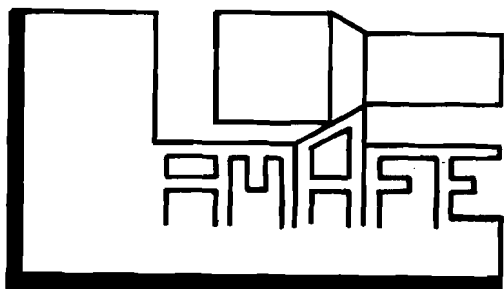


UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

PROCESSOS NÃO CONVENCIONAIS
DE USINAGEM

Arthur José Vieira Porto

SÃO CARLOS - ~~_____~~
~~_____~~
~~_____~~



LABORATÓRIO DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS

I N D I C E

1. PRINCIPIOS FUNDAMENTAIS DOS PRINCIPAIS PROCESSOS NÃO CONVENCIONAIS DE USINAGEM.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Critérios Comparativos Limitantes dos Processos.....	8
2. USINAGEM POR DESCARGA ELÉTRICA (U.D.E.) ELETROEROSÃO.....	22
2.1 Generalidades da U.D.E.	22
2.2 Princípios de Funcionamento.....	23
2.3 Parâmetros do Processo.....	26
2.4 Ferramentas - Eletrodos.....	32
2.5 Tipos de Circuitos Usados.....	42
2.6 Máquinas de U.D.E.	44
2.7 Aplicações Práticas - Tolerancias - Acabamento.....	46
2.8 Outros Tipos de U.D.E.	47
3. USINAGEM E SOLDA POR FEIXE DE ELETRONS.....	49
3.1 Generalidades.....	49
3.2 Mecanismo de Penetração do Metal.....	49
3.3 Fundamentos Básicos.....	59
3.4 Usinagem.....	60
3.5 Emissão de Raio X	61
4. LASER	67
4.1 Princípios Físicos	67
4.2 Aplicações Práticas do Laser	70
5. USINAGEM POR ARCO PLASMÁTICO.....	73
5.1 Generalidades.....	73
5.2 Princípios do Processo.....	74
6. JATO ABRASIVO.....	77
6.1 Generalidades.....	77
6.2 Princípios de Operação.....	77
6.3 Parâmetros do Processo.....	78
6.4 Abrasivos.....	78
6.5 Gás.....	79
6.6 Bico.....	79
6.7 Aplicações.....	81
7. BIBLIOGRAFIA.....	82



1. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DOS PRINCIPAIS PROCESSOS NÃO CONVENCIONAIS DE USINAGEM

1.1 - GENERALIDADES

Os processos não convencionais de usinagem podem ser classificados, para fácil compreensão, de acordo com o tipo de energia de usinagem fundamental que eles empregam:

- Mecânica
- Eletroquímica
- Química
- Termo elétrica.

Estas formas de energia estão correlatadas na figura 1.1, pelo método de remoção do material, meio de remoção, fonte de energia e finalmente com o processo de remoção de material específico.

Deve ser notado brevemente que enquanto eles servem para um determinado fim, a classificação dos processos em mecânico, eletroquímico, etc..., é arbitrário e bastante simplificado.

Tal classificação não demonstra o fato que não existe processos de remoção de materiais que use apenas uma forma de energia. Por exemplo: Energia química é extremamente importante no fresamento ou torneamento de aço ou alumínio, isto é facilmente demonstrado executando-se esta operação em meio de nitrogênio.

Neste meio, os cavacos não vão oxidar imediatamente durante o trabalho, mas vão tender a se prender à ferramenta apresentando as forças de corte, devido a necessidade de cisalhar estas soldas para dar espaço ao cavaco que está se formando. Enquanto a energia mecânica é a energia primária da operação de fresamento (ou torneamento), a energia química possui um importante papel complementar.

Igualmente, isto pode ser mostrado que a energia mecânica possui um suplementar, mas importante papel em outros processos não convencionais de usinagem. Por exemplo: A circulação do eletrólito na usinagem eletroquímica é mecânica, e é importante na remoção de produtos retirados do sobre-corte.



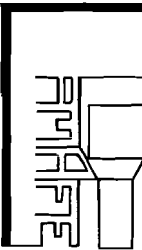
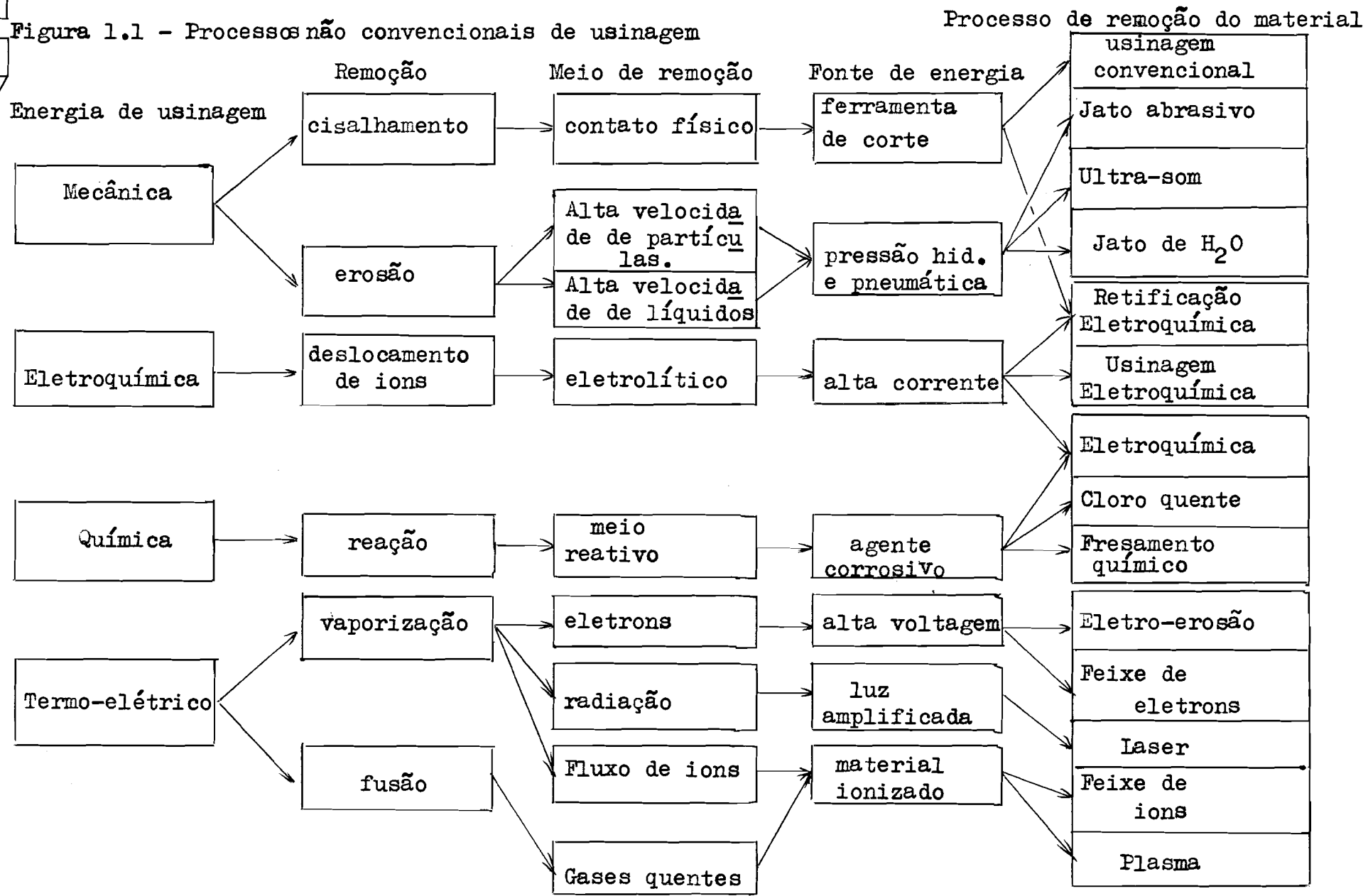


Figura 1.1 - Processos não convencionais de usinagem



1.1.1 - Energia mecânica.

