, ressaltos, etc. Usinagem nos eixos X, Y ou Z.



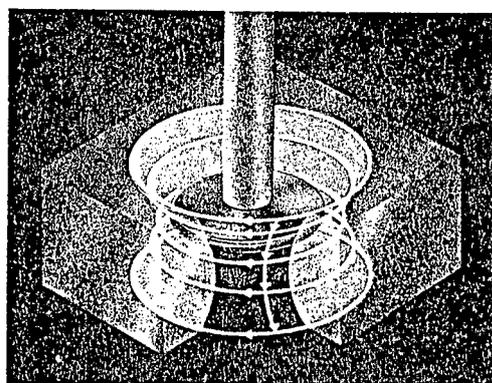
USINAGEM CILÍNDRICA - Permite movimento de translação não servo-controlado: desbaste em condições de lavação precária.



USINAGEM HELICOIDAL - Para roscas e formas helicoidais.



USINAGEM DE CONCAVIDADES ESFÉRICAS - Forma esférica produzida por eletrodo de forma globular ou cilíndrica fina. Eixos X, Y ou Z.



USINAGEM DE SUPERFÍCIES ESFÉRICAS CONVEXAS - Forma esférica produzida por um eletrodo de forma globular e catotas esféricas por eletrodos finos. Eixos X, Y ou Z.

FIG. 2.10 b - Ciclos de usinagem CNC /7/.

A figura 2.11 apresenta o processo automático de medição da profundidade de usinagem durante a erosão e correção automática dos erros causados por mudança no comprimento do eletrodo. Para completar o primeiro estágio de usinagem, um eletrodo é substituído por uma unidade de medição, a profundidade em relação à superfície do material é medida, o eletrodo original é substituído na mesma posição, as discrepâncias de erros são corrigidas, e a usinagem recomeça /8/.

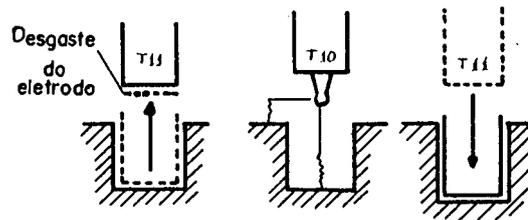


FIG. 2.11 - Compensação automática do processo de usinagem /8/.

2.3. Experiências sobre o efeito da área do eletrodo sobre a performance da eletroerosão.

M.L.Jeswani (1979) escreveu que na usinagem por descarga elétrica existe uma área de usinagem ótima em que a remoção de material é máxima e o desgaste relativo é mínimo. Existe uma taxa ótima de densidade de corrente aparente para um material particular da peça, do eletrodo e do fluido dielétrico. Aumentar e diminuir a área de usinagem com corrente constante resulta na redução de material removido. Usinar a aproximadamente 50% da corrente máxima resulta no máximo de produtividade e mínimo desgaste.

Estes experimentos foram realizados na máquina de eletroerosão com gerador de relaxação. O material utilizado como eletrodo foi o cobre e a peça, de aço de alto carbono (0,8% C). Querosene comer-

cial foi usado como fluido dielétrico.

Foram usados eletrodos de cobre cilíndrico com diâmetro variando entre 2 e 7 mm. Em cada usinagem a quantidade de material removido (mm^3/min) foi medida e o desgaste relativo foi computado, figura 2.12.

A tendência observada pode ser explicada com base na densidade de corrente aparente. Mantendo a corrente constante, a densidade de corrente varia com a área de usinagem. Inicialmente, com pequena área de usinagem, a densidade de corrente aparente é muito grande, gerando a desintegração do fluido dielétrico, formando uma nuvem de gases ao longo da zona de erosão. Na ausência de fluido dielétrico o processo começa a desestabilizar, resultando frequentes curtos-circuitos. Deste modo a energia se perde e a taxa de remoção diminui. Com o aumento da área de usinagem, a densidade de corrente cai, a usinagem torna-se mais estável e a taxa de remoção aumenta.

Esta tendência continua até que a densidade de corrente aparente diminui para valores onde a descarga é capaz de evaporar o material da peça rapidamente, e a taxa de remoção cai.

O efeito da densidade de corrente aparente sobre a taxa de remoção e desgaste relativo são apresentados na figura 2.13. As figuras 2.12 e 2.13 mostram que, para gerador de pulso, existe uma área de usinagem ótima para que a taxa de remoção seja máxima e o desgaste relativo seja mínimo.

Entretanto, na usinagem atual de cavidades com seção variável é difícil manter a densidade de corrente aparente no valor ótimo para a área de usinagem ponto a ponto. Isto é aconselhável para selecionar os parâmetros de operação com base na densidade de corrente média, área da seção variável média e para completar alta taxa de remoção. O melhor caminho será o projeto de um gerador de impulsos ca-

paz de variar o percentual de corrente em relação à variação de área, mantendo ótima a densidade de corrente para a máxima taxa de remoção /9/.

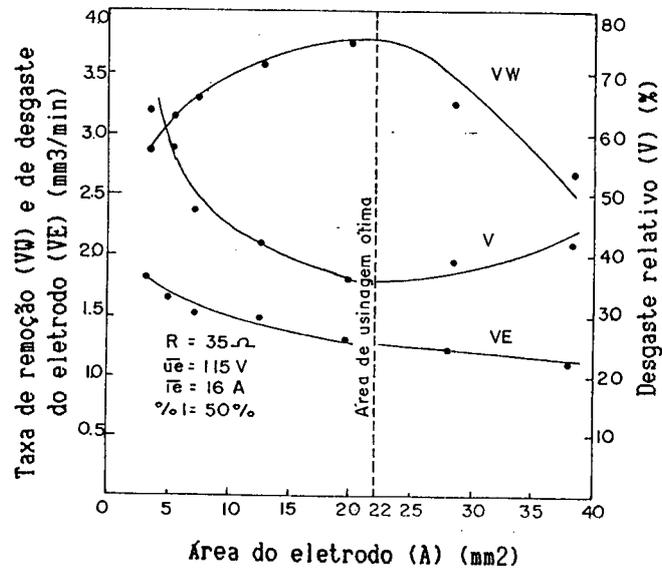


FIG. 2.12 - Gráfico de taxa de remoção (VW), desgaste do eletrodo (VE) e desgaste relativo (V) em função da área do eletrodo /9/.

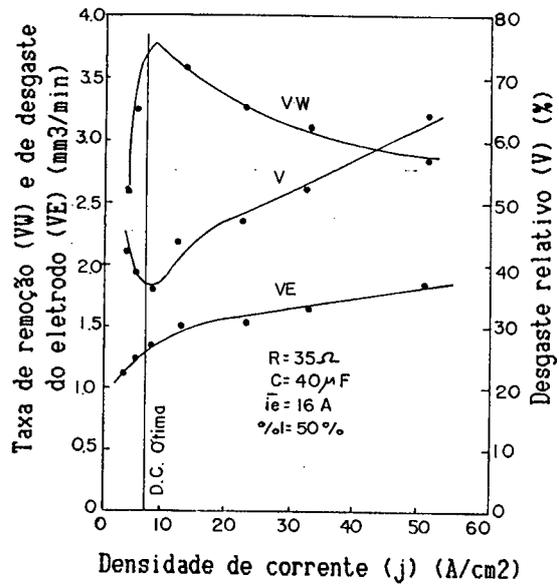


FIG. 2.13 - Efeitos da densidade de corrente sobre a taxa de remoção (VW), desgaste do eletrodo (VE) e desgaste relativo (V) /9/.

CAPÍTULO 3

OBJETIVOS DO TRABALHO

A revisão bibliográfica mostra que em máquinas de eletroerosão por relaxação obtém-se uma relação ótima entre densidade de corrente aparente e a taxa de remoção, bem como desgaste relativo, figura 2.12. Para poder introduzir este conceito para máquinas de eletroerosão por faísca com geradores estáticos, e permitir a automatização do processo e trabalhar em condições otimizadas, propõe-se efetuar um estudo com o objetivo de determinar a condição onde se tenha a maior taxa de remoção (VW) e o menor desgaste relativo (V), verificando o comportamento do acabamento superficial, quando tem-se uma variação na área do eletrodo.

Sabendo-se que a maior influência sobre o processo é exercida pela energia de descarga ($W_e = u_e \cdot i_e \cdot t_e$) e que a mesma pode ser alterada pela variação da corrente (i_e) ou pela duração da descarga (t_e) /5/, fez-se necessário analisar os seguintes aspectos do processo:

- Efeito da área de usinagem do eletrodo sobre a qualidade superficial.
- Efeito da área de usinagem do eletrodo sobre a taxa de remoção.
- Efeito da área de usinagem do eletrodo sobre o desgaste do eletrodo.
- Efeito da área de usinagem do eletrodo sobre o desgaste relativo.

CAPÍTULO 4

PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

4.1. Generalidades

Com a finalidade de verificar o comportamento dos parâmetros de usinagem para uma variação de área do eletrodo, foi realizada uma série de experimentos utilizando a máquina de eletroerosão por penetração da I.B.H., empregando-se eletrodos de cobre eletrolítico de dimensões variadas, e peças de aço VC 131 temperado imerso em dielétrico Castrol Honilo 401. O eletrodo era o ânodo e a peça, o cátodo, no circuito com gerador de impulsos estáticos.

Para permitir um estudo da influência da área do eletrodo sobre o resultado de trabalho, prepararam-se eletrodos de cobre eletrolítico com diâmetros variáveis, de acordo com a série R10.

Para permitir uma leitura correta dos instrumentos indicativos da máquina de eletroerosão fez-se uma calibração do equipamento, empregando-se uma resistência do tipo SHUNT para 50A/60mV, um Osciloscópio com Memória Digital Philips, um "Plotter" Philips e o Multímetro Analógico Elavi 5n.

Para possibilitar a determinação do desgaste relativo, bem como da taxa de remoção, fez-se necessária a pesagem de eletrodos e peças antes e após cada ensaio.

Com a finalidade de efetuar a medição da rugosidade frontal, nos ensaios prevê-se apenas uma pequena penetração na peça, ao passo que para a medição de rugosidade lateral planejam-se ensaios com

furos passantes.

4.2. Projeto e fabricação dos eletrodos

4.2.1. Eletrodo-ferramenta

O material utilizado para confecção dos eletrodos-ferramentas foi o cobre eletrolítico com 99% de cobre e 1% de impurezas. Este material apresenta as seguintes características:

Ponto de fusão = $1084,5^{\circ}\text{C}$

Peso específico = $8,93\text{ g/cm}^3$ (a 20°C)

Resistividade elétrica = $1,7 \times 10^{-6}\text{ Ohm-cm}$ (a 20°C)

Condutibilidade térmica = $0,91\text{ cal/cms}^{\circ}\text{C} /10/$.

Os eletrodos foram usinados conforme o desenho da figura 4.1.

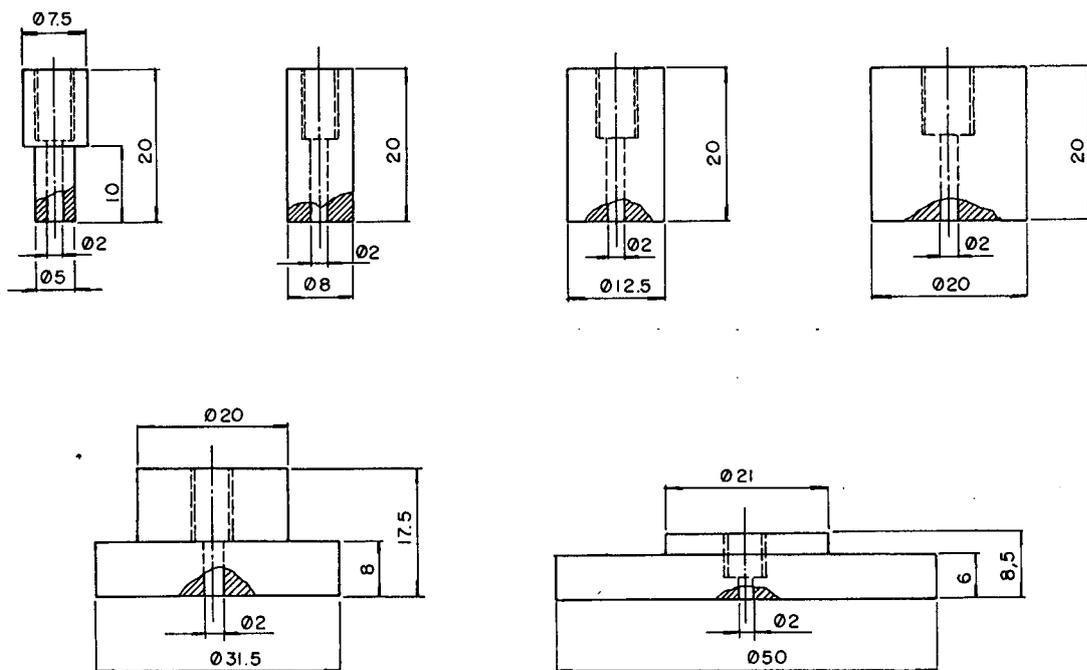


FIG. 4.1 - Eletrodos-ferramenta.

Para facilitar a montagem dos eletrodos na máquina de eletroerosão e sistematizar os ensaios projetou-se um eletrodo padrão. No entanto, a limitação de 160 g na balança analítica de precisão não permitiu seguir rigorosamente este planejamento para eletrodos maiores.

O eletrodo foi fixado em uma haste através de uma rosca (fig 4.2). A haste serviu para montar o eletrodo no cabeçote da máquina. Para possibilitar uma lavagem adequada na fenda de trabalho foi previsto um furo de 2 mm de diâmetro em todos os eletrodos. Trabalhou-se com lavagem por sucção.

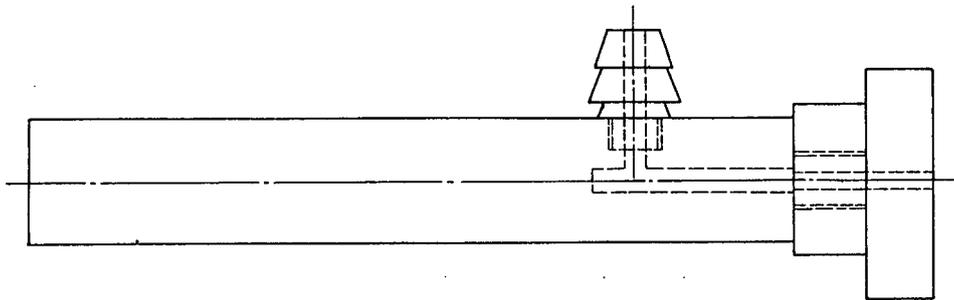


FIG. 4.2 - Conjunto eletrodo-ferramenta e haste de fixação.

Como se observa na figura 4.1, o diâmetro dos eletrodos varia conforme a série geométrica R10, resultando nas áreas mostradas na tabela 1 abaixo.

Diâmetro do eletrodo(mm)	5	8	12,5	20	31,5	50
Área (mm ²)	16,5	47,1	119,6	311,02	776,17	1960,35

TABELA 1 - Área dos eletrodos.

4.2.2. Eletrodo-peça

O material utilizado para eletrodo-peça foi o aço liga VC 131, cuja análise química está mostrada na tabela 2.

C=2,12%	Si=0,34%	Mn=0,310%	Cr=11,70%
W=0,67%	V=0,20%	P=0,020%	S=0,012%

TABELA 2 - Análise química do VC 131 /11/.

A escolha deste material deveu-se ao fato do mesmo ser bastante utilizado na fabricação de matrizes, usando o processo de eletroerosão.

O material de fabricação da Aços Villares S/A foi adquirido em barra quadrada de 57 x 57 mm. Deste material foram cortadas fatias, usinadas conforme desenho da figura 4.3, observando-se a massa final devido às limitações da balança analítica de precisão.

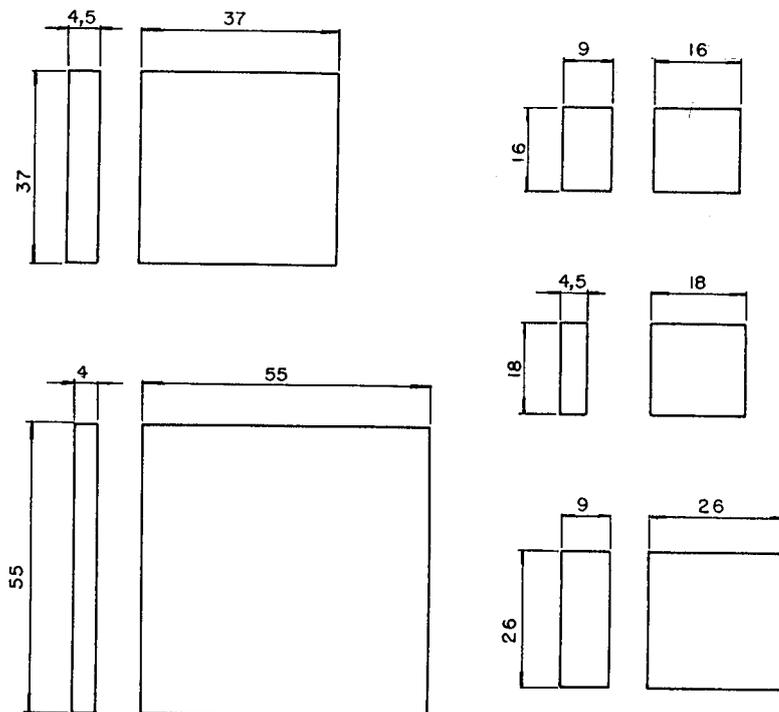


FIG. 4.3 - Eletrodos-peça.

Para que os ensaios fossem realizados em condições mais próximas às empregadas na indústria de ferramentas e matrizes, os corpos de prova (peças) foram temperados conforme recomendação do fabricante em um forno de MUFLA e resfriados ao ar soprado /12/. Após, foi realizado o revenido, obtendo-se dureza média de 58 HRC \pm 2HRC, medida no durômetro Suessen/Wolpert Testor H T 1a.

Com o objetivo de eliminar as deformações ocorridas após a tempera, as faces das peças foram retificadas.

4.3. Equipamentos utilizados nos trabalhos experimentais

Os equipamentos utilizados para realização dos trabalhos experimentais foram: Máquina de eletroerosão por faíscas de penetração, "Plotter" (Digital A3 Plotter model PM 8153./1.), Osciloscópio com memória (35 MHZ Four Channel Digital Storage Oscilloscope model PM 3305 (U)), Balança de precisão sartorius modelo A 6801, Rugosímetro, Durômetro e Multímetro analógico (ver anexo C).

4.4. Fluido dielétrico

O fluido utilizado foi o óleo HONIL0 401, fabricado pela Castrol.

O fluido foi movimentado por um conjunto moto-bomba trifásico com potência para 1,5 CV, para enchimento do tanque de usinagem e injeção para limpeza. O sistema de sucção é composto por um conjunto tipo sistema de "Venturi". Inclui ainda uma bandeja de pré-filtragem completa com placa de lã de vidro especial para reter partículas removidas (cavacos) antes que estas atinjam o tanque de decantação e o sistema de filtragem composto de um cartucho de filtragem, tipo de

papel, com capacidade de retenção até 3 micrometros. O modelo deste filtro é o Fram CH 56 P.

4.5. Sistema de limpeza

Para limpeza da fenda de trabalho adotou-se o sistema de lavagem por sucção através do eletrodo, juntamente com lavagem lateral (fig. 4.4).