Existem 2 tipos de processos que usam energia mecânica: aqueles em que o material é removido principalmente por cisalhamento, e aqueles nos quais a erosão é o mecanismo principal. Cisalhamento é usinagem simples por contacto físico com ferramenta metálica cortante e compreende todos os processos convencionais de usinagem. No entanto, quando o material é removido por erosão, ele é removido por 3 novos processos não convencionais definidos como: jato abrasivo, ultrasônico e jato de água.

A usinagem por ultrasom está sendo utilizada em produção há aproximadamente 27 anos, e representa a forma já estável para produzir furos e cavidades pequenas e de alta precisão. O corte é acompanhado da oscilação da ferramenta aproximadamente 20000 ciclos/seg. e lama abrasiva, (pasta fluida). A usinagem por jato abrasivo é de origem mais recente; está sendo utilizada na produção para cortar materiais finos e duros que lascam com facilidade. Este processo é baseado na aceleração de partículas abrasivas finas em jatos de gases em alta velocidade através de pequenos bocais. A usinagem por jato de água, o qual ainda está em estágio de laboratório, utiliza jatos de líquidos de alta velocidade, guiados através de pequenos orifícios.

1.1.2 - Energia eletroquímica.

O grupo que utiliza energia eletroquímica representa um processo de usinagem não convencional muito importante e relativamente novo, chamado "Usinagem Eletro Química (UEQ)".

Este processo é baseado no princípio inverso da eletrólise. O material é removido através de escoamento a alta velocidade do eletrólito entre uma ferramenta catódica e uma peça anódica.

Este processo tem sido utilizado em produções especializadas há aproximadamente 6 anos, mas sua indicação é para maior potencial de aplicação que outro qualquer processo de usinagem não convencional.

É talvez o único processo novo que competirá substancialmente com usinagem convencional na pro



dução de uma grande variedade de formas e materiais. A retificação eletroquímica é simplesmente uma modificação da UEQ na qual o disco rotativo é usado em conjunto com a ação eletro-química. O disco rotativo é abrasivo e mecanicamente mantém um sobre-corte entre a roda e a peça.

1.1.3 - Energia química.

A terceira classificação é o grupo que utiliza energia química e inclui a usinagem química, químico elétrico e o processo de cloro quente. Estes tres processos são baseados quase totalmente na ação química. O processo de usinagem química é o mais importante deste grupo. Tem sido utilizado em produção aproximadamente há 25 anos e compete com o fresamento tradicional para rebaixos em grandes superfícies de chapas. Em adição produz muito adequadamente partes de metal complexos e finos que tem sido geralmente produzido no passado por estampagem e repuxo. A usinagem química é baseada no princípio ^{de} que a maioria dos metais são vulneráveis ao ataque, isto é, erosão por um ou mais produtos químicos; no entanto, a usinagem química é mais adaptada à usinagem de ligas leves, tais como Al e Mg. O processo químico elétrico é essencialmente um processo químico assistido eletricamente, utilizando para remoção de metais de ligas que são difíceis de usinar aplicando apenas ácidos.

A corrente elétrica relativamente pequena introduzida através de um ácido entre a ferramenta e a peça produz geralmente a ativação necessária para uma remoção adequada de metal. O processo de cloro quente está ainda em estágio de laboratório.

1.1.4 - Energia termo-elétrica.

A última classificação é o grupo de energia termo-elétrica. Representa um grupo muito importante de processos de usinagem baseado na remoção de material da peça de trabalho pela vaporização e fusão.

A usinagem por descargas elétricas é um processo já bem estabelecido para produção de furos e cavidades nos materiais com alta precisão, e está sendo utilizada em produ



ção há aproximadamente 25 anos. É o único processo já estabelecido neste grupo. A remoção do metal é feita através de vaporização da peça por faíscas elétricas de alta frequência.

O princípio de usinagem por feixe de elétrons é a transformação de energia cinética de elétrons em alta velocidade em energia térmica quando se chocam com a peça. Usinagem por laser é similarmente baseada na transformação da energia luminosa em energia térmica.

Usinagem por plasma e usinagem por feixe de ions utiliza um plasma ionizado para o transporte de energia. Os processos de feixe de elétrons, laser e arco de plasma estão sendo utilizados cada vez mais em confecção de furos, operações de corte para produzir cortes de baixa precisão. Estas tres formas de energia são também utilizadas para soldas de metais e ligas.

No entanto, menos energia é utilizada na solda do que na usinagem, pois na solda os metais são aquecidos apenas até o ponto de fusão e não ao de vaporização.

O processo de feixe de ions ainda continua sob investigação nos laboratórios.

1.1.5 - Parâmetros físicos dos processos.

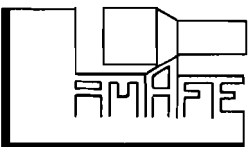
Os parâmetros físicos mais importantes selecionados para discussão são: Potencial, corrente, potência, GAP e meio de remoção, (tabela 1.1).

É evidente que a usinagem por feixe de elétrons e a usinagem eletro-química são processos de alta voltagem e baixa corrente e baixa voltagem e alta corrente respectivamente com os seis processos faltantes situados entre estes dois processos extremos. O processo de usinagem por feixe de elétrons de alta voltagem recebe sua energia de operação de elétrons em alta velocidade incidindo sobre a peça, enquanto que o processo de usinagem eletro-química remove blocos de partículas ionizadas com corrente relativamente alta. Por causa da grande diferença do tamanho dos ions e elétrons será demonstrado mais tarde que as razões de remoção relativa entre os dois processos são maiores que 10.000 : 1 em favor da usinagem eletro-química.



A tabela 1.1 também evidencia que muito maior potência é requerida pelo processo de usinagem eletro-química que outros: 2 vezes maior que o logo abaixo que é com plasma. Nas secções subseqüentes será demonstrado que estes dois processos possuem uma razão de remoção de material muito mais alta que os outros e também o plasma tem a maior razão de remoção com menos potência requerida por causa de sua maior eficiência.

Como ilustrado na tabela 1.1, os processos de usinagem por eletro-erosão, ultra-som e eletro-química, tem uma operação de contacto muito próximo com sobre-cortes da ordem de poucos centésimos de milímetros. Este fato possibilita a estes processos produzir elementos com tolerâncias bastante apertadas, particularmente a usinagem por ultra-som e eletro-erosão, como será discutido em secção subseqüente; no entanto, a operação com pequeno sobre-corte introduz problemas elétricos. O sobre-corte nos processos de jato abrasivo e plasma são intermediários em relação ao feixe de elétrons e laser, os quais podem ser classificados como tendo grandes sobre-cortes.



Parâmetros físicos dos processos

Parâmetros Típicos	Ultra-som	Jato Abrasivo	Eletro Químico	Química	Descarga Elétrica	Feixe de Electrons	Laser	Plasma
	U U S	U J A	U E Q	U Q	U D B	U F E	U L	U A P
Potencial (V)	220	110	10	-	45	150.000	4.500	100
Corrente (A)	12AC	1:5	10.000 DC	-	60 HZ/DC	001	-	500 DC
Potência (W)	2.400	250	100.000	-	2.700	150 médios 2000 pico	2 média 2000 pi co	50.000
G A P (IN)	.010	.030	.008	-	.001	4	6	.300
Meio	Abrasivo em H ₂ O	Abrasivo em gás	Eletrolito líquido	Líquido Químico	Líquido dielétrico co.	Vácuo	Ar	Argônio em Hidrogênio



1.2 - CRITÉRIOS COMPARATIVOS LIMITANTES DOS PROCESSOS

1.2.1 - Generalidades

Para podermos determinar qual o processo mais eficiente para a usinagem de uma peça, existem diversos critérios os quais dividimos em tres grupos.

- a) Critérios relativos à peça a usinar
- b) Critérios relativos aos efeitos da usinagem
- c) Critério econômico

1.2.2 - Critérios relativos à peça a usinar.

1.2.2.1 - Possibilidade de forma.

A capacidade de cada um dos processos não convencionais de usinagem com relação às formas a serem usinadas são mostrados na tabela 1.2.

Cada processo tem sua área de especialização entre as principais formas que podem ser produzidas por estes processos: furos, cavidades passantes, cavidades rasas, geração de superfícies, cortes passantes e aplicações especiais.

Interpretação da tabela 1.2:

a) Furos:- É obvio que os processos por feixe de elétrons e laser se projetam na aplicação que envolve a produção de pequenos furos de precisão definidos como menores que 0,125 milímetros de diâmetro. Os melhores processos para produção de furos maiores, principalmente os mais profundos são: a usinagem eletro-química e eletro-erosão. Estes processos podem produzir furos até uma razão $\frac{L}{D} = 20$, mantendo praticamente nenhum desvio nem curvatura no furo. Quando extremas precisões são requeridas por cilindricidade, acabamento de superfície ou conicidade, processos convencionais de usinagem tais como: mandrilamento e honeamento podem ser usados em combinação com estes novos processos elétricos.

b) Cavidades passantes:- Cavidades passantes podem ser produzidas por ultra-som, usinagem eletro-química e eletro-erosão. Quanto ao corte de materiais difíceis tais como superligas, cavidades de pequenos raios de canto ou cavidades profundas o processo eletro-químico é muito superior ao fre



Tabela 1.2 Aplicações quanto à forma dos processos não convencionais

Processos de Usinagem	F u r o s		Cavidades passantes	Cavidades rasas		Geração de superfície		Cortes passantes		Aplicações especiais			
	Profundidade dos furos			Raso fundos.	Superfície de revol.	Raso	Profun-	Reti-	Ho-	Rebar-	Ros-		
	Pequenos de Precisão											do.	fica-
	D < 0,001"	$\frac{L}{D} < 20$	Pre-	Raso	Duplo	Pro-	Pro-	Reti-	Ho-	Rebar-	Ros-		
	D > 0,001"	$\frac{L}{D} > 20$	ci-		con-	fun-	fun-	fica-	ning.	bagem	ca-		
			são.		torno	dos.	do.	ção.			men-		
Ultra-som	-	A	A	C	C	C	C	C	B	A	-		
Jato abrasivo	-	B	C	-	-	-	-	A	-	A	-		
Eletroquímico	-	A	B	A	A	A	A	B	A	A	C		
Fresamento Químico	B	-	C	A	-	C	-	-	-	C	-		
Eletro-erosão.	-	A	A	A	B	A	-	A	-	C	C		
Feixe de eletrons	B	B	C	-	-	-	A	-	-	-	-		
Laser	A	B	C	-	-	-	A	-	-	-	-		
Arco de plasma.	-	B	C	-	-	-	A	-	-	-	C		

A - Bom

B - Razoável

C - Ruim

samento de acabamento convencional por causa dos problemas de de flexão e quebras de ferramentas associadas ao fresamento de acaba mento. Geralmente, eletro-erosão e ultra-som são os melhores pa ra as pequenas cavidades mais precisas, enquanto que a usinagem e letro-química é a melhor para as cavidades grandes e cavidades ra sas.

c) Cavidades rasas:- Cavidades rasas são semelhantes às cavidades passantes excetuando que os fundos são geralmente pla nos. Usinagem eletro-química, química e por eletro-erosão são os principais processos para a produção de cavidades rasas, e eles são superiores aos processos convencionais de usinagem de cavida des profundas, pequenos raios de canto ou em material de difícil usinagem. A usinagem química é muito apropriada para grandes á reas de superfícies e cavidades rasas de pequena precisão.

d) Geração de superfícies e cortes passantes:- A usinagem eletro-química é o processo de maior produção usado para realizar superfícies duplas de contornos satisfatoriamente. Ultra-som, eletro-erosão e plasma podem produzir estas formas num campo limi tado, mas geralmente não podem competir com a usinagem convencion al por causa de seu fluxo baixo de remoção de cavaco. Cortes passantes podem ser feitos pelos processos eletro-químico, feixe de eletrons, laser e plasma, no entanto, usinagem eletro-química e plasma são melhores do que os outros devido seus grandes pode res de remoção de cavaco.

e) Aplicações especiais:- Aplicações especiais são indica das na tabela 1.2 particularmente para retificação, honeamento, re barbagem e roscamento.

1.2.2.2 - Possibilidades de aplicações nos ma teriais.

Os processos não convencionais de usinagem têm relativamente boa aplicação para todos metais e ligas. Este é um contraste para os processos de usinagem convencional os quais va riam em suas aplicações porque suas capacidades de usinar certas

classes de ligas, isto é, as super-ligas são muito bai xas.



Como mostrado na tabela 1.3, todos metais e ligas são altamente usináveis por todos os processos, com exceção do alumínio e as super-ligas por meio do ultra-som, e metais refratários e ligas por meio da usinagem química, laser e plasma. Em adição conclui-se que ultra-som, jato abrasivo, feixe de elétrons e laser são processos muito aplicados para usinagem de não metálicos.

1.2.3 - Critérios relativos aos efeitos da usinagem.

São os efeitos que a usinagem causam na peça usinada, na ferramenta, na máquina e nos acessórios.

1.2.3.1 - Efeitos sobre as peças usinadas.

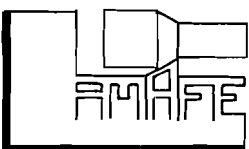
Os efeitos que os processos não convencionais' de usinagem têm sobre a superfície da peça usinada são os principais critérios para a determinação das limitações dos processos.

a) Razão de remoção:- Como podemos ver na tabela 1.4, somente os processos de UEQ e UAP podem ser comparados com a usinagem convencional em função da razão de remoção de cavaco. Este parâmetro será dimensionado como polegada cúbica de metal removido por hora.

A UAP está indicada na tabela 1.4 como sendo um processo mais rápido do que o fresamento convencional (foi utilizado como processo de usinagem convencional o fresamento, porém, outros processos convencionais têm valores equivalentes), porém, como foi ilustrado na tabela 1.2, item 1.2.2.1, este processo está severamente limitado a algumas aplicações de forma.

A UEQ tem a razão de remoção de aproximadamente um quarto do fresamento convencional, porém, como vimos tem uma aplicação bastante boa para quase todas as formas. Esta é a primeira razão pela qual a UEQ é considerada como tendo o maior potencial de crescimento de todos os processos não convencionais de usinagem.

Os outros parâmetros da tabela 1.2 esclarecem mais a futura posição que a UEQ ocupará na produção por usinagem, (verifique também as figuras



1.5, 1.6 e 1.7).

A tabela 1.4 demonstra também que a UUS e a UDE tem uma razão significativa de remoção quando na produção de peças complexas e de precisão elevada, porém, são limitadas para produções seriadas, (ver figuras 1.5, 1.6 e 1.7).

A UFE e a UL tem uma razão de remoção tão baixa que podem ser utilizadas tão somente para aplicação especial onde não existir outro processo possível.

Para podermos comparar a eficiência da remoção do cavaco nos vários processos, esboçamos em um gráfico cartesiano, razão de remoção do cavaco (mm^3/min) e potência de entrada, (figura 1.2).

Um indicador bastante significativo da grande diferença de aplicabilidade entre os processos, é que enquanto a potência de entrada varia até 10^4 , a razão de remoção varia de até 10^6 .

Neste gráfico, determinamos a eficiência média dos processos e consideramos, comparativamente, que todos os processos à direita da linha média são processos de grande eficiência (tanto maior quanto mais longe da linha média) e à esquerda os processos de baixa eficiência.

Como exemplo podemos ver que o processo UEQ, um processo de alta razão de remoção e alta potência é relativamente ineficiente, pois o aquecimento do eletrólito exige o resfriamento do mesmo, o que eleva sensivelmente o consumo de energia, fazendo deste fato a principal limitação do processo.