A limpeza da fenda de trabalho tem grande influência na obtenção de um resultado positivo na usinagem. A pressão do dielétrico é muito importante no rendimento da máquina. Pressão excessiva irá limpar os resíduos (cavacos) da região erodida, antes que eles possam contribuir para a ionização do canal de descarga. Pressões reduzidas irão diminuir o rendimento do processo, ficando os cavacos retidos, facilitando a ocorrência de curto-circuitos. Esses curto-circuitos ocorrem mais durante o acabamento e particularmente quando a área do eletrodo é grande. Pressões mais altas são necessárias para manter o fluxo do fluido durante a operação de acabamento, porque a fenda de trabalho é muito pequena.

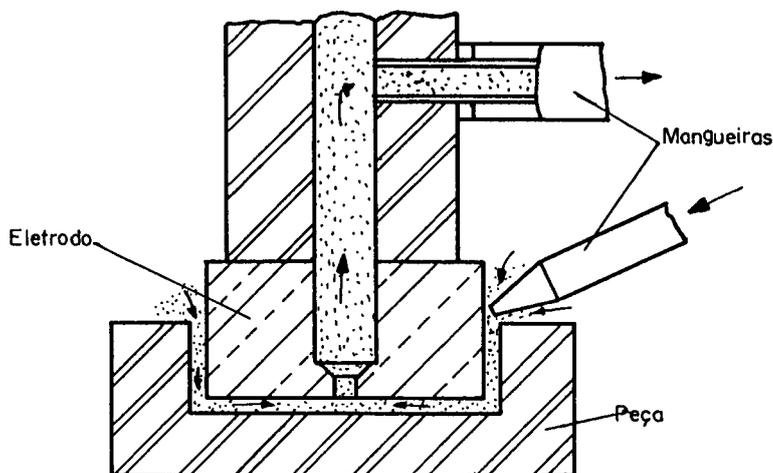


FIG. 4.4 - Sistema de limpeza da fenda de trabalho

4.6. Calibração

4.6.1. Calibração da corrente de usinagem

Com o objetivo de verificar a influência da variação da fenda de trabalho sobre os valores de corrente de trabalho, foram realizados ensaios variando as posições no servo-comando e no seletor de corrente da máquina de eletroerosão (ver tabela 1, anexo A).

Para cada posição de corrente e servo-comando, o amperímetro do painel da máquina indica o valor de corrente que circula entre o eletrodo e a peça. Sendo assim foi efetuada a calibração para cada valor de corrente, utilizando o Multímetro Analógico Elavi 5n, que foi instalado entre o eletrodo e a peça (fig. 4.5). Os valores de tensão também foram medidos (tabela 3).

Estes testes foram realizados com eletrodos de 8 e 31,5 mm de diâmetro.

Posição	1	2	3	4
Corrente de trabalho (A)	2,5	5,0	10,0	20,0
Tensão de trabalho (V)	37,0	36,5	21,0	17,0
Tensão em vazio (V)	78,0	80,0	81,0	84,0

TABELA 3 - Valores de corrente e de tensão para as posições no seletor de corrente.

Os valores de corrente para posições de servo inferiores a 5 não foram medidos porque o equipamento inverte o sentido de usinagem, não sendo importante para o presente trabalho.

As variações na corrente de usinagem obtidas utilizando eletrodos com áreas diferentes não são significativas.

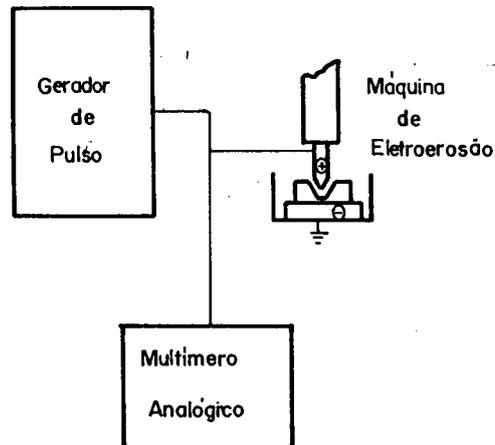


FIG. 4.5 - Esquema de montagem do Multímetro Analógico Elavi 5n.

Devido à dificuldade de estabilização do processo de usinagem, os resultados para diâmetro de 31,5 mm e corrente de 2,5 A não foram determinados. Isto se deve ao fato da limpeza da fenda de trabalho, através de injeção lateral, não ter sido adequada para estabilizar o processo.

4.6.2. Calibração do tempo de impulso e pausa

Para fazer esta calibração e determinar parâmetros seguros para realizar os ensaios foi necessária a utilização de um osciloscópio com memória modelo PM 3305(U) e um "plotter" modelo PM 8153./1. (fig. 4.6).

Como o equipamento de eletroerosão da I.B.H. apresenta em seu painel apenas a indicação das posições de 1 a 10, não se conhecendo os valores de tempo atribuídos a cada posição, esta calibração tornou-se imprescindível para realização deste estudo.

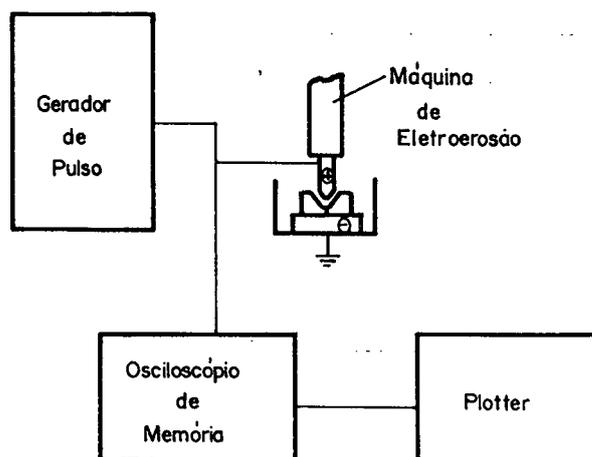


FIG. 4.6 - Esquema de montagem para calibração do tempo de impulso e pausa.

A medição foi realizada para alguns valores diferentes de área e corrente.

Esta medição foi realizada da seguinte forma: iniciada a erosão, os pulsos de tensão foram registrados no osciloscópio com memória. Após serem gravados na memória do osciloscópio, os pulsos foram ampliados e registrados através do "plotter" (fig. 4.7 e 4.8).

Verificou-se que a variação de área não influencia os valores dos tempos de impulso e pausa. A variação constatada pode ser considerada como erro na leitura do instrumento. Já a corrente de usinagem influencia nos tempos de usinagem. Estes dados foram catalogados para diversas posições de tempo de impulso e tempo de pausa, e para as diversas correntes que o equipamento fornece (ver tabela 2, anexo A).

No equipamento, o tempo de impulso corresponde à posição A e o tempo de pausa, à posição B.

Com os valores obtidos nestes ensaios, foi calculada a relação de contato (ζ), através das fórmulas (2) e (4).

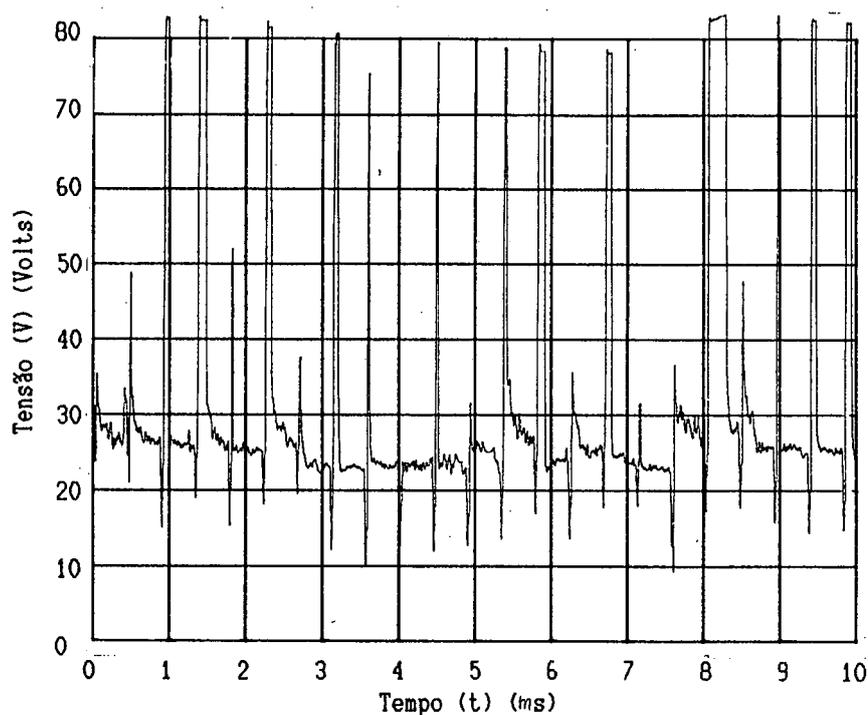


FIG. 4.7 - Impulsos registrados no "plotter".

Os valores de relação de contato obtidos para cada valor de corrente foram tabelados (ver tabela 3 a 11, anexo A). Com base nestes valores e nas indicações da literatura, onde diz que "uma relação de contato pequena, isto é, tempo de pausa grande, significa um mau aproveitamento da energia disponível na unidade de tempo e com isto uma redução na taxa de remoção. Portanto, a duração do intervalo deve ser escolhida de tal forma que se tenha a garantia de uma desionização suficiente do canal de descarga e se garanta a estabilidade do processo. Para uma relação de contato grande, isto é, um tempo de pausa pequeno, a condutividade aumenta devido ao aumento das impurezas na fenda de trabalho. Isto pode ser igualado a uma diminuição de desionização" /5/.

Para determinar a relação de contato onde se teria a maior taxa de remoção, foram realizados alguns ensaios. Nas tabelas 4 a 7 do anexo A estes valores estão assinalados. Com base nestes valo-

res foram realizados os ensaios restantes.

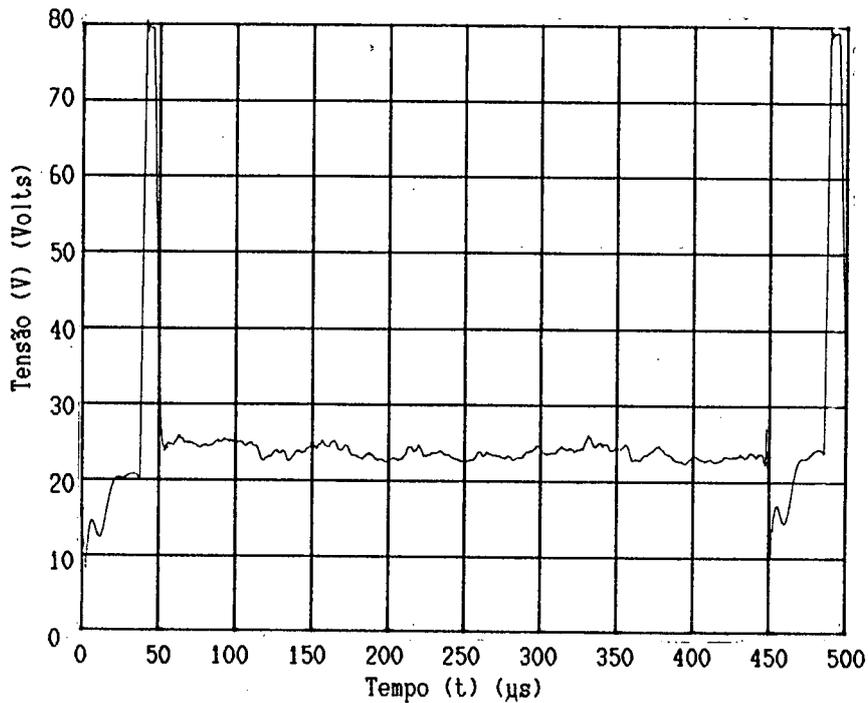


FIG. 4.8 - Ampliação do impulso para medição do tempo de impulso (t_i) e do tempo de pausa (t_o).

4.7. Determinação da profundidade de usinagem

O ensaio de usinagem por eletroerosão deve ser feito durante um tempo tão curto quanto possível, desde que se obtenham resultados confiáveis na determinação das características de desgaste, taxa de remoção e rugosidade.

Com o objetivo de determinar a profundidade de usinagem mais apropriada para realização dos ensaios, foram realizados alguns ensaios preliminares, variando a profundidade de usinagem. Primeiramente estabeleceu-se a profundidade de 2 mm, mas para corrente de usinagem pequena (2,5 A) os tempos cresciam muito. Optou-se, então, pela utilização da profundidade de 1 mm, onde os tempos de usinagem

não eram muito grandes e os valores obtidos para taxa de remoção eram iguais aos obtidos na usinagem com profundidade de 2 mm.

O desgaste do eletrodo, por ser muito pequeno, foi um fator importante a ser considerado na análise da profundidade de usinagem. Constatou-se que, para a profundidade de 1 mm, os eletrodos já apresentavam diferenças de massa passíveis de medição na balança de precisão, tornando possível a obtenção do desgaste relativo para os diversos eletrodos.

4.8. Metodologia de ensaio

Com o intuito de determinar a influência da variação de área do eletrodo sobre os parâmetros de usinagem por eletroerosão, foram realizados vários ensaios tomando como base a seguinte metodologia:

Inicialmente, os eletrodos eram pesados em uma balança de precisão e posicionados com auxílio de um relógio comparador.

A cada ensaio, valores de corrente, posição do servo, tempo de impulso e pausa (relação de contato) eram selecionados no comando da máquina.

O tangenciamento do eletrodo era feito e a profundidade de usinagem selecionada. Com o eletrodo imerso no fluido dielétrico, regulavam-se os valores de sucção e pressão do jato de limpeza.

Iniciada a usinagem, o cronômetro era acionado. Após atingir a profundidade pré-determinada, o equipamento desligava a corrente de usinagem retornando ao estágio inicial. Simultaneamente ao desligamento da corrente o operador travava o cronômetro, registrando os tempos em tabela apropriada (ver tabelas 12 a 15, anexo A).

Após a usinagem, nova pesagem dos eletrodos fazia-se necessária.

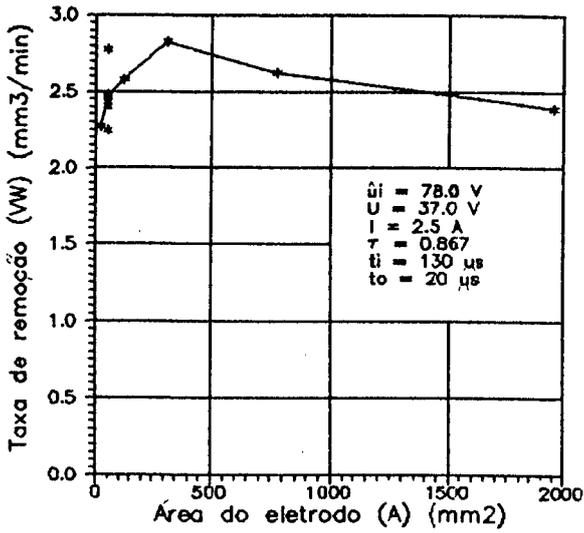
Para cada valor de corrente (até 20 ampères) e área do eletrodo foi realizado um ensaio, posicionando o servo para obter a corrente desejada e variando os tempos de impulso e pausa de forma a se obter a relação de contato onde se teria a maior taxa de remoção (ver tabelas 3 a 11, anexo A). Foram realizados seis ensaios em algumas combinações de áreas para cada corrente de usinagem com o objetivo de verificar a repetibilidade dos mesmos (tabelas 16 a 19, anexo A). Os gráficos 1 e 2 da figura 4.9 mostram que para corrente de 2,5 e 5,0 ampères, a taxa de remoção média ($\bar{V}\bar{W}$) é de $2,46 \pm 0,23 \text{ mm}^3/\text{min}$ e $11,15 \pm 0,20 \text{ mm}^3/\text{min}$ respectivamente para um diâmetro de eletrodo de 8,0 mm. Já para corrente de 10,0 ampères (gráf. 3 fig. 4.9), tem-se $\bar{V}\bar{W} = 24,61 \pm 2,64 \text{ mm}^3/\text{min}$ para um diâmetro de eletrodo de 12,5 mm. Para corrente de 20,0 ampères (gráf. 4 da fig. 4.9), tem-se $\bar{V}\bar{W} = 85,50 \pm 4,39 \text{ mm}^3/\text{min}$ para um diâmetro de eletrodo de 31,5 mm.

Os valores de taxa de remoção, desgaste do eletrodo e desgaste relativo foram determinados para valores diferentes de corrente e área do eletrodo através da expressão (7) e as fórmulas:

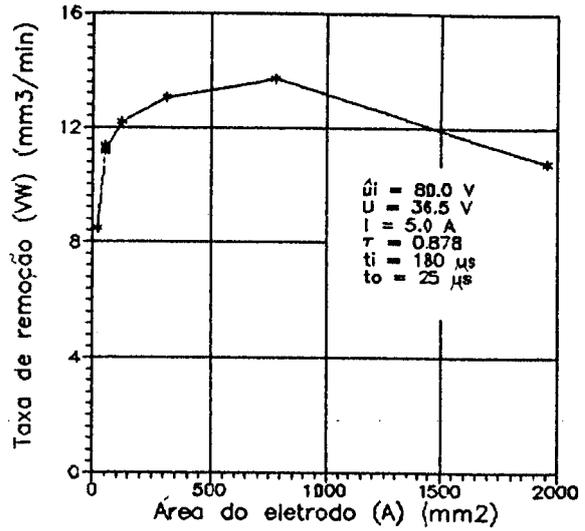
$$VW = ((P_p)_i - (P_p)_f) \cdot P_p \quad (8)$$

$$VE = ((P_e)_i - (P_e)_f) \cdot P_e \quad (9)$$

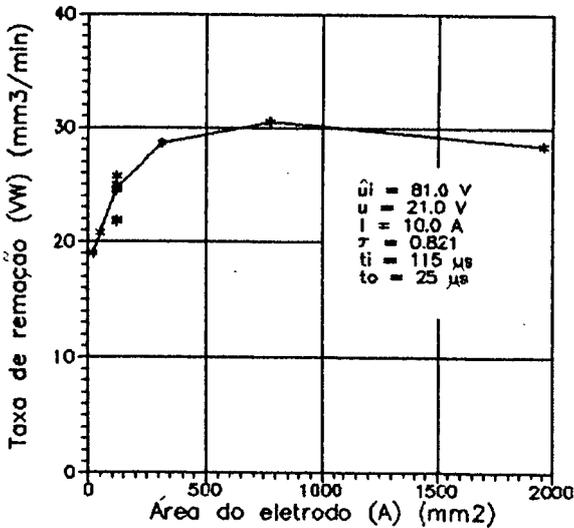
Por último, a rugosidade foi determinada no rugosímetro SURF-TEST III e registrados os valores de R_a e R_t (tabela 20 a 24, anexo A) e os gráficos correspondentes (anexo B).



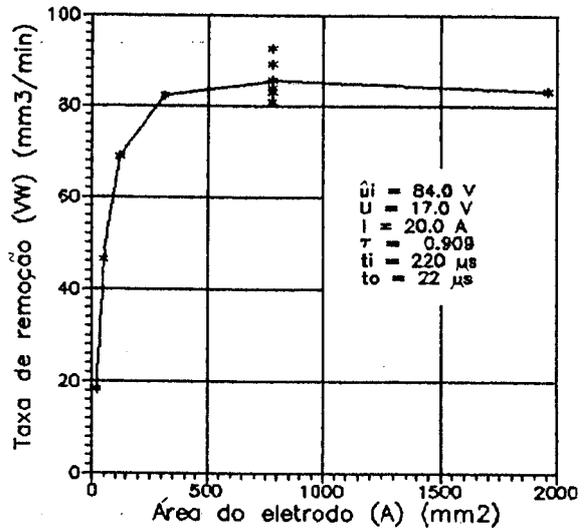
GRAF. 1 - Taxa de remoção (VW) x área do eletrodo.