O fresamento convencional, neste gráfico, mostra-se altamente eficiente em termos de potência, porém, este custo é pouco significativo frente a outros custos do processo, como ferramental, etc.

b) Controle dimensional:- O critério do controle dimensional mostra na tabela 1.4, que os processos de UEQ, UQ, UFE e UL podem produzir peças com tolerâncias comparáveis ao fresamento convencional.



Os processos de UUS e UDE, por exemplo, podem assegurar tolerâncias mais apertadas (0003

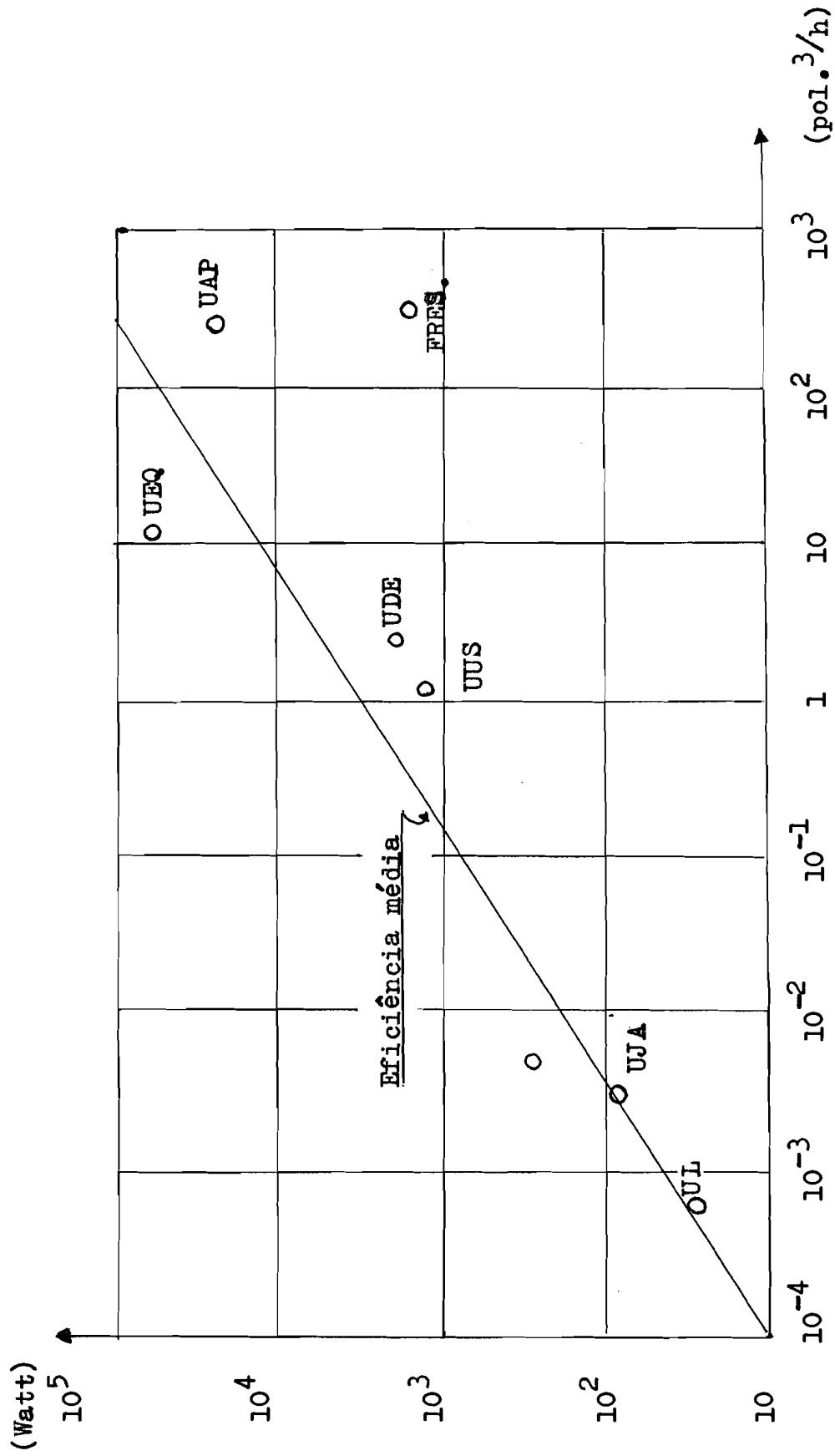


Figura 1.2 - Eficiência



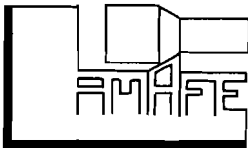


Tabela 1.3 - Aplicações Materiais

A=Boa aplicação.
 B=Razoável
 C=Ruim
 D=Inaplicável.

Materiais	UUS	UJA	UEQ	UQ	UDE	UFE	UL	UAP
METAIS e LIGAS								
Alumínio	C	B	B	A	B	B	B	A
Aço	B	B	A	A	A	B	B	A
Super ligas	C	A	A	B	A	B	B	A
Titânio	B	B	B	B	A	B	B	B
Refratários	A	A	B	C	A	A	C	C
NÃO METAIS								
Cerâmica	A	A	D	C	D	A	A	D
Plástico	B	B	D	C	D	B	B	C
Vidro	A	A	D	B	D	B	B	D

UUS= Usinagem por Ultra-som
 UJA=Usinagem por jato abrasivo

UEQ=Usinagem eletroquímica.

UQ= Usinagem química.

UDE=Usinagem p/descargas elétricas.

UFE=Usinagem por feixe de eletrons.

UL= Usinagem por Laser.

UAP=Usinagem por arco de plasma.

pol. e 0006 pol. respectivamente).

Pelo fato de não podermos controlar o processo de UAP em tolerâncias apertadas, este processo é restrito a simples corte de desbaste.

c) Raios de canto:- O raio de canto é um parâmetro muito importante na usinagem de cavidades passantes, tais como usinagem de padrões para metrologia, cujos raios de canto são geralmente muito pequenos e devem ser mantidos em dimensões apertadas.

Nestes tipos de peças encontramos a melhor aplicação para os processos de UUS, UEQ e UDE, pois estes quando trabalhando sob controle podem manter raios de canto até a proximadamente de 25 micra. Os outros são inadequados para estas finalidades.

d) Conicidade:- A UEQ pode ser controlada para manter a conicidade dentro de limites bastante favoráveis pois este proceso não tem desgaste da ferramenta e podemos com isto controlar um maior número de variáveis. Todos os outros processos na Tabela - 1.4, com exceção da UDE e da UL podem garantir os limites da conicidade dentro de valores razoáveis.

e) Acabamento superficial:- Com exceção da UAP, todos os processos da tabela 1.2 podem assegurar o acabamento dentro de limites aceitáveis.

Com a UUS podemos conseguir acabamento superficial de 10 a 20 microinches rms., e por outro lado se no processo de UDE não tomarmos a devida precaução, tais como controle de velocidades, etc., poderemos obter superfícies com rugosidade até de 500 microinches rms.

f) Possíveis danos superficiais:- Danos superficiais não é um problema particular no uso dos processos não convencionais de usinagem exceto para os quatro processos termo-elétricos (UDE, UFE, UL e UAP) nos quais a superfície usinada está sujeita a um intenso calor gerado no processo. Em particular interesse estão os possíveis danos causados durante os processos de UDE e UAP, com profundidade da ordem de 0,005 e 0,020 pol. respectivamente.

Se não são tomadas as devidas precauções, estes danos deverão ser retirados a posteriori



ri por outro processo que poderá ser um convencional.

A extensão dos danos ocorridos nos processos de UEQ e UQ pode, a princípio, ser reduzida pelo próprio processo de usinagem.

1.2.3.2 - Efeitos sobre equipamentos e ferramentas.

Outros critérios para a determinação das limitações relativas dos processos não tradicionais de usinagem é o efeito que o processo tem sobre o equipamento e ferramenta empregados.