GRAF. 2 - Taxa de remoção (VW) x área do eletrodo.



GRAF. 3 - Taxa de remoção (VW) x área do eletrodo.



GRAF. 4 - Taxa de remoção (VW) x área do eletrodo.

FIG. 4.9 - Estudo da repetibilidade dos ensaios.

CAPÍTULO 5

DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS

5.1. Preparação dos ensaios

5.1.1. Planilha de ensaio

Para realização dos ensaios foram preparadas planilhas de ensaio, sendo que os dados e resultados foram catalogados (veja tabelas 12 a 19, anexo A).

5.1.2. Codificação dos eletrodos-peça e ferramenta

Para facilitar o controle dos ensaios após a usinagem, os eletrodos-ferramentas foram codificados de acordo com o diâmetro, da seguinte forma:

Diâmetro do eletrodo (mm)	Código
5,0	1A - 1B - 1C - 1D - 1E - 1F - 1G
8,0	2A - 2B - 2C - 2D - 2E - 2F - 2G
12,5	3A - 3B - 3C - 3D
20,0	4A - 4B - 4C - 4D
31,5	5A - 5B - 5C - 5D
50,0	6A - 6B - 6C

Os eletrodos-peças receberam a numeração de 1 a 66.

5.2. Realização dos ensaios

5.2.1. Regulagem do servo-comando

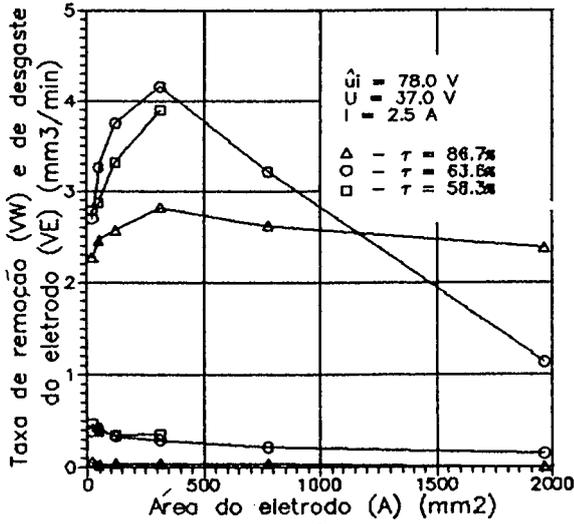
A cada troca no valor da corrente foi necessária a regulagem do servo-comando para que esta se aproximasse o máximo possível do valor eficaz. Para isso foram adotadas as seguintes posições no servo-comando:

Corrente(A)	Posição do servo-comando	Corrente eficaz(A)
2,5	7	2,8
5,0	7	5,2
10,0	8	9,6
20,0	9	20,4

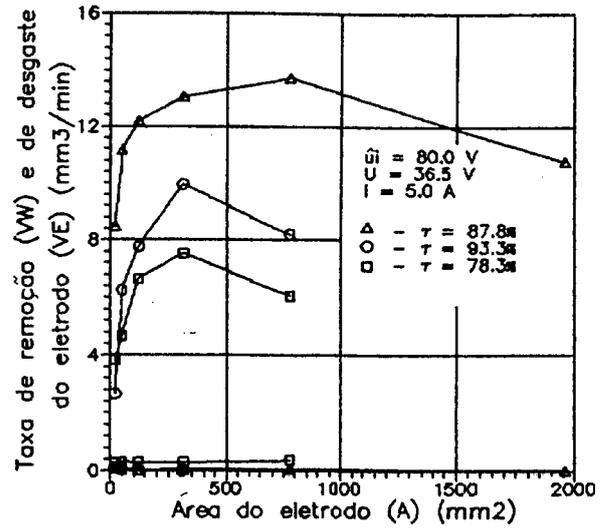
5.2.2. Regulagem do tempo de impulso e tempo de pausa

Para cada valor de corrente os tempos de impulso e pausa foram regulados para manter a relação de contato constante, em valores onde se tinha a maior taxa de remoção com o menor desgaste do eletrodo. Como está representado nos gráficos da figura 5.1, para cada corrente encontrou-se uma faixa de valores de relação de contato mais apropriada à usinagem. Valores maiores ou menores fazem com que a taxa de remoção diminua. Para cada corrente tomou-se um destes valores para utilizar nos ensaios, conforme mostrado abaixo:

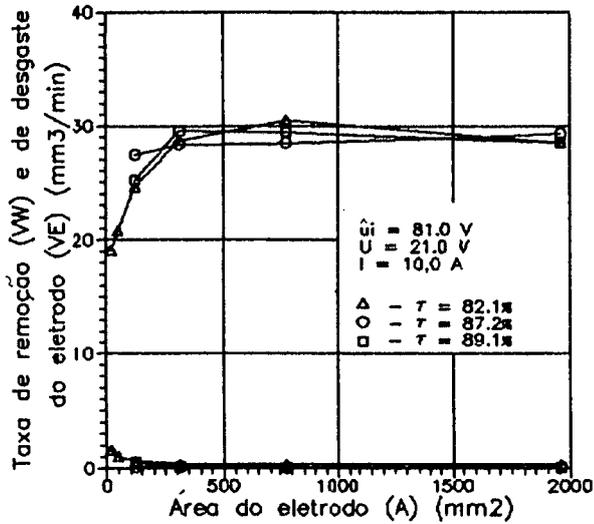
Corrente(A)	Tempo de pulso(μ s)	Tempo de pausa(μ s)	Relação de contato
2,5	130	20	0,867
5,0	180	25	0,878
10,0	115	25	0,821
20,0	220	22	0,909



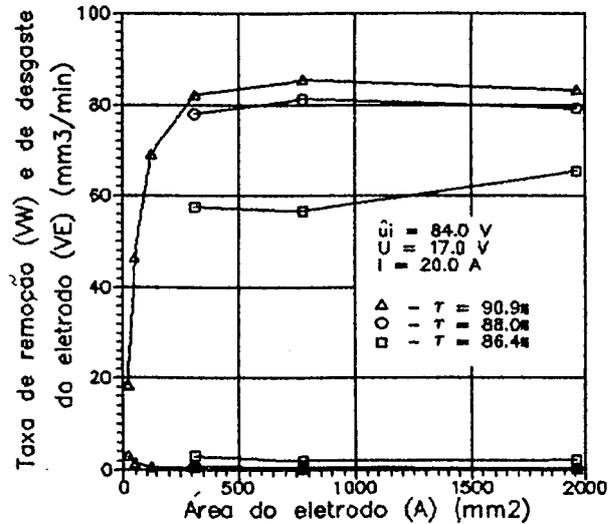
GRAF. 1 - Taxa de remoção (VW) e de desgaste do eletrodo (VE) versus área do eletrodo.



GRAF. 2 - Taxa de remoção (VW) e de desgaste do eletrodo (VE) versus área do eletrodo.



GRAF. 3 - Taxa de remoção (VW) e de desgaste do eletrodo (VE) versus área do eletrodo.



GRAF. 4 - Taxa de remoção (VW) e de desgaste do eletrodo (VE) versus área do eletrodo.

FIG. 5.1 - Influência da área do eletrodo sobre a taxa de remoção (VW) e desgaste relativo (VE).

5.2.3. Sistema de limpeza da fenda de trabalho

Os ensaios foram inicialmente realizados com a utilização de lavagem lateral (fig. 5.2). Para áreas pequenas de eletrodos, até 119 mm^2 , os ensaios foram realizados sem problemas. Mas com o aumento da área de usinagem, a limpeza com jato lateral tornou-se insuficiente para retirar os resíduos da erosão da região de trabalho,

gerando desestabilização do processo e formação de carvão. Obteve-se uma melhora considerável pela utilização de sucção através do eletrodo, juntamente com a lavagem lateral (fig. 5.3). Com este tipo de lavagem, foi possível usinar, com correntes de 2,5 ampères, áreas de 1960 mm^2 .

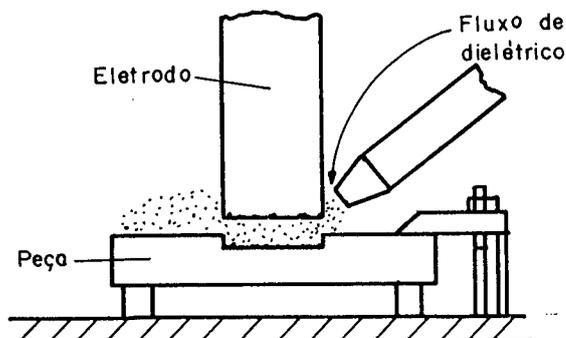


FIG. 5.2 - Sistema de limpeza por lavagem lateral.

Durante a usinagem, o tubo de injeção tinha sua extremidade posicionada na direção da zona de usinagem, utilizando uma pressão de $0,6 \text{ kg/cm}^2$. A sucção através do eletrodo era de $0,6 \text{ kg/cm}^2$, ensejando uma retirada eficiente das partículas da região de trabalho e melhorando as condições de usinagem.

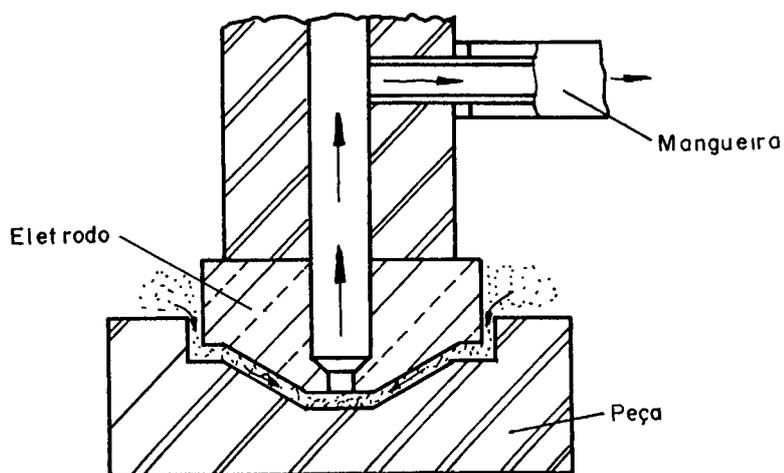


FIG. 5.3 - Sistema de limpeza por sucção através do eletrodo.

5.2.4. Ensaio propriamente dito

Após a pesagem dos eletrodos (peça e ferramenta) e montagem na máquina de eletroerosão, os códigos do eletrodo e da peça e os parâmetros de usinagem usados eram anotados na planilha de ensaio.

Ajustados os valores de corrente, servo-comando e pressão do dielétrico, e tangenciado o eletrodo na peça, regulava-se no marcador digital a profundidade de 1 mm.

Os eletrodos (peça e ferramenta) eram submersos no fluido dielétrico através do enchimento da cuba da máquina.

O comando para ligar a corrente de usinagem era acionado, e simultaneamente o cronômetro era disparado. Aguardava-se a usinagem da profundidade pré-estabelecida, onde o equipamento desligava automaticamente a corrente de usinagem e o tempo de ensaio era registrado.

Após a usinagem os eletrodos eram devidamente limpos e levados à pesagem na balança de precisão.

5.3. Verificação da rugosidade frontal

A rugosidade depende diretamente da energia de descarga. Na usinagem por eletroerosão por faísca, os valores de rugosidade (R_a) podem variar entre 0,4 e 18 μm /5/.

Para verificar se a rugosidade frontal depende da área de usinagem, foram realizadas várias medições utilizando o rugosímetro SURFTEST III.

Para as diversas áreas de eletrodo, foram realizados novos ensaios com profundidade de 0,1 mm. Esta redução na profundidade deveu-se ao fato que o apalpador do rugosímetro, para áreas inferiores a 120 mm², não tinha acesso à profundidade usinada.

Para medição da rugosidade lateral, foram usinadas algumas cavidades passantes com o diâmetro de 20 mm utilizando as correntes de 2,5 a 20,0 ampères. O "cut-off" utilizado foi de 0,25 e a rugosidade foi medida em três posições distintas.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1. Efeito da área de usinagem do eletrodo sobre a qualidade superficial.

Nos ensaios realizados, a variação na área do eletrodo para o intervalo de corrente testado de 2,5 a 20 ampères mostrou não ter grande influência sobre a qualidade superficial. Os gráficos da figura 6.1 e 6.2 mostram que a menor influência da área do eletrodo sobre a rugosidade pode ser observada para pequenas amperagens. Para 2,5 A pode-se inclusive detectar uma ligeira diminuição da rugosidade com o aumento da área do eletrodo. Para uma corrente de 5,0 A a rugosidade se mantém estável ao longo de toda a variação de áreas de eletrodos ensaiada. Com o aumento da corrente detectou-se uma dependência maior da rugosidade e a área ensaiada, tanto para 10,0 A como também para 20,0 A, pode-se observar um aumento da rugosidade na faixa da variação de área de eletrodo até aproximadamente 200 mm². A partir desta área a variação da rugosidade é muito pequena. Este comportamento pode ser correlacionado com deficiências de limpeza da fenda de trabalho, pois um dielétrico excessivamente contaminado leva a descargas falhas que por sua vez levam a uma rugosidade mais elevada.

Os dados contidos na tabela 4, a seguir, mostram a média desses resultados, juntamente com as respectivas dispersões para cada diâmetro de eletrodo e corrente de usinagem.

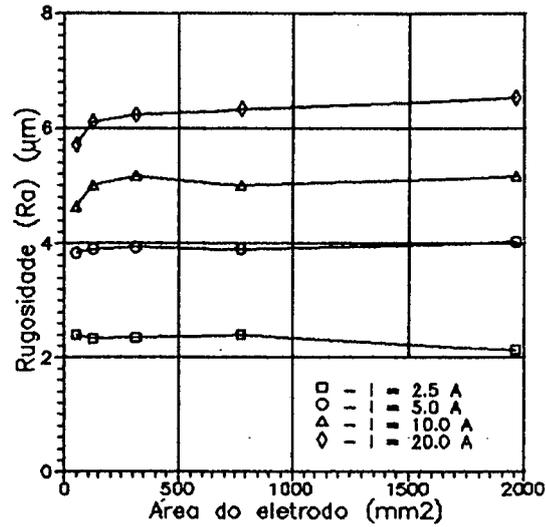


FIG. 6.1 - Influência da área do eletrodo sobre a rugosidade (R_a).

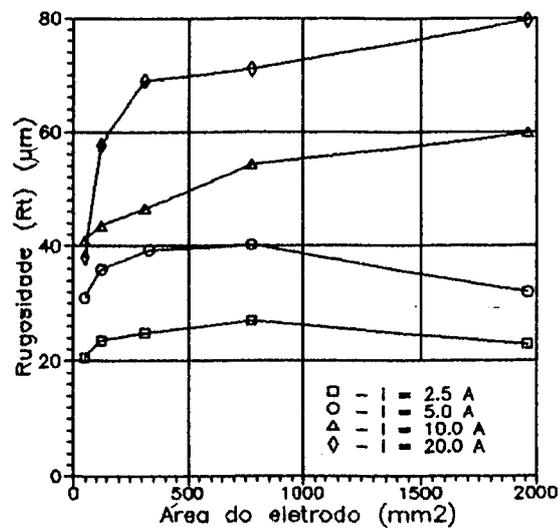


FIG. 6.2 - Influência da área do eletrodo sobre a rugosidade (R_t).

O mais importante parâmetro em eletroerosão para determinação da taxa de remoção e para estabelecer as condições de acabamento são a corrente de descarga (i_e) e a duração do impulso (t_e). Estes dois parâmetros, multiplicados pela virtual constante (u_e), tensão de descarga, dá a energia de descarga (W_e) que determina o tamanho da cratera /13/.

d (mm) \ I (A)	2,5	5,0	10,0	20,0
5,0	NÃO FOI POSSÍVEL MEDIR			
8,0	2,4	3,8	4,6	5,7
12,5	2,3	4,0	5,2	6,1
20,0	2,3	3,9	5,1	6,2
31,5	2,4	3,9	5,0	6,3
50,0	2,1	4,0	5,1	6,5
MÉDIA DESVIO PADRÃO	2,3±0,1	3,9±0,1	5,0±0,2	6,2±0,3

TABELA 4 - Valores de rugosidade R_a (μm) para corrente de 2,5 a 20,0 A e suas respectivas médias e desvios padrão

Na figura 6.3 pode-se ver também que a rugosidade da superfície frontal da peça aumenta em proporções maiores que a rugosidade lateral, para um aumento na corrente de usinagem. Isto pode ser justificado pelo fato da superfície lateral do eletrodo apresentar um movimento relativo em relação à parede lateral do furo. Consequentemente, apenas o maior diâmetro do eletrodo é reproduzido no furo. A superfície frontal do eletrodo não apresenta um movimento relativo em relação à superfície frontal do furo e, consequentemente, os defeitos da superfície frontal do eletrodo são inversamente reproduzidos na peça. Como os defeitos na superfície frontal da peça aumentam com o aumento da profundidade de penetração, a rugosidade frontal aumenta com o aumento da profundidade, até estabilizar para um valor que é função da energia de descarga. Um pequeno movimento planetário pode melhorar significativamente a rugosidade frontal da superfície erodida por faíscas /16/.

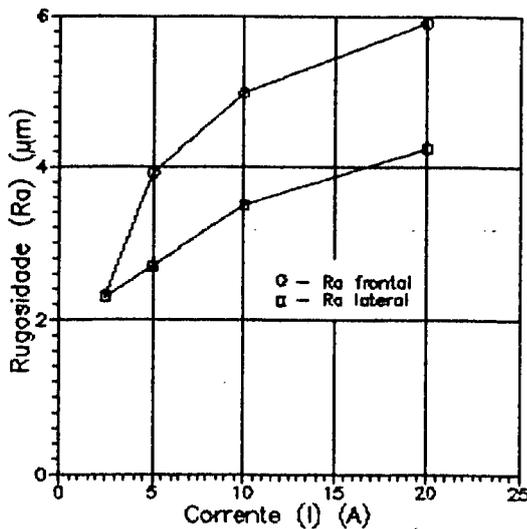


FIG. 6.3 - Influência da corrente de usinagem sobre a rugosidade (R_a).

6.2. Efeito da área de usinagem do eletrodo sobre a taxa de remoção

Verifica-se que a área do eletrodo influi na taxa de remoção.

O gráfico da figura 6.4 foi dividido em três regiões (A, B e C). Na região A observa-se um aumento da taxa de remoção com o aumento da área do eletrodo atingindo um ótimo na região B. A partir daí, verifica-se novamente uma diminuição da taxa de remoção (região C).

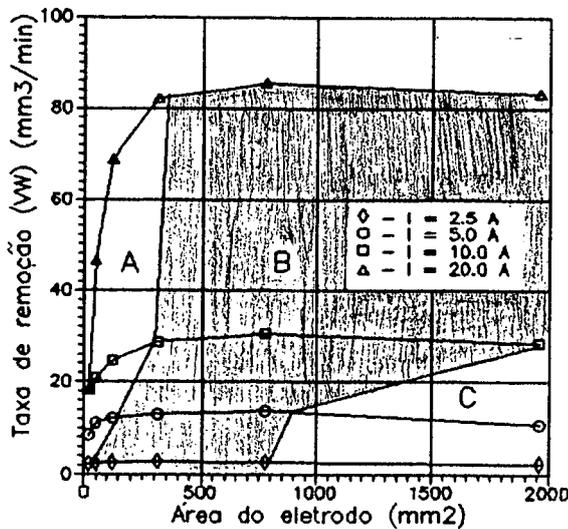


FIG. 6.4 - Taxa de remoção (VW) em função da área do eletrodo.

Estes resultados podem ser melhor visualizados no gráfico da figura 6.5. Neste gráfico, observa-se que para uma corrente de usinagem constante um aumento da área do eletrodo corresponde a uma diminuição inversa da densidade de corrente. Tem-se então, para uma área de eletrodo pequena, uma densidade de corrente muito grande, devido à qual o fluido dielétrico é desintegrado formando uma nuvem de gases em torno da zona erodida. Na falta do dielétrico o processo começa a desestabilizar, resultando em frequentes curtos-circuitos. Deste modo a energia é dissipada e a taxa de remoção é pequena.

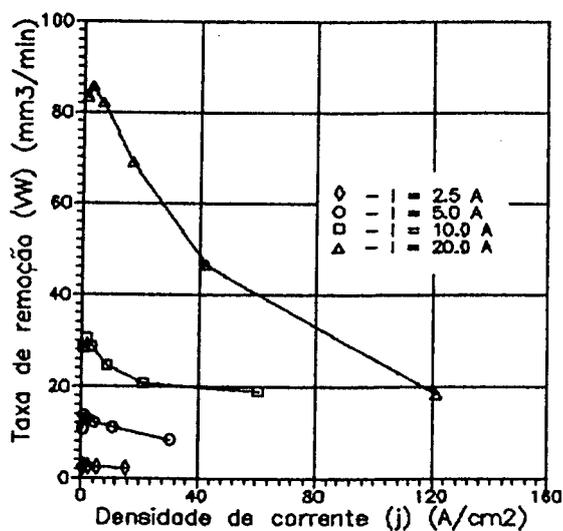


FIG. 6.5 - Taxa de remoção (VW) em função da densidade de corrente.

Aumentando a área do eletrodo, a densidade de corrente cai, a usinagem torna-se mais estável e a taxa de remoção aumenta. Isto tende a continuar até que a densidade de corrente caia a valores tão baixos que a descarga não é capaz de evaporar o material trabalhado rapidamente, e a taxa de remoção diminui [9].

Pode-se, ainda, determinar uma faixa de valores de área de eletrodo mais apropriada para usinar com cada valor de corrente.

Para corrente de 2,5 A ----- Faixa de área apropriada= de
50 a 800 mm²

Para corrente de 5,0 A ----- Faixa de área apropriada= de
150 a 900 mm²

Para corrente de 10,0 A ----- Faixa de área apropriada= de
300 a 2000 mm²

Para corrente de 20,0 A ----- Faixa de área apropriada= de
350 a 2000 mm²

6.3. Efeito da área de usinagem do eletrodo sobre o desgaste do eletrodo

O desgaste do eletrodo também é influenciado pela área do eletrodo. O gráfico da figura 6.6 mostra que para áreas menores o desgaste do eletrodo é maior. O desgaste diminui à medida que a área do eletrodo aumenta. Esta diminuição de desgaste do eletrodo é mais acentuada para áreas menores e quase não se altera para áreas maiores.

Isto pode ser justificado pela dificuldade de estabilização do processo de usinagem devido à grande densidade de energia que vaporiza o dielétrico e gera um número maior de curto-circuitos entre o eletrodo e a peça. Verifica-se, ainda, uma diminuição grande do desgaste para correntes de 10,0 e 20,0 ampères para um aumento da área até 400 mm². A partir daí um aumento da área não leva a uma diminuição acentuada do desgaste.

Para correntes de 2,5 e 5,0 ampères as áreas de eletrodos testadas não mostram uma variação significativa de desgaste. Para todas as áreas um aumento da corrente leva a um aumento do desgaste do eletrodo.

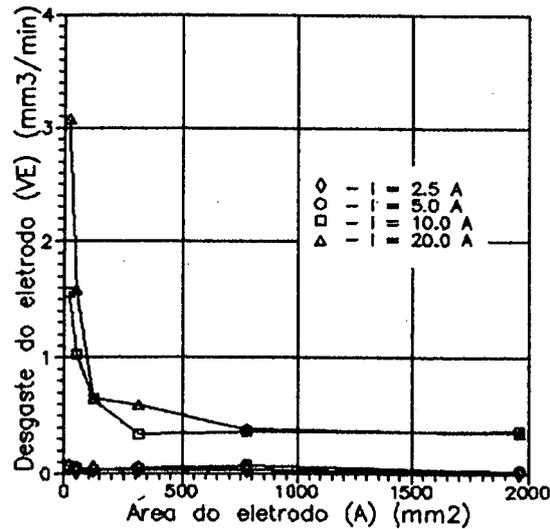


FIG. 6.6 - Desgaste do eletrodo (VE) em função da área do eletrodo.

6.4. Efeito da área de usinagem do eletrodo sobre o desgaste relativo

Os geradores de pulso, agora invariavelmente usados, promovem um fácil controle da energia de descarga. Dentro destas condições, o desgaste relativo pode ser menor que 1% /14/.

O gráfico da figura 6.7 mostra que o desgaste do eletrodo em relação à taxa de remoção, chamado de desgaste relativo, é maior para áreas de eletrodos menores e diminui com o aumento da área do eletrodo.

Para a corrente de 20 ampères usinando com área de eletrodo de 20 mm² o desgaste relativo pode chegar a 16%, inadmissível na usinagem por eletroerosão. Este fato pode ser explicado pela alta densidade de corrente (120 A/cm²), que provoca uma alta densidade de energia gerando taxas de remoção diminutas com um desgaste relativo elevado.

Desgastes relativos abaixo de 1% foram obtidos para as correntes analisadas para as áreas de eletrodo maiores que 120 mm², exceto para a corrente de 2,5 ampères, onde o desgaste relativo foi maior que 1%. A explicação para este fato é a pequena folga de trabalho entre o eletrodo e a peça que, como vimos anteriormente, dificulta a usinagem.

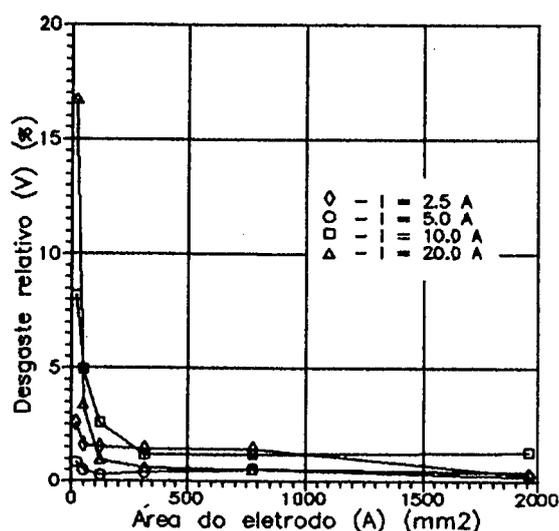


FIG. 6.7 - Desgaste relativo (V) em função da área do eletrodo.

O gráfico da figura 6.7 mostra ainda que o desgaste relativo tem um comportamento aleatório com relação ao aumento da corrente de usinagem. Para áreas maiores (acima de 300 mm²), constata-se que os valores de desgaste relativo são menores para as correntes de 5,0 e 20,0 ampères e maiores para 2,5 e 10,0 ampères. Sabendo-se que o desgaste relativo é obtido da relação entre desgaste do eletrodo e taxa de remoção (7), este comportamento pode ser explicado pela alta taxa de remoção obtida para corrente de 20,0 ampères e pequeno desgaste do eletrodo para corrente de 5,0 ampères, enquanto que para 10,0 ampères o desgaste do eletrodo é elevado e para 2,5 ampères a taxa de remoção é pequena (gráficos das fig. 6.4 e 6.6).

6.5. Otimização do processo de usinagem por eletroerosão

Para cada corrente de usinagem, tem-se uma região ótima para realização do processo de usinagem por eletroerosão por faíscas. Os gráficos das figuras 6.8 a 6.11 mostram que existem valores de áreas de eletrodos mais apropriados para se obter a maior taxa de remoção com o menor desgaste do eletrodo.

Do gráfico da figura 6.8 para corrente de usinagem igual a 2,5 ampères obtém-se a maior taxa de remoção variando entre 2,6 e 2,8 mm³/min para uma área de eletrodo entre 150 e 750 mm², com um desgaste do eletrodo de 0,039 a 0,04 mm³/min representando um desgaste relativo de 1,4 a 1,5%. Para reduzir os valores de desgaste relativo teria-se que trabalhar com áreas maiores, o que levaria a uma redução ainda maior da taxa de remoção, justificada apenas em operações de acabamento. O valores máximos de rugosidade R_a e R_t no intervalo são respectivamente de 2,4 μm e 27,0 μm .

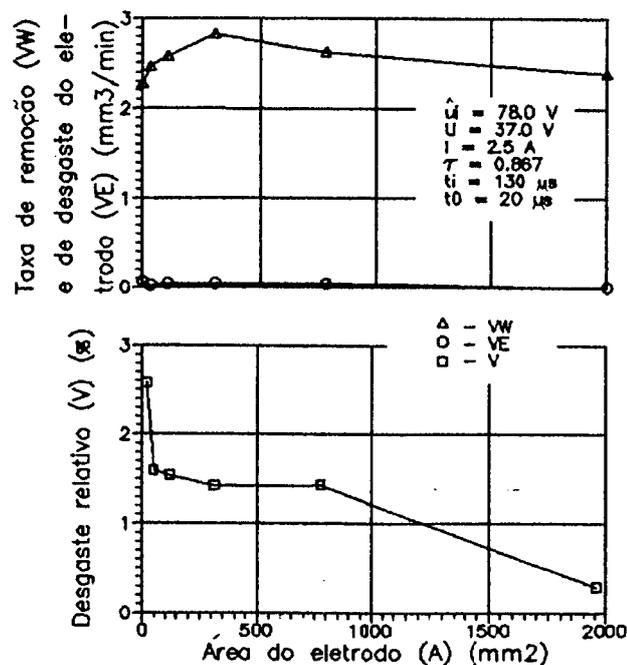


FIG. 6.8 - Taxa de remoção (VW), desgaste do eletrodo (VE) e Desgaste relativo (V) em função da área (A) para corrente de 2,5 ampères.

Do gráfico da figura 6.9 para corrente de usinagem igual a 5,0 ampères obtém-se a maior taxa de remoção variando entre 12,5 e 13,5 mm^3/min para uma área de eletrodo entre 200 e 900 mm^2 , com um desgaste do eletrodo de 0,033 a 0,074 mm^3/min representando um desgaste relativo de 0,3 a 0,5%, estando dentro dos valores admitidos atualmente. Os valores máximos de rugosidade R_a e R_t no intervalo são respectivamente de 3,9 μm e 40,2 μm .

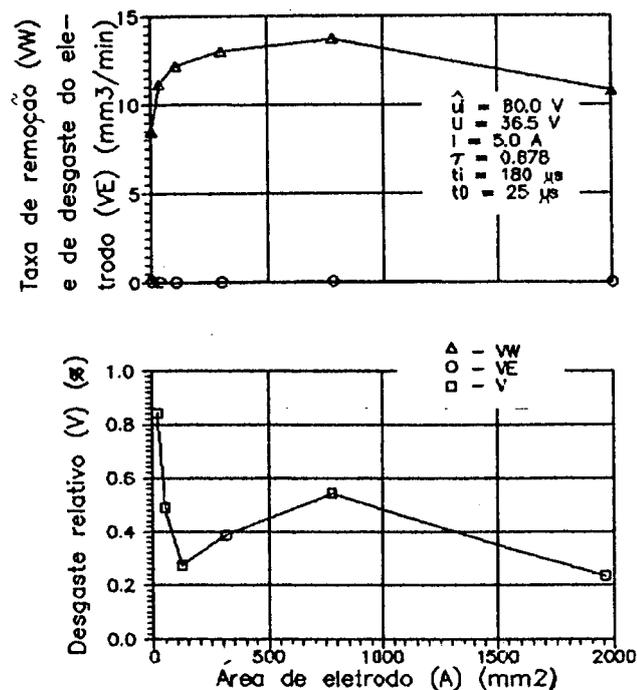


FIG. 6.9 - Taxa de remoção (VW), desgaste do eletrodo (VE) e desgaste relativo (V) em função da área (A) para corrente de 5,0 ampères.

Do gráfico da figura 6.10 para corrente de usinagem igual a 10,0 ampères obtém-se um desgaste relativo em torno de 1% com uma taxa de remoção variando entre 28,5 e 30,5 mm^3/min para uma área de eletrodo entre 300 e 2000 mm^2 , com um desgaste do eletrodo de 0,34 a 0,36 mm^3/min . Os valores máximos de rugosidade R_a e R_t no intervalo são respectivamente de 5,2 μm e 59,8 μm .

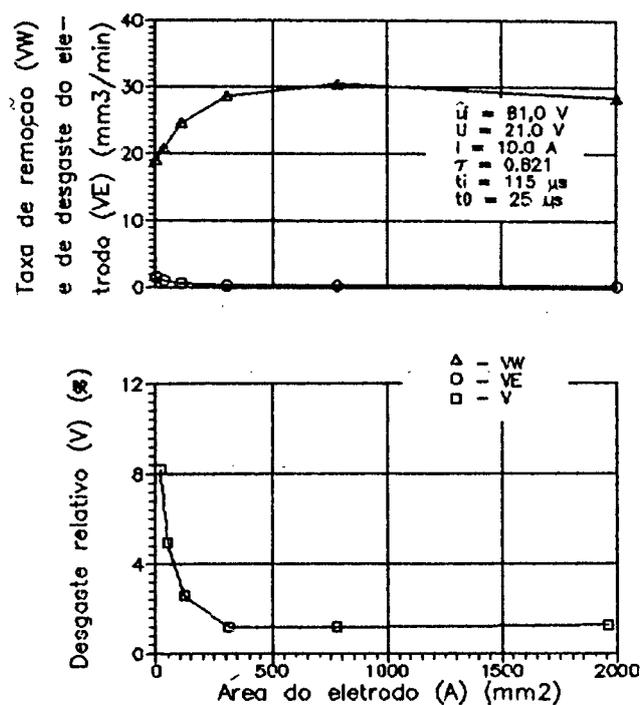


FIG. 6.10 - Taxa de remoção (VW), desgaste do eletrodo (VE) e desgaste relativo (V) em função da área (A) para corrente de 10,0 ampères.

Do gráfico da figura 6.11 para corrente de usinagem igual a 20,0 ampères obtém-se a maior taxa de remoção variando entre 82,0 e 85,5 mm³/min para uma área de eletrodo entre 350 e 2000 mm², com um desgaste do eletrodo de 0,35 a 0,59 mm³/min representando um desgaste relativo de 0,4 a 0,6%. Os valores máximos de rugosidade R_a e R_t no intervalo são respectivamente de 6,5 μm e 81 μm .

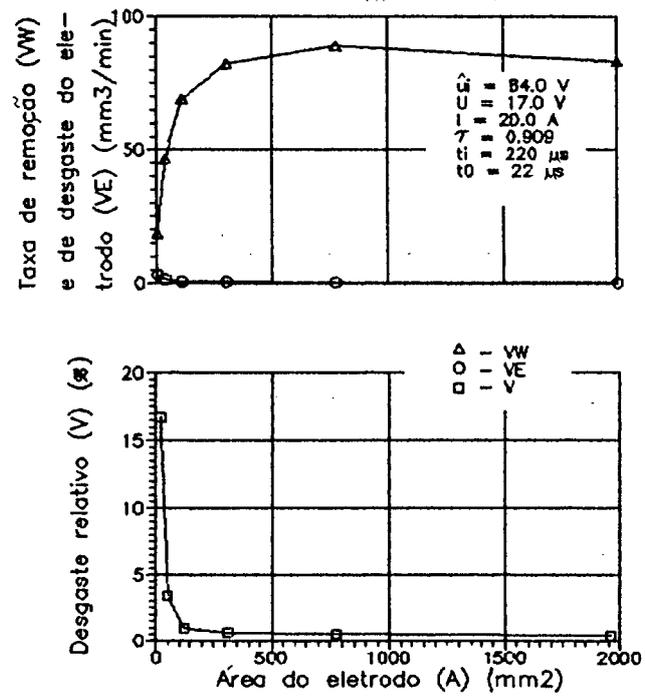


FIG. 6.11 - Taxa de remoção (VW), desgaste do eletrodo (VE) e desgaste relativo (V) em função da área (A) para corrente de 20,0 ampères.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO

7.1. Conclusões

O conhecimento dos parâmetros de usinagem no processo de eletroerosão por faíscas, entre eles a área do eletrodo, permite um planejamento eficaz do processo bem como sua otimização com diminuição dos custos de fabricação.

A seleção dos parâmetros de usinagem está associada ao compromisso de escolher os fatores que são mais importantes na fabricação de um determinado produto por eletroerosão. Os fatores mais importantes que devem ser analisados são: tempo de usinagem, dimensões da cavidade e qualidade superficial.

Para análise destes fatores pode-se concluir que a rugosidade da peça acabada não sofre influência significativa com a variação da área do eletrodo. A taxa de remoção tem um ponto de máximo para cada corrente de usinagem que não coincide, obrigatoriamente, com o mínimo desgaste relativo. O tempo de usinagem pode ser diminuído utilizando-se a área mais apropriada para uma determinada usinagem.

Existe a possibilidade de automatizar o processo utilizando os resultados obtidos neste trabalho. Quando da utilização do movimento planetário, o eletrodo deve usinar com uma área que garanta o mínimo desgaste para a maior taxa de remoção e que dê à peça a qualidade superficial desejada. Quando o movimento planetário não for utilizado, o equipamento de CNC deve ser alimentado com os parâmetros de

usinagem otimizados.

7.2. Sugestões para continuidade do trabalho

Na usinagem por eletroerosão com variação da área do eletrodo foi analisado o comportamento dos parâmetros de usinagem para correntes de usinagem de 2,5, 5,0, 10,0 e 20,0 ampères. Estudos utilizando correntes de usinagem maiores devem ser realizados.

Neste trabalho, não são considerados os aspectos da vida do eletrodo-ferramenta, o que impossibilita uma análise econômica aprofundada. Para tanto, propõe-se ensaios específicos para obtenção da vida do eletrodo-ferramenta a partir do mapeamento do desgaste do eletrodo determinando a curva de vida do mesmo.

A análise da qualidade superficial no tocante à rugosidade R_a e R_t foi realizada, mas uma análise mais aprofundada levando em consideração as alterações sofridas na camada afetada pelo calor deve ser palco de estudos posteriores.