A tabela 1.5 ilustra para comparação, os efeitos típicos que cada processo tem sobre:

- desgaste da ferramenta.
- meio de usinagem.
 - a) contaminação.
 - b) aquecimento.
- máquina e equipamento.
 - a) manutenção
 - b) proteção.
- segurança.
- toxicidade.

a) Desgaste da ferramenta:- A principal limitação dos processos de UUS e UDE é a alta razão de desgaste das ferramentas, - (10 e 6,6 polegadas cúbicas por hora, respectivamente).

As razões de desgaste demonstradas na tabela 2.3 são razões de desgaste típicas para usinagem de ligas metálicas, e como o processo de UUS está sendo utilizado em 99% dos casos para a usinagem de ligas não metálicas este parâmetro para a UUS não é muito significativo. Estas altas taxas de desgaste das ferramentas limitam estes dois processos por três principais razões:

- a) Elevado custo de produção de ferramentas de precisão
- b) O tempo requerido para a troca das ferramentas.
- c) Imprecisões resultantes do desalinhamento na troca e desgaste da ferramenta.



	UUS	UJA	UEQ	UQ	UDE	UFE	UL	UAP	FRES.
Razão de remoção (pol.3/h)	1,2	0,003	60	0,06*	3	0,006	0,0004	300	250
Controle dimensional (pol.)	0,0003	0,002	0,002	0,002	0,0006	0,001	0,001	0,050	0,002
Raio de canto (pol.)	0,001	0,004	0,001	0,050	0,001	0,010	0,010	-	0,002
Conicidade (pol./pol.)	0,005	0,005	0,001	-	0,010	0,050	0,050	0,010	-
Acabamento superficial (microinch rms)	10-20	20-50	5-100	20-100	10-500	20-100	20-50	Rugoso	20-200
Profundidade do possível dano (pol.)	0,001	0,0001	0,0002	0,0002	0,005	0,010	0,005	0,020	0,001

Tabela 1.4 - Efeitos nas partes usinadas.

*) Razão de remoção pol./hora, pois independe da área da superfície.

	UUS	UJA	UEQ	UQ	UDE	UFE	UL	UAP
Razão de desgaste.	10	-	0	-	6.6	-	-	-
Meio: Contaminação	B	B	C	C	B	B	A	A
Aquecimento	A	A	C	B	B	A	A	A
Máq./Equipamento: Manutenção	B	B	B	B	B	B	C	B
Proteção	A	B	C	C	B	B	B	A
Segurança	A	B	B	B	B	B	B	A
Toxicidade	A	A	A	B	B	A	A	A

Tabela 1.5 - Efeitos em equipamentos e ferramenta



	UUS	UJA	UEQ	UQ	UDE	UFE	UL	UAP	FRES.
Investimento inicial	B	A	E	C	C	D	C	A	B
Ferramentas e Fixações	B	B	C	B	D	B	B	B	B
Consumo de energia	B	B	C	D	D	B	A	A	B
Eficiência de remoção	D	D	B	C	D	E	E	A	A
Desgaste de ferramenta	C	B	A	A	D	A	A	A	B

Tabela 1.6 - Avaliação econômica



Por isso os processos de UUS e UDE são usados tão somente nas aplicações nas quais o desgaste da ferramenta não traz consequências mais sérias.

b) Meio de usinagem:- Os efeitos de contaminação e aquecimento sobre o meio de usinagem representa problemas críticos para a UEQ, pois a contaminação, na forma de partículas ionizadas associadas ao gás de hidrogênio desprendido no processo, aderem na superfície do eletrodo e a geração de calor na interface resulta numa baixa condutividade e uma remoção não uniforme de material e uma má qualidade de corte. Estes problemas deverão ser resolvidos, antes deste processo ser totalmente competitivo.

c) Máquinas e equipamentos:- Problemas de manutenção ligados à proteção da máquina e equipamentos são maiores nos processos de UEQ, UQ e de UL. Todavia, o devido projeto de proteção adequada do equipamento eliminará ou minimizará estes problemas.

d) Segurança e Toxicidade:- Como mostra a tabela 1.5, somente problemas normais de segurança são encontrados em alguns processos não convencionais de usinagem.

Nos processos de UUS e UAP não encontramos problemas de segurança.

Nos processos de UEQ, UQ e UDE encontramos alguns problemas de efeitos tóxicos para o operador.

1.2.4 - Avaliação econômica.

As limitações econômicas dos processos de usinagem não convencionais são demonstradas comparativamente na tabela 1.6 e figura 1.2.

Os custos de investimento inicial são desenvolvidos para preço médio de máquina e equipamentos básicos.

O processo de UAP é classificado com grau A, o que representa um preço de U\$ 10.000,00 ou menos para o equipamento básico, e o processo de UEQ com grau E, equivalente a um custo de U\$ 100.000,00 a U\$ 150.000,00.

Os custos de ferramentas e fixações são baseados na ferramenta inicial e dispositivos de fixação da peça e ferramenta. Os custos relativos ao desgaste das



ferramentas são computados nos custos de "desgaste da ferramenta".

Os custos de potência de consumo são principalmente e elétricos, salvo no processo de UQ onde os custos são baseados nos reagentes químicos.

1.2.5 - Conclusões e status.

Ficou evidente durante a apresentação deste trabalho , que o processo de UEQ é a melhor combinação dos processos em apli cabilidade e economia e pode ser comparado com vantagens aos pro cessos convencionais de usinagem. Apesar dos processos convencio nais terem sido mais aplicados podemos dizer que estes são menos econômicos, (tabela 1.7).

A UUS, UJA e UDE continuam a ser competitivos em caso de usinagens de precisão onde nem a UEQ nem outro processo pode ser utilizado.

Quando os processos de UFE e UL atingirem um grau de desenvolvimento maior poderão competir favoravelmente com a UUS e a UDE.



2. USINAGEM POR DESCARGA ELÉTRICA (U.D.E.)

ELETROEROSÃO

2.1 - GENERALIDADES DA U.D.E.

Um esquema do processo de usinagem por descarga elétrica é apresentado na figura 2.1

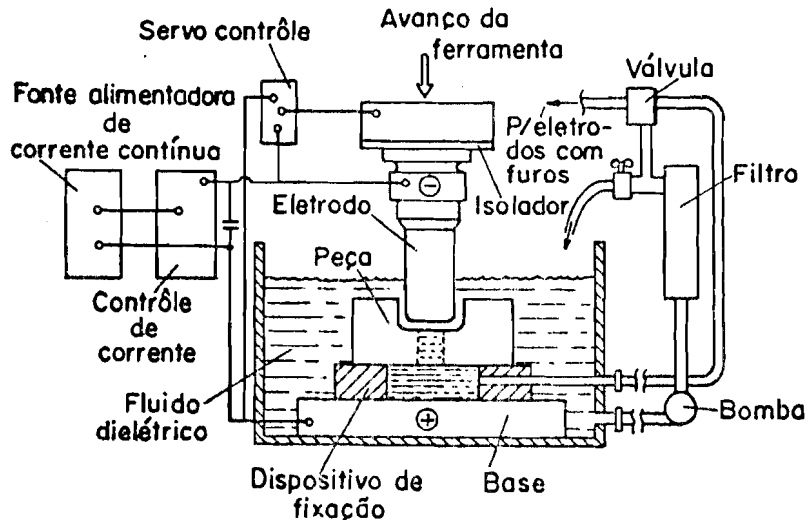


Figura 2.1 - Esquema da U.D.E.

Método excepcionalmente bom para usinagem de materiais con dutores de eletricidade.

Altamente competitivo com os métodos convencionais, princi palmente nas operações de acabamento.

Reduz e simplifica a execução e montagem de peças complexas e descontínuas, aumentando a liberdade de criação e projeto.

A principal aplicação da U.D.E. é na fabricação de matrizes e moldes (antes ou após a têmpera), usinagem de metal-duro, mate^riais extremamente duros e frágeis, execução de furos profundos e de pequenos diâmetros ($L/D > 20$).

Para maior precisão de cilindricidade, conicidade ou melho^res acabamentos superficiais, pode-se combinar a U.D.E., com os processos convencionais de acabamento.