O mesmo estudo realizado neste trabalho deve ser realizado utilizando materiais diversos para eletrodo-ferramenta e eletrodo-peça.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /01/ FIORILLO, V. & TSUBOUCHI, C. O. Há boa demanda potencial, mas mercado é retraído. *Máquinas e metais*. São Paulo, 25(285):46-49, Out. 1989.
- /02/ KREMER, D. et alii. Effects of ultrasonic vibrations on the performances in EDM. *Annals of the CIRP, Switzerland*, Hallwag, 38(1):199-202, jan. 1989.
- /03/ AGIE. CNC - Ausbildung für die betriebliche praxis, Teil 6 - Erodieren, Firma AGIE, 9-11, 1985.
- /04/ SNOEYS, R. et alii. Correlation between electro-discharge machining data and machining settings. *Annals of the CIRP, Switzerland*, Hallwag, 24(1):83-88, jan. 1975.
- /05/ KOENIG, W. *Fertigungsverfahren*, Duesseldorf, VDI - Verlag, 1979, Band 3, 155p.
- /06/ MAGESNCHAB, W. Comando Numérico Aplicado à Eletroerosão. *Simpósio sobre usinagem*, São Paulo, 109-130, 1987.
- /07/ CHARMILLES TECHNOLOGIES. Machining cycles roboform. EDM wire cutting and die sinking machining centers. Geneva, Switzerland, 16-17, 1987.
- /08/ SAITO, N. Recent electrical discharge machining (EDM) techniques in Japan. *Bull. Japan soc. of prec. eng.*, 18(2):110-116, jun. 1984.
- /09/ JESWANI, M. L. Effect of machining area and pulse parameters on EDM performance. *Indian journal of technology*, 18:354-356, sep. 1980.

- /10/ COUTINHO, T. A. Cobre e Suas Ligas. Metalografia de não-ferrosos: análise e prática. Departamento de metalurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 41-79, 1980.
- /11/ CRUZ, C. & FAGUNDES, A. L. Análise da usinagem do aço Villares VC131 para matrizes com diferentes tratamento térmico no processo de usinagem por eletroerosão. X Congresso brasileiro de engenharia mecânica. Rio de Janeiro, M. H. Hirata, 2:607-610, dez. 1989.
- /12/ AÇOS VILLARES S.A. Manual técnico, São Paulo, 2p.
- /13/ LUO, Y.F. et alli. Mirror surface EDM by electric field partially induced. Annals of the Cirp, Switzerland, Hallwag, 37(1): 179-181, jan. 1988.
- /14/ SHAW, T. W. & CROOKALL, J. R. Advanced developments in EDM- Improvements in the production of dies and moulds. Metallurgia, 212, may 1981.
- /15/ WERTHEIN, R. Untersuchung der energetischen Vorgänge bei der funkenerosiven Bearbeitung als Grundlage für eine Verbesserung des Prozessablaufs, Aachen, 1975, 150p.
- /16/ KOENIG, W. & JORRES, L. Technologie und Einsatzmöglichkeiten des funkenerosiven Polierens. V Internationales braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium, Braunschweig, RFA, 1987, 12p.
- /17/ HENSGEN, G. Werkzeugspezifische Einflüsse beim Funkenerosiven Schneiden mit Ablaufender Drahtelektrode. Tese de doutorado RWTH, Aachen, 10-29, 1984.

ANEXO A

POSICÃO SELETOR	CORRENTE (A)	POSICÇÕES DO SERVO-COMANDO							
			4	5	6	7	8	9	10
0	1,25	corrente p/ diã. 8mm	-	0,2	1,0	1,4	1,8	2,0	2,1
		corrente p/ diã. 31,5mm	-	-	-	-	-	-	-
1	2,5	corrente p/ diã. 8mm	-	0,4	2,0	2,8	3,2	3,8	4,2
		corrente p/ diã. 31,5mm	-	-	-	-	-	-	-
2	5,0	corrente p/ diã. 8mm	-	0,8	3,8	5,2	6,4	7,2	7,6
		corrente p/ diã. 31,5mm	-	1,4	4,0	5,2	6,2	6,8	7,4
3	10,0	corrente p/ diã. 8mm	-	2,4	6,0	8,4	9,6	10,8	11,4
		corrente p/ diã. 31,5mm	-	2,2	5,2	7,7	9,4	10,0	11,4
4	20,0	corrente p/ diã. 8mm	-	4,2	10,2	14,4	17,7	20,4	21,6
		corrente p/ diã. 31,5mm	-	4,8	10,5	14,4	18,0	19,8	21,0
5	30,0	corrente p/ diã. 8mm	-	6,6	13,8	20,7	24,9	28,2	30,0
		corrente p/ diã. 31,5mm	-	6,0	14,4	21,0	25,2	28,2	31,0
6	40,0	corrente p/ diã. 8mm	-	10,0	18,0	28,0	34,0	40,0	42,0
		corrente p/ diã. 31,5mm	-	9,0	21,0	29,0	34,0	39,0	41,0
7	50,0	corrente p/ diã. 8mm	-	8,0	24,0	34,0	42,0	46,0	50,0
		corrente p/ diã. 31,5mm	-	12,0	24,0	34,0	43,0	46,0	48,0
8	60,0	corrente p/ diã. 8mm	-	12,0	26,0	38,0	46,0	54,0	56,0
		corrente p/ diã. 31,5mm	-	12,0	28,0	38,0	47,0	53,0	56,0

TABELA 1 - VALORES DE CORRENTE PARA DIVERSAS POSIÇÕES DO SERVO-COMANDO

CORRENTE (A)		POSIÇÕES A/B									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,25	$t_I(\mu s)$	20	130	300	580	800	1000	1280	1480	1560	1530
	$t_O(\mu s)$	10	15	25	30	40	50	60	65	72	75
2,5	$t_I(\mu s)$	35	130	340	580	780	960	1190	1360	1520	1540
	$t_O(\mu s)$	20	25	35	45	50	65	70	75	80	85
5,0	$t_I(\mu s)$	90	180	350	680	830	1080	1220	1380	1680	1640
	$t_O(\mu s)$	25	30	38	48	55	62	70	80	88	90
10,0	$t_I(\mu s)$	115	205	385	620	820	1045	1245	1480	1600	1680
	$t_O(\mu s)$	25	30	39	45	53	63	72	80	87	90
20,0	$t_I(\mu s)$	140	220	410	610	810	1180	1260	1400	1520	1640
	$t_O(\mu s)$	22	30	35	45	52	60	70	77	88	90
30,0	$t_I(\mu s)$	145	235	410	660	860	1070	1280	1470	1640	1620
	$t_O(\mu s)$	22	30	38	45	50	59	70	79	85	89
40,0	$t_I(\mu s)$	160	250	440	640	860	1160	1250	1360	1580	1630
	$t_O(\mu s)$	20	25	35	45	50	60	72	79	88	90
50,0	$t_I(\mu s)$	170	270	425	660	920	1080	1280	1530	1680	1620
	$t_O(\mu s)$	20	26	35	42	50	58	70	75	85	88
60,0	$t_I(\mu s)$	180	280	460	660	890	1080	1360	1620	1760	1880
	$t_O(\mu s)$	20	28	35	40	50	60	70	75	82	80

TABELA 2 - VALORES DE TEMPO DE IMPULSO (t_I) E TEMPO DE PAUSA (t_O) PARA AS DIVERSAS POSIÇÕES A E B NO SELETOR DA MÁQUINA

t_0/t_1 (μs) / (μs)	20	130	300	580	800	1000	1280	1480	1560	1530
10	66,7	92,9	96,8	98,3	98,8	99,0	99,2	99,3	99,4	99,4
15	57,1	89,7	95,2	97,5	98,2	98,5	98,8	99,0	99,0	99,0
25	44,4	83,9	92,3	95,9	97,0	97,6	98,1	98,3	98,4	98,4
30	40,0	81,3	90,9	95,1	96,4	97,1	97,7	98,0	98,1	98,1
40	33,3	76,5	88,2	93,5	95,2	96,2	97,0	97,4	97,5	97,5
50	28,6	72,2	85,7	92,1	94,1	95,2	96,2	96,7	96,9	96,8
60	25,0	68,4	83,3	90,6	93,0	94,3	95,5	96,1	96,3	96,2
65	23,5	66,7	82,2	89,9	92,5	93,9	95,2	95,8	96,0	95,9
72	21,7	64,4	80,6	89,0	91,7	93,3	94,7	95,4	95,6	95,5
75	21,1	63,4	80,0	88,5	91,4	93,0	94,5	95,2	95,4	95,3

TABELA 3 - RELAÇÃO DE CONTATO (τ) EM PERCENTUAL PARA CORRENTE DE 1,25 A

t_0/t_1 (μs) / (μs)	35	130	340	580	780	960	1190	1360	1520	1540
20	63,6	86,7	94,4	96,7	97,5	98,0	98,3	98,6	98,7	98,7
25	58,3	83,9	93,2	95,9	96,9	97,5	97,9	98,2	98,4	98,4
35	50,0	78,8	90,7	94,3	95,7	96,5	97,1	97,5	97,7	97,8
45	43,8	74,3	88,3	92,8	94,5	95,5	96,4	96,8	97,1	97,2
50	41,2	72,2	87,2	92,1	94,0	95,0	96,0	96,5	96,8	96,9
65	35,0	66,7	84,0	89,9	92,3	93,7	94,8	95,4	95,9	96,0
70	33,3	65,0	82,9	89,2	91,8	93,2	94,4	95,1	95,6	95,7
75	31,8	63,4	81,9	88,5	91,2	92,8	94,1	94,8	95,3	95,4
80	30,4	61,9	81,0	87,9	90,7	92,3	93,7	94,4	95,0	95,1
85	29,2	60,5	80,0	87,2	90,2	91,9	93,3	94,1	94,7	94,8

TABELA 4 - RELAÇÃO DE CONTATO (τ) EM PERCENTUAL PARA CORRENTE DE 2,5 A

t_0/t_1 (μs) / (μs)	90	180	350	680	830	1080	1220	1380	1680	1640
25	78,3	87,8	93,3	96,5	97,1	97,7	98,0	98,2	98,5	98,5
30	75,0	85,7	92,1	95,8	96,5	97,3	97,6	97,9	98,2	98,2
38	70,3	82,6	90,2	94,7	95,6	96,6	97,0	97,3	97,8	97,7
48	65,2	78,9	87,9	93,4	94,5	95,7	96,2	96,6	97,2	97,2
55	62,1	76,6	86,4	92,5	93,8	95,2	95,7	96,2	96,8	96,8
62	59,2	74,4	85,0	91,6	93,0	94,6	95,2	95,7	96,4	96,4
70	56,3	72,0	83,3	90,7	92,2	93,9	94,6	95,2	96,0	95,9
80	52,9	69,2	81,4	89,5	91,2	93,1	93,8	94,5	95,5	95,3
88	50,6	67,2	79,9	88,5	90,4	92,5	93,3	94,0	95,0	94,9
90	50,0	66,7	79,5	88,3	90,2	92,3	93,1	93,9	94,9	94,8

TABELA 5 - RELAÇÃO DE CONTATO (τ) EM PERCENTUAL PARA CORRENTE DE 5,0 A

t_0/t_1 (μs)/(μs)	115	205	385	620	820	1045	1245	1480	1600	1600
25	82,1	89,1	93,9	96,1	97,0	97,7	98,0	98,3	98,5	98,5
30	79,3	87,2	92,8	95,4	96,5	97,2	97,6	98,0	98,2	98,2
39	74,7	84,0	90,8	94,1	95,5	96,4	97,0	97,4	97,6	97,6
45	71,9	82,0	89,5	93,2	94,8	95,9	96,5	97,0	97,3	97,3
53	68,5	79,5	87,9	92,1	93,9	95,2	95,9	96,5	96,8	96,8
63	64,6	76,5	85,9	90,8	92,9	94,3	95,2	95,9	96,2	96,2
72	61,5	74,0	84,2	89,6	91,9	93,6	94,5	95,4	95,7	95,7
80	59,0	71,9	82,8	88,6	91,1	92,9	94,0	94,9	95,2	95,2
87	56,9	70,2	81,6	87,7	90,4	92,3	93,5	94,4	94,8	94,8
90	56,1	69,5	81,1	87,3	90,1	92,1	93,3	94,3	94,7	94,7

TABELA 6 - RELAÇÃO DE CONTATO (τ) EM PERCENTUAL PARA CORRENTE DE 10,0 A

t_0/t_1 (μs)/(μs)	140	220	410	610	810	1180	1260	1400	1520	1640
22	86,4	90,9	94,9	96,5	97,4	98,2	98,3	98,5	98,6	98,7
30	82,4	88,0	93,2	95,3	96,4	97,5	97,7	97,9	98,1	98,2
35	80,0	86,3	92,1	94,6	95,9	97,1	97,3	97,6	97,7	97,9
45	75,7	83,0	90,1	93,1	94,7	96,3	96,6	96,9	97,1	97,3
52	72,9	80,9	88,7	92,1	94,0	95,8	96,0	96,4	96,7	96,9
60	70,0	78,6	87,2	91,0	93,1	95,2	95,5	95,9	96,2	96,5
70	66,7	75,9	85,4	89,7	92,0	94,4	94,7	95,2	95,6	95,9
77	64,5	74,1	84,2	88,8	91,3	93,9	94,2	94,8	95,2	95,5
88	61,4	71,4	82,3	87,4	90,2	93,1	93,5	94,1	94,5	94,9
90	60,9	71,0	82,0	87,1	90,0	92,9	93,3	94,0	94,4	94,8

TABELA 7 - RELAÇÃO DE CONTATO (τ) EM PERCENTUAL PARA CORRENTE DE 20,0 A

t_0/t_1 (μs)/(μs)	145	235	410	660	860	1070	1280	1470	1640	1620
22	86,8	91,4	94,9	96,8	97,5	98,0	98,3	98,5	98,7	98,7
30	82,9	88,7	93,2	95,7	96,6	97,3	97,7	98,0	98,2	98,2
38	79,2	86,1	91,5	94,6	95,8	96,6	97,1	97,5	97,7	97,7
45	76,3	83,9	90,1	93,6	95,0	96,0	96,6	97,0	97,3	97,3
50	74,4	82,5	89,1	93,0	94,5	95,5	96,2	96,7	97,0	97,0
59	71,1	79,9	87,4	91,8	93,6	94,8	95,6	96,1	96,5	96,5
70	67,4	77,0	85,4	90,4	92,5	93,9	94,8	95,5	95,9	95,9
79	64,7	74,8	83,8	89,3	91,6	93,1	94,2	94,9	95,4	95,4
85	63,0	73,4	82,8	88,6	91,0	92,6	93,8	94,5	95,1	95,0
89	62,0	72,5	82,2	88,1	90,6	92,3	93,5	94,3	94,9	94,8

TABELA 8 - RELAÇÃO DE CONTATO (τ) EM PERCENTUAL PARA CORRENTE DE 30,0 A

t_0/t_I (μs)/(μs)	160	250	440	640	860	1160	1250	1360	1580	1600
20	88,9	92,6	95,7	97,0	97,7	98,3	98,4	98,6	98,8	98,8
25	86,5	90,9	94,6	96,2	97,2	97,9	98,0	98,2	98,4	98,5
35	82,1	87,7	92,6	94,8	96,1	97,1	97,3	97,5	97,8	97,9
45	78,0	84,7	90,7	93,4	95,0	96,3	96,5	96,8	97,2	97,3
50	76,2	83,3	89,8	92,8	94,5	95,9	96,2	96,5	96,9	97,0
60	72,7	80,6	88,0	91,4	93,5	95,1	95,4	95,8	96,3	96,5
72	69,0	77,6	85,9	89,9	92,3	94,2	94,6	95,0	95,6	95,8
79	66,9	76,0	84,8	89,0	91,6	93,6	94,1	94,5	95,2	95,4
88	64,5	74,0	83,3	87,9	90,7	92,9	93,4	93,9	94,7	94,9
90	64,0	73,5	83,0	87,7	90,5	92,8	93,3	93,8	94,6	94,8

TABELA 9 - RELAÇÃO DE CONTATO (τ) EM PERCENTUAL PARA CORRENTE DE 40,0 A

t_0/t_I (μs)/(μs)	170	270	425	660	920	1080	1280	1530	1680	1620
20	89,5	93,1	95,5	97,1	97,9	98,2	98,5	98,7	98,8	98,7
26	86,7	91,2	94,2	96,2	97,3	97,6	98,0	98,3	98,5	98,4
35	82,9	88,5	92,4	95,0	96,3	96,9	97,3	97,8	98,0	97,9
42	80,2	86,5	91,0	94,0	95,6	96,3	96,8	97,3	97,6	97,5
50	77,3	84,4	89,5	93,0	94,8	95,6	96,2	96,8	97,1	97,0
58	74,6	82,3	88,0	91,9	94,1	94,9	95,7	96,3	96,7	96,5
70	70,8	79,4	85,9	90,4	92,9	93,9	94,8	95,6	96,0	95,9
75	69,4	78,3	85,0	89,8	92,5	93,5	94,5	95,3	95,7	95,6
85	66,7	76,1	83,3	88,6	91,5	92,7	93,8	94,7	95,2	95,0
88	65,9	75,4	82,8	88,2	91,3	92,5	93,6	94,6	95,0	94,8

TABELA 10 - RELAÇÃO DE CONTATO (τ) EM PERCENTUAL PARA CORRENTE DE 50,0 A

t_0/t_I (μs)/(μs)	180	280	460	660	890	1080	1360	1620	1760	1880
20	90,0	93,3	95,8	97,1	97,8	98,2	98,6	98,8	98,9	99,0
28	86,5	90,9	94,3	95,9	96,9	97,5	98,0	98,3	98,4	98,5
35	83,7	88,9	92,9	95,0	96,2	96,9	97,5	97,9	98,1	98,2
40	81,8	87,5	92,0	94,3	95,7	96,4	97,1	97,6	97,8	97,9
50	78,3	84,8	90,2	93,0	94,7	95,6	96,5	97,0	97,2	97,4
60	75,0	82,4	88,5	91,7	93,7	94,7	95,8	96,4	96,7	96,9
70	72,0	80,0	86,8	90,4	92,7	93,9	95,1	95,9	96,2	96,4
75	70,6	78,9	86,0	89,8	92,2	93,5	94,8	95,6	95,9	96,2
82	68,7	77,3	84,9	88,9	91,6	92,9	94,3	95,2	95,5	95,8
80	69,2	77,8	85,2	89,2	91,8	93,1	94,4	95,3	95,7	95,9

TABELA 11 - RELAÇÃO DE CONTATO (τ) EM PERCENTUAL PARA CORRENTE DE 60,0 A

PLANO DE ENSAIOS

CORRENTE DE TRABALHO = 2,5 A

TENSÃO DE TRABALHO = 37,0 V

TENSÃO EM VAZIO = 78,0 V

POSICÃO DO SERVO-COMANDO = 7

TEMPO DE IMPULSO (t_I) = 130 μ s

TEMPO DE PAUSA (t_0) = 20 μ s

RELAÇÃO DE CONTATO (γ) = 86,7 %

PRESSÃO DE SUÇÃO = 0,6 Kg/Cm²

PRESSÃO DE INJEÇÃO = 0,6 Kg/Cm²

PESO ESPECÍFICO DO MATERIAL DO ELETRODO = $8,93 \times 10^{-3}$ g/mm³

PESO ESPECÍFICO DO MATERIAL DA PEÇA = $7,86 \times 10^{-3}$ g/mm³

PROFUNDIDADE DE USINAGEM = 1 mm

DIÂMETRO DO ELETRODO (mm)	5,0	8,0	12,5	20,0	31,5	50,0
CÓDIGO DO ELETRODO	1 A	2 C	3 E	4 B	5 A	6 B
PESO DO ELETR. (ANTES) (g)	4,0345	8,3507	14,8780	52,7778	88,8446	135,3514
PESO DO ELETR. (DEPOIS) (g)	4,0309	8,3458	14,8637	52,7485	88,8131	135,3432
ΔE (ELETRODO) (g)	$3,6 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-3}$	0,0143	0,0293	0,0315	0,00815
V_e (mm ³)	0,40313	0,5487	1,6013	3,2811	3,5274	0,91265
VE (mm ³ /min)	0,05868	0,036	0,03975	0,04025	0,03761	0,00691
CÓDIGO DA PEÇA	3	2	10	39	54	59
PESO DA PEÇA (ANTES) (g)	8,2715	10,8249	9,0408	43,4049	84,3599	91,7867
PESO DA PEÇA (DEPOIS) (g)	8,1488	10,4922	8,2244	41,5942	82,4250	89,3086
ΔP (PEÇA) (g)	0,1227	0,3327	0,8164	1,8107	1,9349	2,4781
V_p (mm ³)	15,6106	42,3282	103,8677	230,369	246,170	315,279
VP (mm ³ /min)	2,2723	2,7771	2,5785	2,8265	2,6244	2,3885
V (%)	2,5824	1,2963	1,5416	1,4243	1,4329	0,2894
TEMPO DE USINAGEM (min)	6,68	15,2416	40,2816	81,5016	93,80	132,0