As características operacionais da U.D.E. capacitam-na a re^{pr}oduzir qualquer forma geométrica da peça, por meio de uma forma adequada do eletrodo, combinado a convenientes deslocamentos do mesmo.



A figura 2.2 mostra as vantagens da utilização da U.D.E.

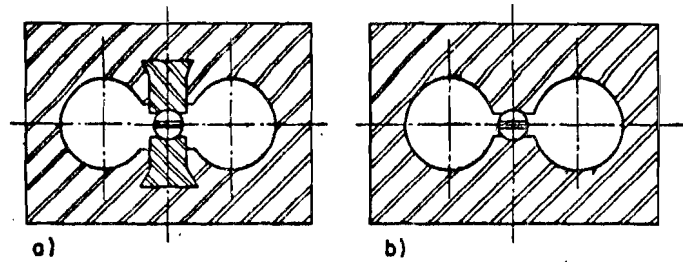


Figura 2.2 - Matrizes.

Peça A - Processo convencional.

Peça B - Processo convencional + U.D.E.

<u>A</u>	<u>B</u>
- Furação	- Furação
- Alargamento	- Têmpera
- Usin. Rasgos e Insertos	- Revenimento
- Têmpera	- U.D.E.
- Revenimento	
- Retífica	
- Ajuste inserto	

2.2 - PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO.

O princípio básico de atuação é a remoção controlada de pequenas partículas do material da peça, através da fusão e evaporação controlada, por meio de descargas elétricas de alta-freqüência entre ferramenta (eletrodo) e a peça, conforme figura 2.3.

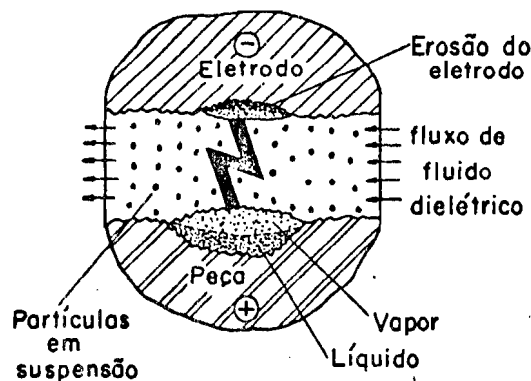


Figura 2.3 - Descarga elétrica.



A figura 2.4 representa o esquema simplificado da U.D.E.: um condensador (C) é ligado a dois eletrodos, imersos em um fluido dielétrico.

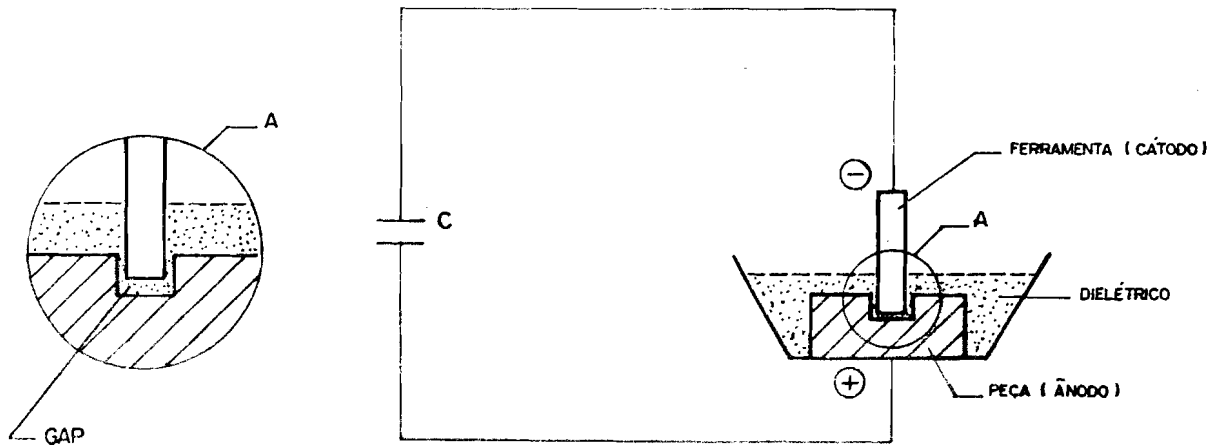


Figura 2.4 - Esquema de uma máquina de U.D.E.

O espaço entre o cátodo e o ânodo é chamado de GAP.

A intensidade média do campo elétrico entre os dois eletrodos é dada por:

$$F = \frac{V}{x}$$

V = Tensão do capacitor em volts.

x = Distância entre os eletrodos, em metros.

A energia acumulada no capacitor é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} CV^2$$

Esta energia é descarregada no GAP quando ocorre a faísca entre os eletrodos.

Em virtude da superfície da cátodo apresentar uma certa rugosidade e estas serem muito próximas, entre esses picos cria-se um campo elétrico de maior intensidade, (vide figura 2.5).

Assim sendo, do cátodo saem elétrons livres que se dirigem ao ânodo. Acelerados pelo campo elétrico F, esses elétrons chocam-se contra as moléculas do dielétrico, libertando outro elétron da molécula, criando assim um fluxo de elétrons que se dirigem ao ânodo, enquanto que uma zona do dielétrico se ioniza.



A ionização atingindo certo ponto, provoca o desenvolvimento da descarga elétrica.

O tempo de ionização é de aproximadamente um microsegundo.

A tendência para a descarga se iniciar é aumentada se: o espaço entre o eletrodo e a peça é reduzido, a voltagem aplicada é aumentada, ou fragmentos estranhos estiver presentes no fluido como por exemplo o próprio metal fundido de outras descargas anteriores.

A energia da descarga vaporiza e decompõe o dielétrico numa vizinhança da coluna de condução elétrica.

Com a continuidade da condução, o diâmetro da coluna aumenta e a corrente aumenta.

A pequena área na qual a descarga ocorre é aquecida a temperaturas extremamente altas e uma pequena porção da peça é levada ao seu ponto de fusão e é removida solidificando-se em pequenas esferas.

Terminada a fase de condução elétrica, a coluna ionizada se dissolve e novo fluido toma lugar no GAP, restabelecendo a isolação entre eletrodo e peça.

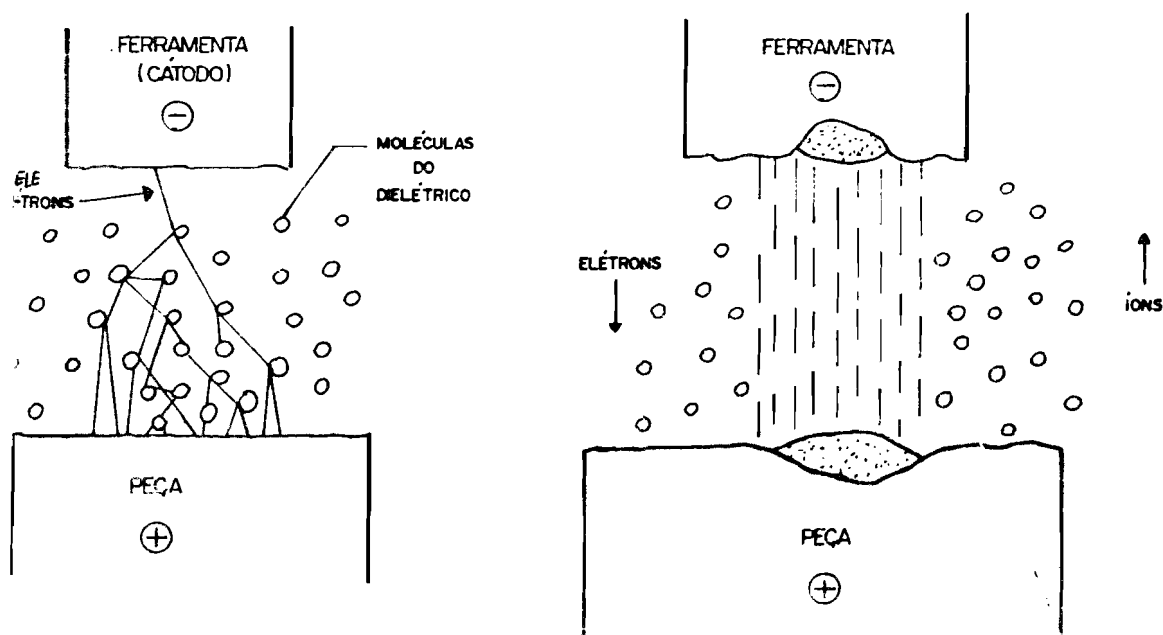


Figura 2.5 - Ionização do GAP



2.3 - PARÂMETROS DO PROCESSO

2.3.1 - Descarga elétrica.

A dimensão da cratera produzida na peça pela descarga depende da intensidade da descarga, ou seja, da energia da descarga

A energia da descarga é dada por:

$$E_d = \frac{1}{2} V I t \quad \text{onde:}$$

V = Voltagem do GAP durante a descarga
 (de 20~25v).
 I = Corrente da descarga.
 t = Tempo em que a corrente flui.

Do ponto de vista de remoção de metal, a corrente tem maior influência que o tempo. Assim, se a corrente da descarga é dobrada e o tempo de condução é reduzido à metade o metal removido pela descarga aumenta, enquanto que a energia permanece a mesma.

A voltagem da descarga é geralmente menor que a voltagem inicial, (vide figura 2.6).

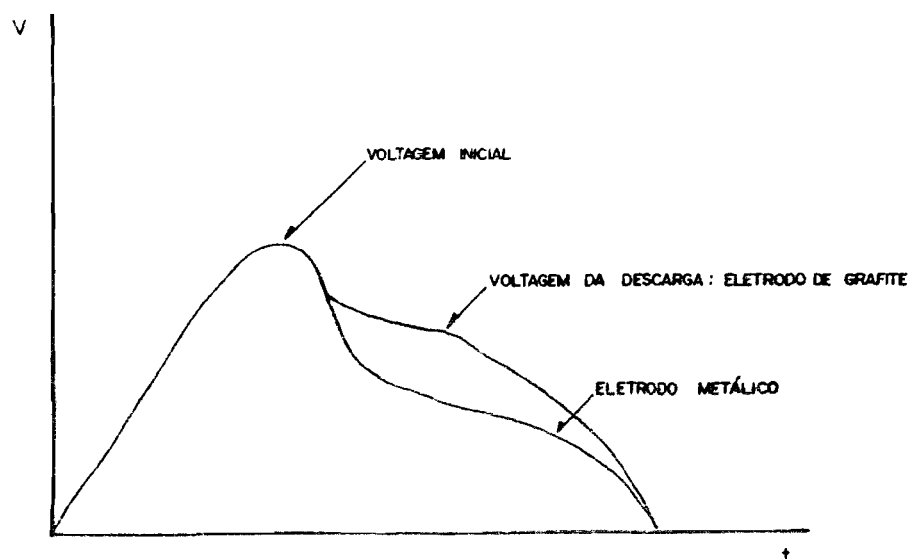


Figura 2.6 - Desenvolvimento da voltagem através do GAP durante a descarga.



Quando a resistância da folga quebra-se, a voltagem imediatamente cai do nível de voltagem inicial

para o nível da voltagem da descarga, que é um valor independente da corrente através do GAP e é determinada somente pelo dielétrico e materiais do eletrodo e peça.

Dependendo do pulso ser largo ou curto podemos ter um comportamento da corrente conforme a figura 2.7:

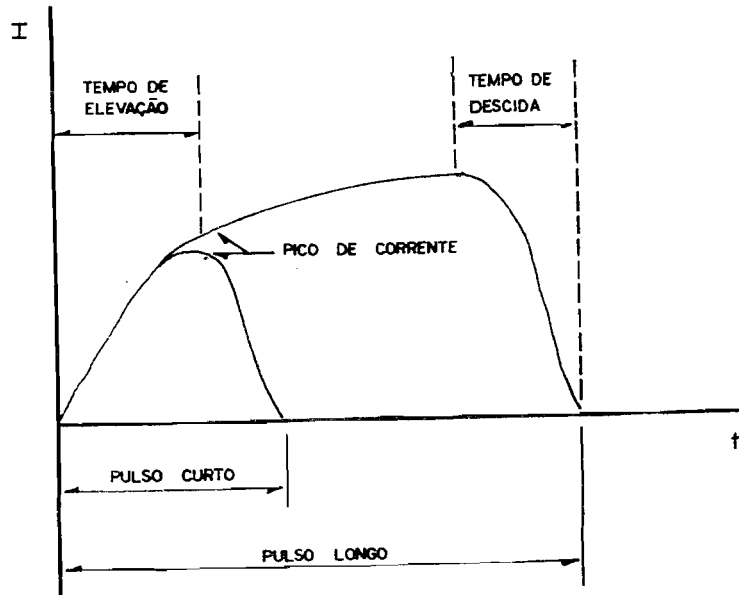


Figura 2.7 - Corrente da descarga.

Assim, correntes ótimas não podem ser conseguidas com pulsos curtos.

O operador usualmente pode controlar o fluxo de corrente através do "Controle de Pico de Corrente" e a dimensão do tempo em que a descarga ocorre através do ajuste denominado "Ciclo de Funcionamento", para conseguir condições específicas de usinagem.

2.3.2 - Capacitância.

Quando um capacitor é usado como elemento de armazenamento, a capacitância em companhia da indutância do circuito que liga o capacitor aos eletrodos determina o pico de corrente e o tempo de descarga.

Aumentando a capacitância, a energia da descarga aumenta ambos, o pico de corrente e o tempo da descarga, pois:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} Vit$$

C = Capacitância (F).

onde: V, I e t os mesmos da equação anterior.



Para se obter máxima eficiência, a indutância do circuito de descarga precisa ser mantido o mais baixo possível. Isto é conseguido pela manutenção dos dois condutores que se ligam ao eletrodo e à peça o mais juntos possível.

2.3.3 - Fluido Dielétrico.

Os fluidos dielétricos mais usados são: óleos minerais, querosene, óleos à base de silicone, água desionizada, líquidos polares tais como soluções aquosas de glicóis etilênicos.

Ele tem 3 funções principais:

- a) Como um isolante entre ferramenta e peça.
- b) Como líquido refrigerante para evitar a fusão do eletrodo com a peça e com as partículas resultantes.
- c) Como meio de escoamento para o metal removido.

A função (c) é a mais importante das tres e é conseguida forçando a passagem do dielétrico através da região de descarga (GAP).

O fluido dielétrico deve ser constantemente purificado através de filtros.

Os vários métodos de introdução de fluido dielétrico na folga entre eletrodo e peça podem ser agrupados em 4 classes:

- 1 - Fluxo Normal.
- 2 - Fluxo Reverso.
- 3 - Fluxo por Jato.
- 4 - Imersão

A ilustração de cada classe se encontra nas figuras de números 2.8 a 2.11.

As principais propriedades que um fluido dielétrico deve apresentar são:

- Constante dielétrica adequada.
- Baixa viscosidade.
- Alto ponto de inflamação.
- Custo pequeno.
- Não corroer o equipamento.
- Não prejudicar o operador.