TABELA 12 - PLANO DE ENSAIO PARA USINAGEM COM CORRENTE DE 2,5 A

PLANO DE ENSAIOS

CORRENTE DE TRABALHO = 5,0 A

TENSÃO DE TRABALHO = 36,5 V

TENSÃO EM VAZIO = 80,0 V

POSIÇÃO DO SERVO-COMANDO = 7

TEMPO DE IMPULSO (t_I) = 180 μ s

TEMPO DE PAUSA (t_0) = 25 μ s

RELAÇÃO DE CONTATO (%) = 87,8 %

PRESSÃO DE SUÇÃO = 0,6 Kg/Cm²

PRESSÃO DE INJEÇÃO = 0,6 Kg/Cm²

PESO ESPECÍFICO DO MATERIAL DO ELETRODO = $8,93 \times 10^{-3}$ g/mm³

PESO ESPECÍFICO DO MATERIAL DA PEÇA = $7,86 \times 10^{-3}$ g/mm³

PROFUNDIDADE DE USINAGEM = 1 mm

DIAMETRO DO ELETRODO (mm)	5,0	8,0	12,5	20,0	31,5	50,0
CÓDIGO DO ELETRODO	1 C	2 E	3 E	4 B	5 C	6 C
PESO DO ELETR. (ANTES) (g)	3,1004	8,3643	14,8637	52,7428	83,1378	80,3532
PESO DO ELETR. (DEPOIS) (g)	3,0991	8,3600	14,8608	52,7330	83,1035	80,3291
ΔE (ELETRODO) (g)	$1,2 \times 10^{-3}$	0,0043	0,0029	0,098	0,0343	0,0241
V_e (mm ³)	0,14177	0,4815	0,3247	1,09742	3,84098	2,69877
VE (mm ³ /min)	0,0713	0,0543	0,03328	0,05051	0,07462	0,02522
CÓDIGO DA PEÇA	6	5	11	35	59	61
PESO DA PEÇA (ANTES) (g)	9,0499	9,8671	10,0320	44,1091	97,3420	91,9804
PESO DA PEÇA (DEPOIS) (g)	8,9176	9,0868	9,0968	41,8800	91,7867	82,9243
ΔP (PEÇA) (g)	0,1323	0,7803	0,9352	2,2291	5,5553	9,0561
V_p (mm ³)	16,8320	99,2748	118,9822	283,60	706,787	1152,175
VM (mm ³ /min)	8,4654	11,2028	12,1949	13,0521	13,7311	10,7679
V (%)	0,8422	0,4850	0,2729	0,3869	0,5434	0,2342
TEMPO DE USINAGEM (min)	1,9883	8,86166	9,75666	21,7283	51,4733	107,0

TABELA 13 - PLANO DE ENSAIO PARA USINAGEM COM CORRENTE DE 5,0 A

PLANO DE ENSAIOS

CORRENTE DE TRABALHO = 10,0 A

TENSÃO DE TRABALHO = 21,0 V

TENSÃO EM VAZIO = 81,0 V

POSIÇÃO DO SERVO-COMANDO = 8

TEMPO DE IMPULSO (t_I) = 115 μ s

TEMPO DE PAUSA (t_0) = 25 μ s

RELAÇÃO DE CONTATO (%) = 82,1 %

PRESSÃO DE SUÇÃO = 0,6 Kg/Cm²

PRESSÃO DE INJEÇÃO = 0,6 Kg/Cm²

PESO ESPECÍFICO DO MATERIAL DO ELETRODO = $8,93 \times 10^{-3}$ g/mm³

PESO ESPECÍFICO DO MATERIAL DA PEÇA = $7,86 \times 10^{-3}$ g/mm³

PROFUNDIDADE DE USINAGEM = 1 mm

DIÂMETRO DO ELETRODO (mm)	5,0	8,0	12,5	20,0	31,5	50,0
CÓDIGO DO ELETRODO	1 B	2 G	3 D	4 A	5 C	6 C
PESO DO ELETR. (ANTES) (g)	4,1114	8,7996	20,6600	52,7164	83,3443	80,7657
PESO DO ELETR. (DEPOIS) (g)	4,0933	8,7800	20,6345	52,5840	83,2680	80,5544
ΔE (ELETRODO) (g)	0,0181	0,0196	0,0255	0,0324	0,0763	0,2113
V_e (mm ³)	2,02687	2,1948	2,8555	3,6282	8,5442	23,6618
VE (mm ³ /min)	1,56322	1,02885	0,60929	0,34067	0,36652	0,36874
CÓDIGO DA PEÇA	7	14	25	33	46	62
PESO DA PEÇA (ANTES) (g)	8,3307	9,6491	46,4030	43,4112	41,8043	97,4522
PESO DA PEÇA (DEPOIS) (g)	8,1364	9,3003	45,5022	41,0121	36,2102	83,1007
ΔP (PEÇA) (g)	0,1943	0,3488	0,9008	2,3991	5,5941	14,3515
V_p (mm ³)	24,7201	44,3766	114,6055	305,229	711,717	1825,891
VW (mm ³ /min)	19,0653	20,8018	24,4538	28,660	30,5305	28,4539
V (%)	8,1993	4,94596	2,4916	1,1886	1,2005	1,2959
TEMPO DE USINAGEM (min)	1,2966	2,1333	4,68666	10,65	23,311	64,17

TABELA 14 - PLANO DE ENSAIO PARA USINAGEM COM CORRENTE DE 10,0 A

PLANO DE ENSAIOS

CORRENTE DE TRABALHO = 20,0 A

TENSÃO DE TRABALHO = 17,0 V

TENSÃO EM VAZIO = 84,0 V

POSIÇÃO DO SERVO-COMANDO = 9

TEMPO DE IMPULSO (t_I) = 220 μ s

TEMPO DE PAUSA (t_0) = 22 μ s

RELAÇÃO DE CONTATO (%) = 90,9 %

PRESSÃO DE SUÇÃO = 0,6 Kg/Cm²

PRESSÃO DE INJEÇÃO = 0,6 Kg/Cm²

PESO ESPECÍFICO DO MATERIAL DO ELETRODO = $8,93 \times 10^{-3}$ g/mm³

PESO ESPECÍFICO DO MATERIAL DA PEÇA = $7,86 \times 10^{-3}$ g/mm³

PROFUNDIDADE DE USINAGEM = 1 mm

DIÂMETRO DO ELETRODO (mm)	5,0	8,0	12,5	20,0	31,5	50,0
CÓDIGO DO ELETRODO	1 A	2 F	3 A	4 B	5 C	6 B
PESO DO ELETR. (ANTES) (g)	4,0309	9,0626	19,5471	52,7330	83,2680	135,5033
PESO DO ELETR. (DEPOIS) (g)	4,0060	9,0475	19,5267	52,6815	83,2340	135,4300
ΔE (ELETRODO) (g)	0,0249	0,0151	0,0204	0,05145	0,0340	0,0733
V_e (mm ³)	2,78835	1,69093	2,2844	5,76148	3,80739	8,2083
VE (mm ³ /min)	3,07539	1,5803	0,6481	0,50509	0,42001	0,35518
CÓDIGO DA PEÇA	1	13	39	44	46	57
PESO DA PEÇA (ANTES) (g)	8,7409	9,9240	40,6683	44,2789	36,2102	97,0828
PESO DA PEÇA (DEPOIS) (g)	8,6099	9,5328	38,7600	36,9110	30,2333	81,9568
ΔP (PEÇA) (g)	0,131	0,3912	1,9083	2,195	5,9769	15,126
V_p (mm ³)	16,666	49,7709	242,786	937,392	760,419	1924,427
VW (mm ³ /min)	18,3825	46,5149	68,8750	82,1793	83,8852	83,2725
V (%)	16,7299	3,3974	0,94097	0,61462	0,50069	0,4265
TEMPO DE USINAGEM (min)	0,90666	1,07	3,525	11,4066	9,065	23,11

TABELA 15 - PLANO DE ENSAIO PARA USINAGEM COM CORRENTE DE 20,0 A

PLANO DE ENSAIOS

CORRENTE DE TRABALHO = 2,5 A

TENSAO DE TRABALHO = 37,0 V

TENSAO EM VAZIO = 78,0 V

POSICAO DO SERVO-COMANDO = 7

TEMPO DE IMPULSO (t_I) = 130 μ s

TEMPO DE PAUSA (t_0) = 20 μ s

RELAÇÃO DE CONTATO (ζ) = 86,7 %

PRESSAO DE SUÇAO = 0,6 Kg/Cm²

PRESSAO DE INJEÇAO = 0,6 Kg/Cm²

PESO ESPECÍFICO DO MATERIAL DO ELETRODO = $8,93 \times 10^{-3}$ g/mm³

PESO ESPECÍFICO DO MATERIAL DA PEÇA = $7,86 \times 10^{-3}$ g/mm³

PROFUNDIDADE DE USINAGEM = 1 mm

DIAMETRO DO ELETRODO = 8,0 mm

CÓDIGO DO ELETRODO	2 B	2 C	2 A	2 F	2 G	2 C
PESO DO ELETR. (ANTES) (g)	5,8497	8,3507	7,0338	9,0433	8,7725	8,3458
PESO DO ELETR. (DEPOIS) (g)	5,8472	8,3458	7,0303	9,0384	8,7650	8,3391
ΔE (ELETRODO) (g)	0,0025	$4,9 \times 10^{-3}$	0,0034	0,0048	0,0074	0,0067
V_e (mm ³)	0,27995	0,5487	0,38633	0,54311	0,83426	0,75028
VE (mm ³ /min)	0,01501	0,036	0,01071	0,02833	0,02009	0,03748
CÓDIGO DA PEÇA	14	2	8	5	7	4
PESO DA PEÇA (ANTES) (g)	7,9399	10,8249	8,7900	9,0868	7,3967	9,8988
PESO DA PEÇA (DEPOIS) (g)	7,5873	10,4922	8,0871	8,7205	6,6646	9,5709
ΔP (PEÇA) (g)	0,3526	0,3327	0,7029	0,3663	0,7321	0,3279
V_p (mm ³)	44,8601	42,3282	89,427	46,6031	93,1425	41,7175
VH (mm ³ /min)	2,40493	2,77714	2,4804	2,4310	2,2439	2,0841
V (%)	0,62405	1,2963	4,3202	1,1653	0,8956	1,7983
TEMPO DE USINAGEM (min)	18,653	15,242	36,053	19,170	41,508	20,016

TABELA 16 - PLANO DE ENSAIO PARA USINAGEM COM CORRENTE DE 2,5 A

PLANO DE ENSAIOS

CORRENTE DE TRABALHO = 5,0 A

TENSAO DE TRABALHO = 36,5 V

TENSAO EM VAZIO = 80,0 V

POSICAO DO SERVO-COMANDO = 7

TEMPO DE IMPULSO (t_T) = 180 μ s

TEMPO DE PAUSA (t_0) = 25 μ s

RELAÇÃO DE CONTATO ($\%$) = 87,8 %

PRESSAO DE SUCCAO = 0,6 Kg/Cm²

PRESSAO DE INJECCAO = 0,6 Kg/Cm²

PESO ESPECIFICO DO MATERIAL DO ELETRODO = $8,93 \times 10^{-3}$ g/mm³

PESO ESPECIFICO DO MATERIAL DA PEÇA = $7,86 \times 10^{-3}$ g/mm³

PROFUNDIDADE DE USINAGEM = 1 mm

DIAMETRO DO ELETRODO = 8,0 mm

CÓDIGO DO ELETRODO	2 B	2 D	2 G	2 F	2 E	2 E
PESO DO ELETR. (ANTES) (g)	5,8506	9,5097	8,7900	9,0475	8,3643	8,3600
PESO DO ELETR. (DEPOIS) (g)	5,8497	9,5073	8,7725	9,0433	8,3600	8,3512
ΔE (ELETRODO) (g)	0,0009	0,0024	0,0075	0,0042	0,0043	0,0088
V_e (mm ³)	0,10078	0,2687	0,8398	0,47032	0,4815	0,98544
VE (mm ³ /min)	0,02477	0,06358	0,05474	0,0568	0,05434	0,07211
CÓDIGO DA PEÇA	8	17	14	7	5	39
PESO DA PEÇA (ANTES) (g)	9,1506	9,2737	9,3003	8,1364	9,8671	38,7600
PESO DA PEÇA (DEPOIS) (g)	8,7900	8,9010	7,9399	7,3967	9,0868	37,6224
ΔP (PEÇA) (g)	0,3606	0,3727	1,3604	0,7397	0,7803	1,1376
V_p (mm ³)	45,8778	47,4173	173,079	94,1094	99,2748	144,7328
VW (mm ³ /min)	11,2768	11,2187	11,2804	11,3727	11,2028	11,2703
V (%)	0,21965	0,5665	0,4853	0,4994	0,48504	0,68087
TEMPO DE USINAGEM (min)	4,0683	4,2266	15,3433	8,275	8,8616	13,6666

TABELA 17 - PLANO DE ENSAIO PARA USINAGEM COM CORRENTE DE 5,0 A

PLANO DE ENSAIOS

CORRENTE DE TRABALHO = 10,0 A

TENSÃO DE TRABALHO = 21,0 V

TENSÃO EM VAZIO = 81,0 V

POSIÇÃO DO SERVO-COMANDO = 8

TEMPO DE IMPULSO (t_I) = 115 μ s

TEMPO DE PAUSA (t_D) = 25 μ s

RELAÇÃO DE CONTATO (%) = 82,1 %

PRESSÃO DE SUÇÃO = 0,6 Kg/Cm²

PRESSÃO DE INJEÇÃO = 0,6 Kg/Cm²

PESO ESPECÍFICO DO MATERIAL DO ELETRODO = $8,93 \times 10^{-3}$ g/mm³

PESO ESPECÍFICO DO MATERIAL DA PEÇA = $7,86 \times 10^{-3}$ g/mm³

PROFUNDIDADE DE USINAGEM = 1 mm

DIÂMETRO DO ELETRODO = 12,5 mm

CÓDIGO DO ELETRODO	3 A	3 D	3 C	3 B	3 A	3 D
PESO DO ELETR. (ANTES) (g)	19,5872	17,9799	19,4322	20,6600	19,5267	20,5509
PESO DO ELETR. (DEPOIS) (g)	19,5471	17,9561	19,4112	20,6345	19,5085	20,5211
ΔE (ELETRODO) (g)	0,0401	0,0238	0,0210	0,0255	0,0298	0,0182
V_e (mm ³)	4,4905	2,6652	2,3516	2,8555	3,3371	2,0381
VE (mm ³ /min)	0,8854	0,5901	0,4982	0,6093	0,6302	0,1696
CÓDIGO DA PEÇA	44	42	39	25	33	26
PESO DA PEÇA (ANTES) (g)	45,1521	45,5234	41,5942	46,4030	41,0121	43,8496
PESO DA PEÇA (DEPOIS) (g)	44,2789	44,6097	40,6683	45,5022	40,1065	41,1224
ΔP (PEÇA) (g)	0,8732	0,9137	0,9259	0,9008	0,9056	2,7272
V_p (mm ³)	111,0941	116,2468	117,7989	114,6056	115,2163	346,9720
VW (mm ³ /min)	21,9048	25,7376	24,9574	24,4538	21,7594	28,8742
V (%)	4,042	3,5501	1,9962	2,4916	2,8963	0,58738
TEMPO DE USINAGEM (min)	5,0716	4,5166	4,72	4,6866	5,295	12,0166

TADELA 18 - PLANO DE ENSAIO PARA USINAGEM COM CORRENTE DE 10,0 A

PLANO DE ENSAIOS

CORRENTE DE TRABALHO = 20,0 A
 TENSÃO DE TRABALHO = 17,0 V
 TENSÃO EM VAZIO = 84,0 V
 POSIÇÃO DO SERVO-COMANDO = 9
 TEMPO DE IMPULSO (t_i) = 220 μ s
 TEMPO DE PAUSA (t_0) = 22 μ s
 RELAÇÃO DE CONTATO (%) = 90,9 %
 PRESSÃO DE SUÇÃO = 0,6 Kg/Cm²
 PRESSÃO DE INJEÇÃO = 0,6 Kg/Cm²
 PESO ESPECÍFICO DO MATERIAL DO ELETRODO = $8,93 \times 10^{-3}$ g/mm³
 PESO ESPECÍFICO DO MATERIAL DA PEÇA = $7,86 \times 10^{-3}$ g/mm³
 PROFUNDIDADE DE USINAGEM = 1 mm
 DIÂMETRO DO ELETRODO = 31,5 mm

CÓDIGO DO ELETRODO	5 B	5 C	5 A	5 B	5 B	5 C
PESO DO ELETR. (ANTES) (g)	89,1563	83,2680	88,8723	89,1352	89,0685	83,1501
PESO DO ELETR. (DEPOIS) (g)	89,1352	83,2340	88,8446	89,0685	88,9621	83,1378
ΔE (ELETRODO) (g)	0,0211	0,034	0,0277	0,0667	0,1064	0,0123
V_e (mm ³)	2,3628	3,8073	3,1019	7,4692	11,9148	1,37737
VE (mm ³ /min)	0,25757	0,42001	0,32367	0,4567	0,4697	0,14824
CÓDIGO DA PEÇA	50	46	61	54	55	49
PESO DA PEÇA (ANTES) (g)	39,0125	36,2102	98,0697	96,2570	89,8540	39,7827
PESO DA PEÇA (DEPOIS) (g)	32,9713	30,2333	91,9804	84,3599	72,0924	33,7287
ΔP (PEÇA) (g)	6,0412	5,9769	6,0893	11,8971	17,7616	6,054
V_p (mm ³)	768,6005	760,4198	774,720	1513,626	2259,745	770,229
UV (mm ³ /min)	83,7864	83,8852	80,8406	92,5570	89,0890	82,8946
V (%)	0,3074	0,50069	0,4004	0,4934	0,5272	0,17882
TEMPO DE USINAGEM (min)	9,1733	9,065	9,5833	16,3533	25,365	9,2916

TABELA 19 - PLANO DE ENSAIO PARA USINAGEM COM CORRENTE DE 20,0 A

ENSAIO DE RUGOSIDADE

CORRENTE DE USINAGEM = 2,5 A

PEÇA NÚMERO = 66

CUT-OFF = 0,8mm

VELOCIDADE DE MEDIÇÃO = 2 mm/s

DIAMETRO DO ELETRODO (mm)	RUGOSIDADE (µm)	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3
5,0	R _a	NÃO FOI POSSÍVEL MEDIR		
	R _t	NÃO FOI POSSÍVEL MEDIR		
9,0	R _a	2,4	2,4	2,4
	R _t	23,1	20,7	18,1
12,5	R _a	2,4	2,4	2,2
	R _t	24,8	23,3	22,5
20,0	R _a	2,4	2,4	2,2
	R _t	27,1	24,0	22,7
31,5	R _a	2,6	2,4	2,2
	R _t	27,9	27,5	25,6
50,0	R _a	2,2	2,0	2,2
	R _t	23,0	22,0	22,9

TABELA 20 - VALORES DE RUGOSIDADE R_a e R_t MEDIDOS NA SUPERFÍCIE DA PEÇA PARA CORRENTE DE USINAGEM DE 2,5 A

ENSAIO DE RUGOSIDADE

CORRENTE DE USINAGEM = 5,0 A

PEÇA NÚMERO = 58

CUT-OFF = 0,8mm

VELOCIDADE DE MEDIÇÃO = 2 mm/s

DIÂMETRO DO ELETRODO (mm)	RUGOSIDADE (μm)	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3
5,0	R_a	NÃO FOI POSSÍVEL MEDIR		
	R_t	NÃO FOI POSSÍVEL MEDIR		
8,0	R_a	3,7	3,8	4,0
	R_t	37,2	29,5	26,3
12,5	R_a	3,7	4,1	4,2
	R_t	35,9	38,5	33,3
20,0	R_a	3,8	4,0	4,0
	R_t	42,3	36,5	39,1
31,5	R_a	4,1	3,8	3,8
	R_t	41,0	35,4	44,2
50,0	R_a	4,2	4,0	3,9
	R_t	32,0	30,1	34,3

TABELA 21 - VALORES DE RUGOSIDADE R_a e R_t MEDIDOS NA SUPERFÍCIE DA PEÇA PARA CORRENTE DE USINAGEM DE 5,0 A

ENSAIO DE RUGOSIDADE

CORRENTE DE USINAGEM = 10,0 A

PEÇA NÚMERO = 65

CUT-OFF = 0,8mm

VELOCIDADE DE MEDIÇÃO = 2 mm/s

DIAMETRO DO ELETRODO (mm)	RUGOSIDADE (µm)	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3
5,0	R _a	NÃO FOI POSSÍVEL MEDIR		
	R _t	NÃO FOI POSSÍVEL MEDIR		
8,0	R _a	4,4	4,7	4,8
	R _t	39,7	42,9	40,4
12,5	R _a	5,5	5,2	4,9
	R _t	44,8	44,9	41,0
20,0	R _a	5,2	5,2	5,1
	R _t	43,0	51,5	45,0
31,5	R _a	5,0	5,0	5,0
	R _t	54,0	57,0	52,0
50,0	R _a	5,2	5,0	5,3
	R _t	53,5	63,0	63,0

TABELA 22 - VALORES DE RUGOSIDADE R_a e R_t MEDIDOS NA SUPERFÍCIE DA PEÇA PARA CORRENTE DE USINAGEM DE 10,0 A

ENSAIO DE RUGOSIDADE

CORRENTE DE USINAGEM = 20,0 A

PEÇA NÚMERO = 64

CUT-OFF = 0,8mm

VELOCIDADE DE MEDIÇÃO = 2 mm/s

DIÂMETRO DO ELETRODO (mm)	RUGOSIDADE (μm)	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3
5,0	R_a	NÃO FOI POSSÍVEL MEDIR		
	R_t	NÃO FOI POSSÍVEL MEDIR		
8,0	R_a	5,2	6,8	5,2
	R_t	40,0	39,0	35,0
12,5	R_a	5,7	6,5	6,3
	R_t	60,0	58,0	55,0
20,0	R_a	6,3	6,7	5,7
	R_t	75,0	70,0	62,0
31,5	R_a	6,2	6,3	6,5
	R_t	67,0	68,0	78,0
50,0	R_a	6,4	6,5	6,7
	R_t	82,0	82,0	75,0

TABELA 23 - VALORES DE RUGOSIDADE R_a e R_t MEDIDOS NA SUPERFÍCIE DA PEÇA PARA CORRENTE DE USINAGEM DE 20,0 A

ENSAIO DE RUGOSIDADE

DIÂMETRO DO ELETRODO = 20 mm

PEÇA NÚMERO = 63

CUT-OFF = 0,8mm

VELOCIDADE DE MEDIÇÃO = 2 mm/s

CORRENTE DE USINAGEM (A)	RUGOSIDADE (μm)	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2
2,5	R_a	2,3	2,3
	R_t	16,0	16,0
5,0	R_a	2,9	2,5
	R_t	21,0	21,0
10,0	R_a	2,8	4,2
	R_t	28,0	28,0
20,0	R_a	5,2	3,3
	R_t	32,0	33,0

TABELA 24 - VALORES DE RUGOSIDADE R_a e R_t MEDIDOS NA SUPERFÍCIE LATERAL DA PEÇA PARA UM DIÂMETRO DE 20mm DO ELETRODO

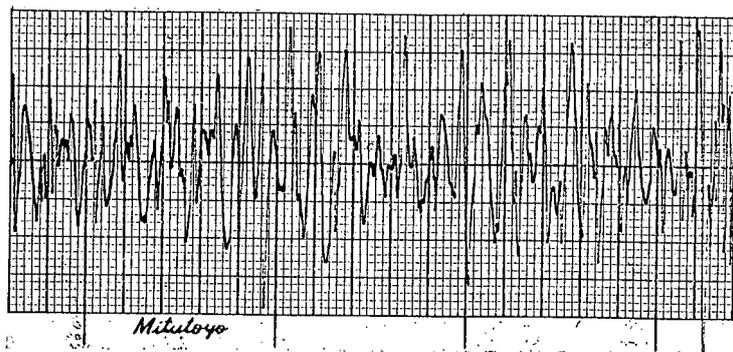
ANEXO B



Perfil efetivo de rugosidade
para $I = 2,5 \text{ A}$ e $d = 50,0 \text{ mm}$
(esc. $1 \mu\text{m}/\text{div.}$)



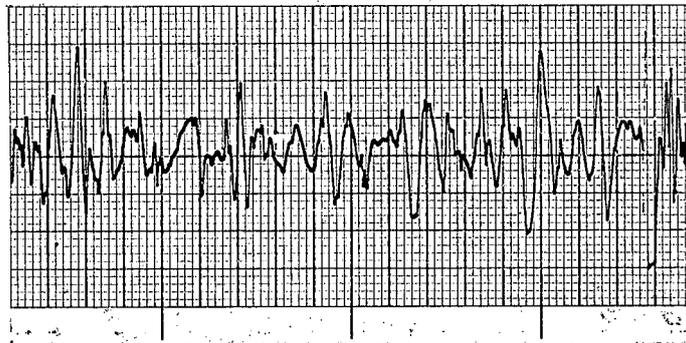
Perfil efetivo de rugosidade
para $I = 5,0 \text{ A}$ e $d = 50,0 \text{ mm}$
(esc. $1 \mu\text{m}/\text{div.}$)



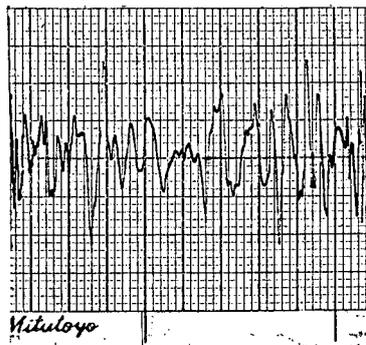
Perfil efetivo de rugosidade
para $I = 10,0 \text{ A}$ e $d = 50,0 \text{ mm}$
(esc. $1 \mu\text{m}/\text{div.}$)



Perfil efetivo de rugosidade
para $I = 20,0$ A e $d = 31,5$ mm
(esc. $2\mu\text{m}/\text{div.}$)



Perfil efetivo de rugosidade
para $I = 20,0$ A e $d = 20,0$ mm
(esc. $2\mu\text{m}/\text{div.}$)

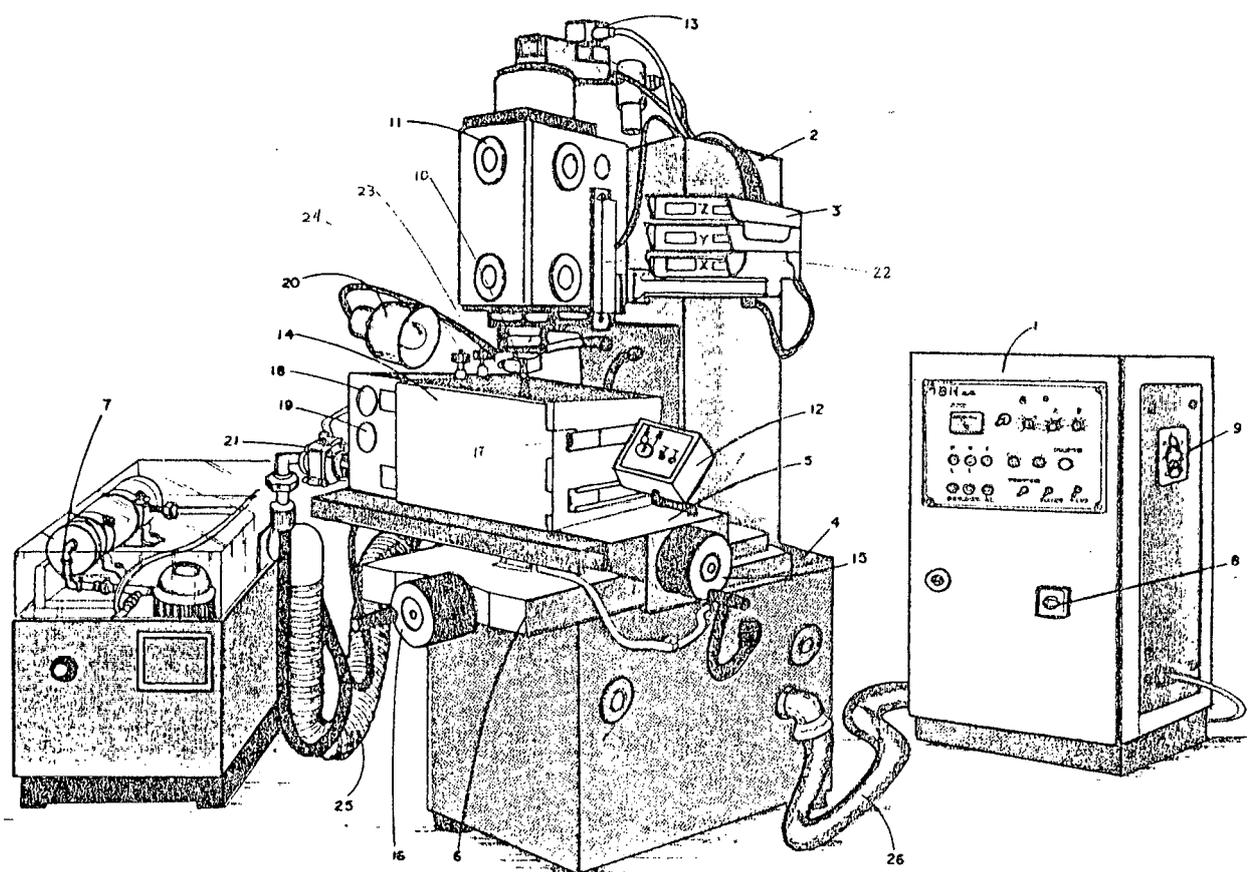


Perfil efetivo de rugosidade
para $I = 10,0$ A e $d = 20,0$ mm
(esc. $1\mu\text{m}/\text{div.}$)

ANEXO C

Máquina de eletroerosão por faíscas de penetração: De fabricação da I.B.H., INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. Usou-se este equipamento para realização dos ensaios de usinagem por descarga elétrica. Com circuito de descargas pulsadas, possui as seguintes especificações técnicas:

Deslocamento hidráulico vertical do cabeçote (mm)	150
Dimensão da mesa de coordenadas (mm)	500x380
Curso da mesa (mm)	420x300
Precisão da mesa de coordenadas (mm)	0,02
Precisão de posicionamento no controle digital para eixos X e Y (mm)	0,01
Precisão do limitador automático digital para eixo Z (mm)	0,01
Desgaste volumétrico com eletrodo de cobre (mm ³ /min)	0,2
Número de posições para regulagem dos impulsos	11
Número de posições para regulagem das pausas	11
Dimensões do tanque de usinagem (mm)	800x510x350
Capacidade do tanque dielétrico (l)	400
Capacidade de filtragem (micrometros)	3
Corrente nominal (A)	60
Retirada de material (mm ³ /min)	500
Potência (KW)	4,8



- 1-Gerador conjugado com painel de comando
- 2-Coluna
- 3-Sistema de leitura digital
- 4-Base
- 5-Mesa longitudinal
- 6-Mesa transversal
- 7-Reservatório do dielétrico e sistema de filtragem
- 8-Chave geral
- 9-Seletor de amperagem
- 10-Porta-eletrodo
- 11-Cabeçote
- 12-Chaves de comando acoplado na máquina
- 13-Servo-válvula

- 14-Tanque de usinagem
- 15-Volante da mesa longitudinal
- 16-Volante da mesa transversal
- 17-Sistema de fechamento do tanque de usinagem
- 18-Manômetro (injeção de dielétrico)
- 19-Vacuômetro (sucção de dielétrico)
- 20-Refletor para lâmpada
- 21-Registro de entrada do dielétrico (rápido)
- 22-Régua de leitura para o deslocamento do eixo Z (vertical)
- 23-Registro (regulagem de vácuo)
- 24-Registro (pressão do dielétrico)
- 25-Mangueira de saída do dielétrico
- 26-Eletroduto de ligação (conduz energia do gerador à máquina)

Máquina de eletroerosão por faíscas de penetração.

O equipamento possui os seguintes controles de painel:

1-Sistema de leitura digital X,Y,Z, sendo o eixo Z programável para desligar a máquina, quando atingir a medida que se quer usinar.

2-Amperímetro, que mede a corrente que circula entre o eletrodo e a peça.

3-Seletor de corrente (1,25; 2,5; 5,0; 10,0; 20,0; 30,0; 40,0; 50,0; 60,0 Ampères).

4-Seletor de corrente do micro-fino (0,5 a 3 Ampères).

5-Liga e desliga dielétrico.

6-Liga e desliga hidráulico.

7-Rearme da máquina (todas as vezes que for feita uma programação no eixo Z, a máquina desligará automaticamente e só poderá ser ligada novamente acionando o rearme).

8-Servo: ajusta a sensibilidade de erosão.

9-Pulsador: regula o tempo de limpeza.

10-Pulsador: regula o tempo de erosão.

11-Seletor do dielétrico: jatos contínuos

desligado

jatos intermitentes.

12-Regulador do tempo de impulso.

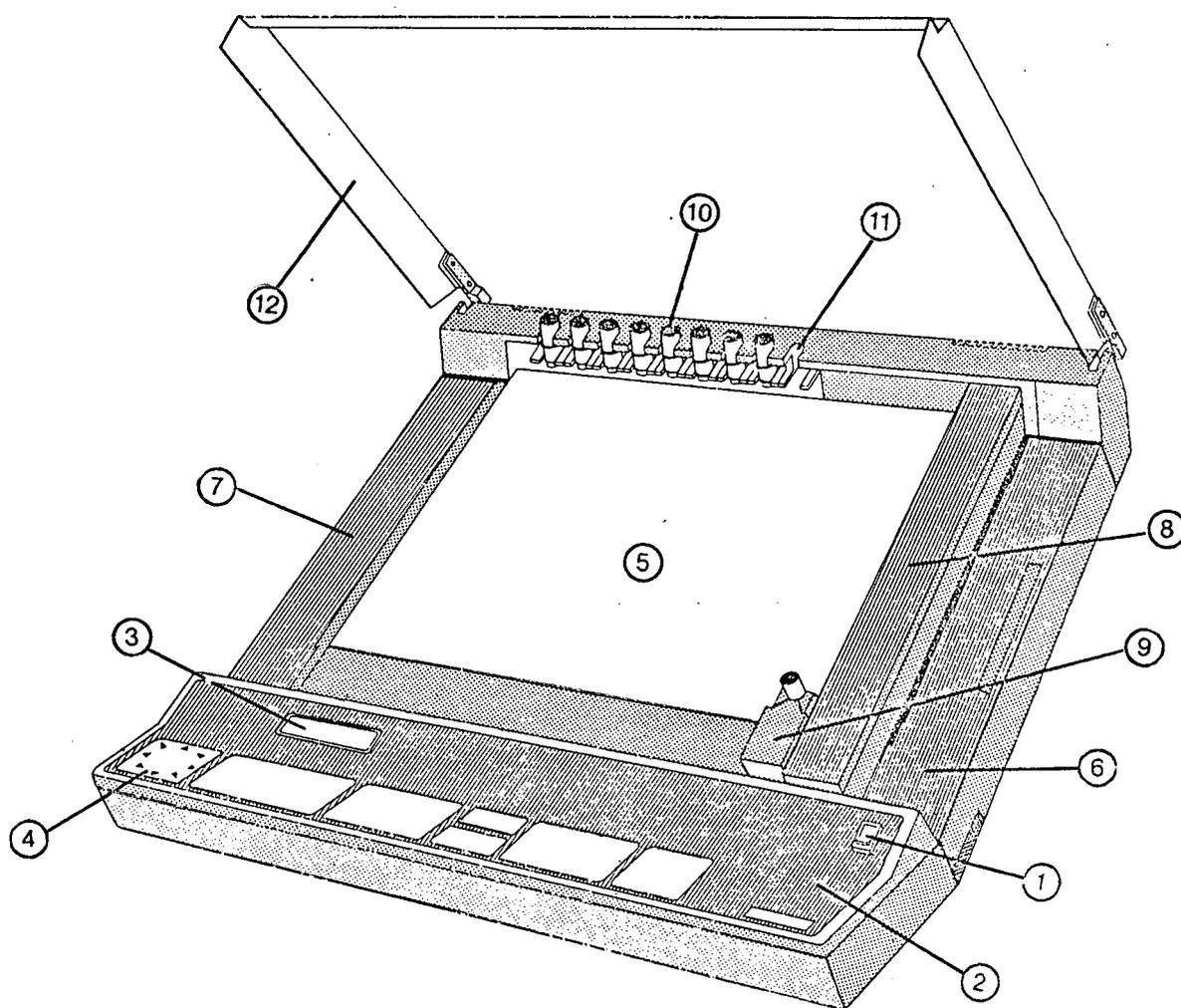
13-Regulador do tempo de pausa.

14-Selecionador de erosão ou centragem.

15-Chave de subida e descida rápida do cabeçote.

"Plotter" (Digital A3 Plotter modelo PM 8153./1.): Fabricado pela PHILIPS, INDUSTRIAL E ELECTRO-ACOUSTICAL EQUIPAMENT DIVISION, EINDHOVEN, THE NETHERLANDS, foi usado para transportar os gráficos da tela do osciloscópio com memória para o papel, possibilitando a obtenção dos valores dos tempos de pulso e pausa, bem como o registro dos mesmos.

O "PLOTTER" modelo PM 8153 é equipado com um sistema ótico que dá uma resolução de 0,025 mm e alta precisão, menor que 0,1 mm. A alta aceleração de 1,5 g e velocidade da caneta de 100 cm/s faz com que a tomada de dados seja rápida.



Digital A3 "PLOTTER" modelo PM 3305 (U).

- 1 - Chave liga/desliga
- 2 - Painel frontal
- 3 - "Display" alfanumérico
- 4 - Cursor gráfico
- 5 - Placa eletrostática
- 6 - Alimentação de papel
- 7 - Puxador de papel
- 8 - Braço do "plotter"
- 9 - Pegador de canetas
- 10- Depósito de canetas
- 11- Retículo digitalizado
- 12- Tampa protetora

Dados Técnicos:

Área máxima plotada	294 x 420 mm
Formato do papel	297 mm (máximo)
Transporte de papel	Construção "standard"; velocidade do papel programada de 0,1 cm/s; máximo 10 cm/s.
Fixação do papel	Eletrostática
Resolução	0,025 mm
Repetibilidade	Com uma caneta = 0,1 mm. De uma caneta para outra = 0,3 mm
Velocidade da caneta	Máxima = 100 cm/s Para programa = 5 a 100 cm/s, com incrementos de 1 cm/s.
Aceleração	Máxima = 1,5 g

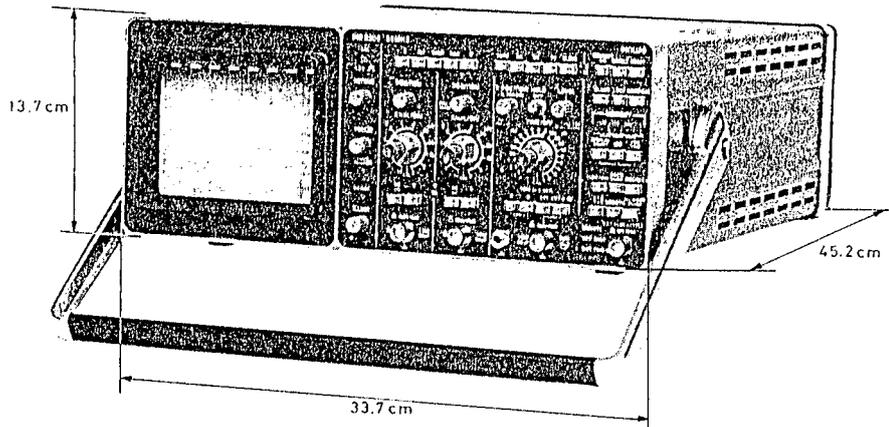
Para programa = 0,4 a 1,5 g, com incrementos de 0,1 g.

Força sobre a pena	0,1 a 0,4 N
Interfaces	IEEE 488
Entrada "buffer"	1536 bytes para cada tipo de interface
Linguagem gráficas	PM 8153 linguagem padrão, compatível com PM 8151 e PM 8154
"Display"	Duas linhas com 20 caracteres.
Dimensões	277 x 620 x 530 mm
Peso máximo	18,3 kg
Temperatura de trabalho	5° C a 40° C
Umidade relativa do ar	20% a 80% não condensado.

Osciloscópio com memória (35 MHZ Four Channel Digital Storage Oscilloscope model PM 3305 (U)): Fabricado pela PHILIPS INTERNATIONAL B.V., INDUSTRIAL E ELECTRO-ACOUSTICAL EQUIPAMENT DIVISION, EINDHOVEN, THE NETHERLANDS, é um instrumento compacto, projetado com características ergonômicas e extensa capacidade de medição.

Tela de 8 x 10 cm, com linhas internas formando grades, de fácil visualização e 10 Kv de aceleração potencial, dá alta intensidade aos traços com uma boa definição de sinal.

Foi utilizado para medição dos pulsos de tensão que ocorrem no processo de eletroerosão entre o eletrodo e a peça.

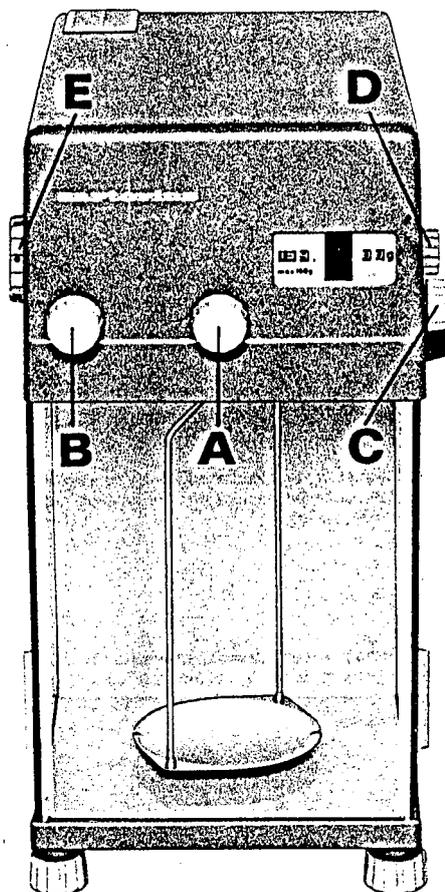


Osciloscópio com memória modelo PM 3305 (U).

Características técnicas:

- 2 mV/divisão, sensível a 35 MHz.
- Uma ampla variedade de modelos de "display", incluindo o "ADD facility".
- X/Y "display".
- "Display" brilhante.
- Excelente resolução, porque 4K x 8 bits de memória podem ser colocados em uma tela completa.
- Módulo comparativo.
- Mínimo/máximo módulo.
- 4 canais.
- Máximo 8 sinais na tela no módulo de comparação.
- 2 MHz AD, velocidade de conversão (máximo).
- IEEE-488, interface opcional
- Dimensões 137 x 337 x 452 mm
- Peso máximo 11 kg
- Temperatura de trabalho 5 ° C a 40 ° C
- Umidade do ar 95% RH
- Tempo de aquecimento 30 minutos a 23 ° C.

4.3.4. Balança de precisão sartorius modelo A 6801 : Fabricada pela "SARTORIUS - WERKE GmbH Gottinger, Alemanha", foi utilizada para medir as massas dos eletrodos (peça e ferramenta) antes e depois de cada ensaio. Esta balança trabalha à temperatura de 25° C e umidade relativa do ar de 60% a 5%.



Balança de precisão
Sartorius modelo A 6801.

- | | |
|----------------------------------|---|
| A - Botão seletor de massa | 1 a 9 g |
| B - Botão seletor de massa | 10 a 150 g |
| C - Botão micrométrico | Serve para dividir uma divisão de escala de 0,1 até 10 mg |

D - Botão para correção do ponto zero.....Para zeragem, a marca zero da escala deve coincidir com a marca de leitura.

E - Botão de bloqueio. Este botão possui três posições:

Posição 1 - A balança está bloqueada (esta posição serve para colocar e retirar as peças).

Posição 2 - Pré-pesagem (posição para determinar as massas que irão regular os botões de seleção de massas).

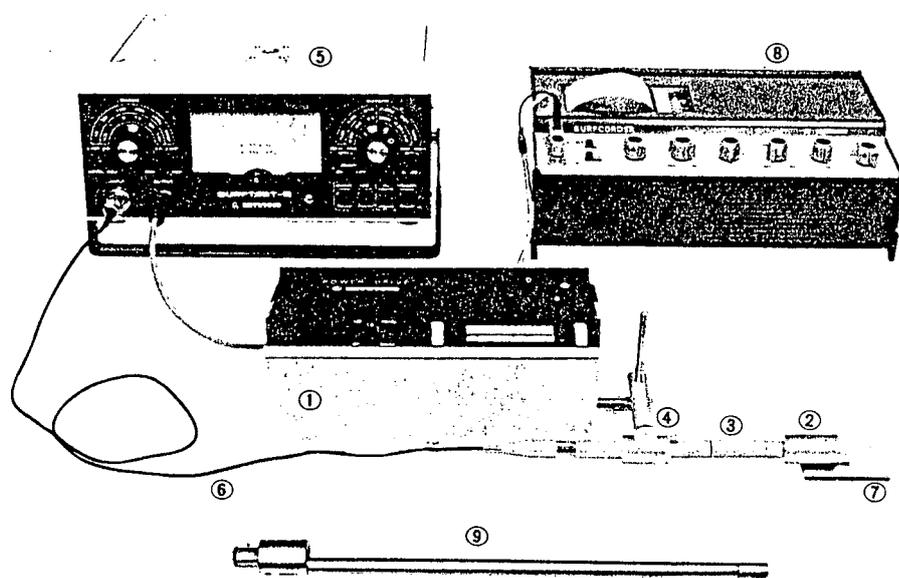
Posição 3 - Balança desbloqueada (posição para determinar a massa correta).

Dados técnicos:

Margem de pesagem	160 g
Margem do seletor de massas	1 a 159 g
Escala ótica até	1 g
Margem de pré-pesagem	160 g
Divisão de escala	10 mg
Leitura (micrômetro digital)	0,1 mg
Precisão (desvio padrão)	0,05 mg

Procedimento para pesagem: zerar a balança, colocar a peça no prato e pôr a balança na posição de pré-pesagem. O peso é indicado na escala em gramas. Ler o valor na marca de leitura da escala. Bloquear a balança e colocar o valor lido no seletor de massas. Desbloquear a balança. Após a escala parar de oscilar, ajusta-se com o botão micrométrico, fazendo coincidir a marca de leitura com a divisão de escala. Bloquear a balança e realizar a leitura.

Rugosímetro: O rugosímetro utilizado para verificação do acabamento superficial foi o SURFTEST III, de fabricação da MITUTOYO MFG.Co.,LTD. Tokyo, Japão.

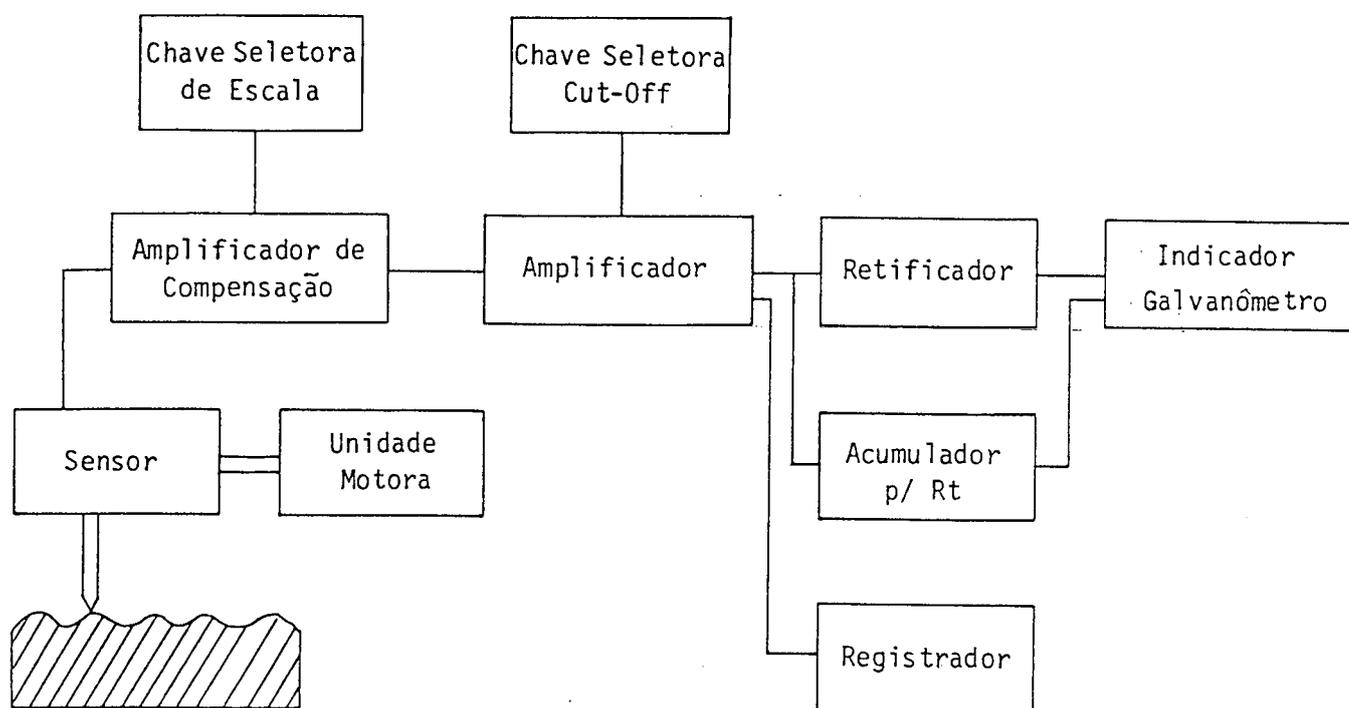


Rugosímetro SURFTEST III.

- 1 - Unidade motora
- 2 - Sensor "standard"
- 3 - Haste prolongadora
- 4 - Junta universal
- 5 - Unidade amplificadora/indicadora
- 6 - Cabo conector
- 7 - Padrão
- 8 - Registrador
- 9 - Sensor para medição em furos de pequeno diâmetro.

A figura 4.9 ilustra o princípio básico de medição do SURFTEST III. Uma unidade motora movimenta o sensor contendo a agulha ao longo do percurso de amostragem, a agulha move-se verticalmente enquan-

to desliza sobre as irregularidades e esse movimento é convertido num sinal elétrico de tensão alternada através do sensor.



Princípio básico de medição do rugosímetro.

No amplificador de compensação este sinal é ampliado e sua frequência é compensada.

A escala do mostrador será escolhida de acordo com a intensidade desse sinal através do botão seletor de escala.

O sinal compensado é então ampliado e comparado com o valor de "cut-off", passando em seguida ou por um retificador para valor de R_a , ou por um acumulador de tensão para R_t . Em ambos os casos a apresentação das leituras é através do galvanômetro do aparelho.

Após o sinal ser comparado com o valor de "cut-off" e amplificado, temos uma saída para acoplamento do registrador, para se tirar gráficos do perfil efetivo.

Especificações técnicas:

-Sensor:

Princípio - Impulsos causados por movimentação magnética

Agulha - Material: diamante

- Forma: cônica em ângulo de 90°

- Raio da ponta: $12,5 \mu\text{m}$

- Esforço sobre a peça: menor que $1,5\text{gf}$ ($14,7\text{N}$)

Patim - Raio de 30 mm na direção do movimento

Alcance longitudinal - de 5 a 25 mm e de 25 a 150 mm

Dimensões - $22 \times 60 \text{ mm}$

Peso - 100 g

-Unidade motora:

Sistema de acionamento: movimento retilíneo alternado

Velocidade de deslocamento: 2 e 6 mm/s

Curso de deslocamento: de 2 a 50 mm

Dimensões: $97 \times 240 \times 120 \text{ mm}$

Peso: 4 kg

-Amplificador:

Sistema de leitura: R_a e R_t

Sistema de indicação: R_a (contínuo)

R_t (retenção de valor)

Valores de "CUT-OFF": $2 \text{ mm/s} = 0,8 - 0,25 - 0,08 \text{ mm}$

$6 \text{ mm/s} = 2,5 - 0,8 - 0,25 \text{ mm}$

0,8

Precisão do medidor: $2,5\%$ da capacidade da escala

Temperatura ambiente : 5° C até 40° C

Nível de ruído : 17% para $0,3 \mu\text{m}$

Potência consumida : 2 watts

Dimensões : $300 \times 300 \times 130 \text{ mm}$

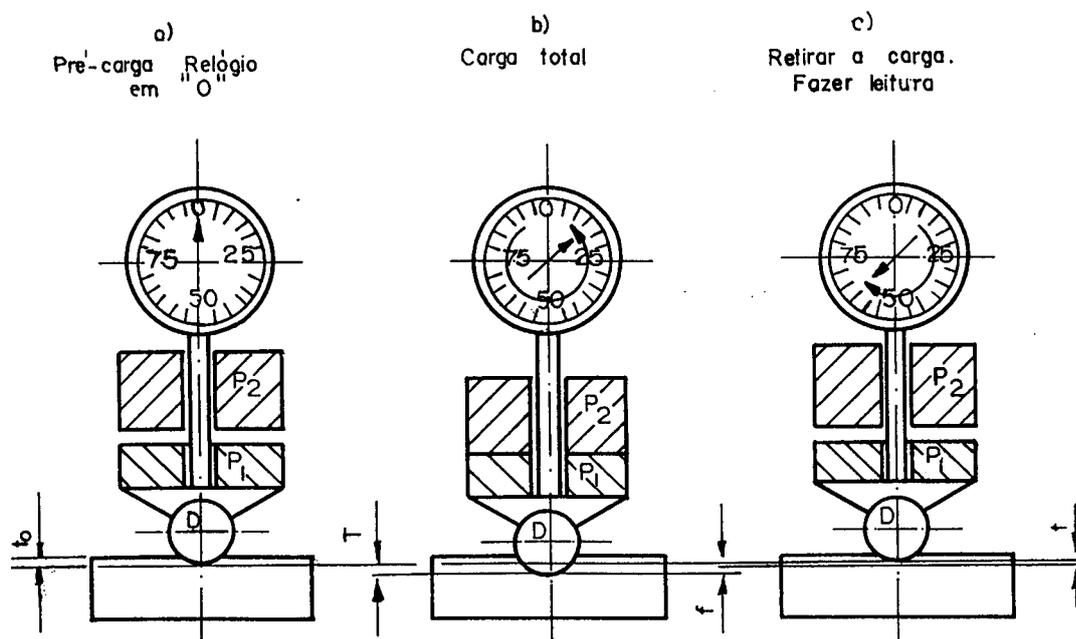
Peso : 5 kg

Durômetro: é o equipamento onde foi feita a medição da dureza das peças. Fabricado pela "OTTO WOLPERT - WERKE GmbH. Ludwigs-hafen am Rhein, Alemanha", pode medir dureza Brinell, Rockwell ou Vickers. Para medição da dureza Rockwell seguem-se as seguintes etapas:

a) Submete-se a peça a uma pré-carga P_1 e acerta-se o medidor em "0".

b) Aplica-se a carga que somada à pré-carga resultam a carga nominal de ensaio ($P_1 + P_2$), até o ponteiro do indicador ficar parado.

c) Retira-se a carga suplementar e faz-se a leitura.



Etapas para medição da dureza Rockwell.

Especificações técnicas:

Pré-carga.....	10 kg
Cargas de ensaio.....	15,6 - 31,2 - 60,0 - 62,5 - 100 125 - 150 - 187,5 - 200 kg
Altura de trabalho (cava).....	150 mm

Dimensões..... 350 x 480 x 700 mm

Acessórios: Cone de diamante 120 , Porta-esferas (1/16"; 1/8"; 2,5 mm; 5,0 mm), Padrão HRC, Mesa plana e Mesa com prisma em V para peças de 3 a 10 mm de diâmetro.

Multímetro analógico: Este instrumento foi utilizado para calibrar a corrente de trabalho da máquina de eletroerosão. Possui bobina móvel e ímã permanente com retificador, medindo corrente contínua e alternada com uma classe de precisão de 1,5%. Fabricado pela H.B. do Brasil, o multímetro analógico Elavi 5n, trabalha na posição horizontal, tendo tensão de prova de 3KV. Possui ainda SHUNTS internos com saída que possibilitam a medição de faixas diferentes de corrente.

Escalas do multímetro analógico:

Corrente (CC e CA) = 3 - 10 - 30 - 100 - 300 mA

1 - 3 - 10 - 30 - 100 A

Tensão (CC e CA) = 0,1 - 0,3 - 1 - 3 - 30 - 100 - 300 - 1000 V

Resistência (Ohm) = $\Omega \times 1$

= $\Omega \times 10$