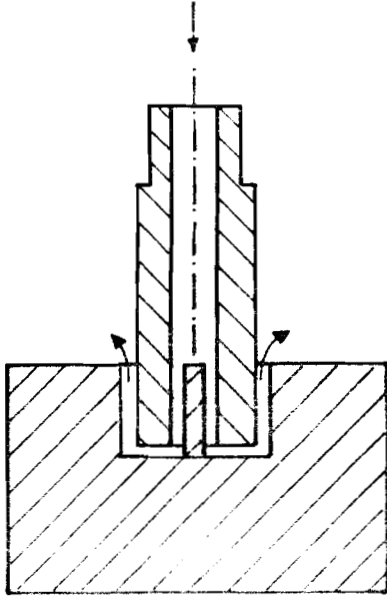


Figura 2.8 - Fluxo Normal

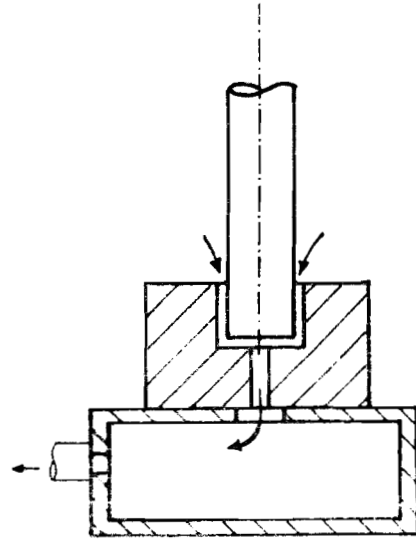


Figura 2.9 - Fluxo Reverse

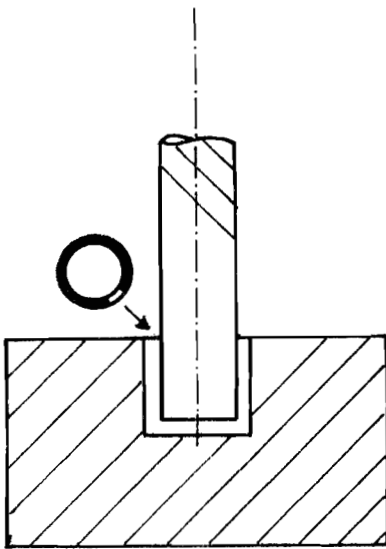


Figura 2.10 - Fluxo por Jato

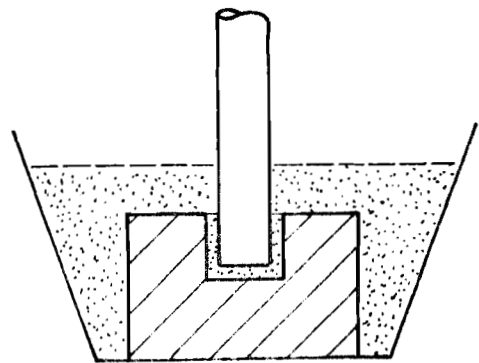


Figura 2.11 - Imersão



2.3.4 - Frequência.

O ciclo de usinagem é formado por dois tempos: o tempo de descarga e o tempo de desionização.

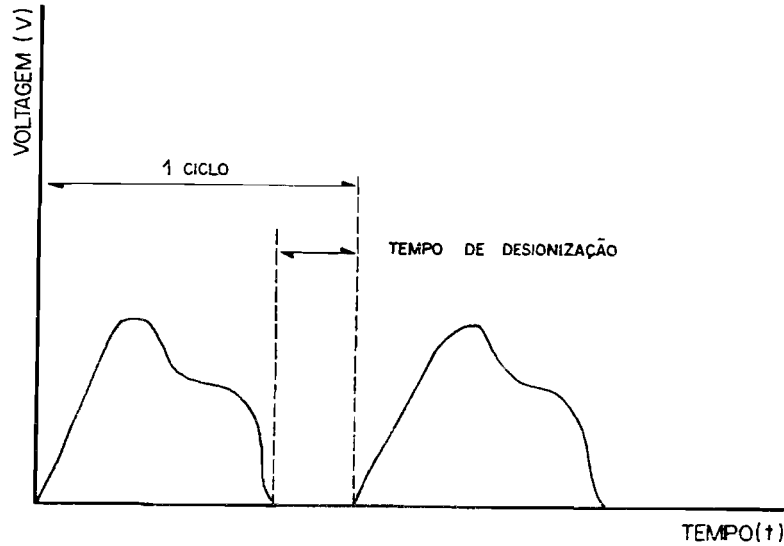


Figura 2.12 - Ciclo de usinagem.

Aumentando a frequência das descargas, o acabamento superficial melhora.

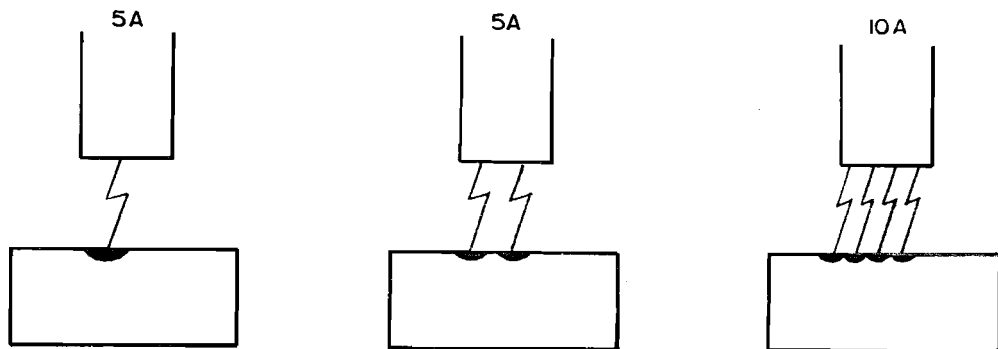


Figura 2.13- Efeito da corrente e da frequência no acabamento da superfície.

Com a frequência hipotética de duas descargas por unidade de tempo com 5 ampéres; a energia é dividida entre as duas descargas, cada uma produzindo uma porção de metal menor que a descarga única de 5 ampéres.

Dobrando-se a amperagem e a frequência, a razão dobrará sem prejuízo do acabamento.



A relação entre o acabamento superficial, corrente e frequência é mostrada na figura abaixo:

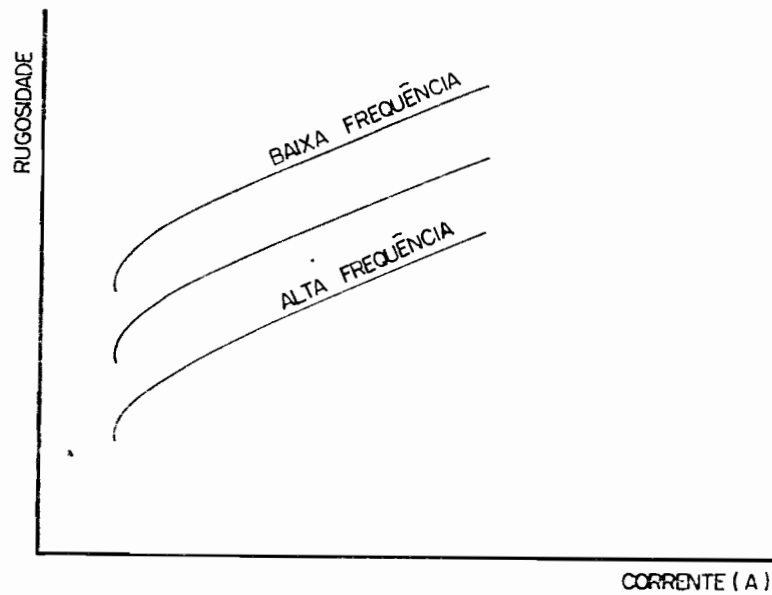


Figura 2.14 - Influência da frequência no acabamento superficial.

A tabela 2.1 ilustra o interrelacionamento dos 3 parâmetros.

Tabela 2.1 - Comparação dos parâmetros do processo.

<i>Potência</i>					
Frequência, kc	5	10	20	450	1000
Corrente, Amp.	1-20	5-17	4-12	3-9	0,5-3
<i>Acabamento</i>					
superficial, Microinches	200-500	150-200	100-150	50-75	25-10
<i>Dimensões da cratera, 10mm⁻³</i>					
<i>Peça</i> } profundidade	48-100	38-48	25-38	12-15	2,5
	largura	135	61	50	16,5
<i>Elétrodo</i> } profundidade	30	14,5	11,5	4,5	0,75
	largura	33	14,7	11,7	5,0
<i>Volume de material</i>					
removido, em mm ³ /hora	27 800	8 200	4 100	1 650	80-8.0



2.4 - FERRAMENTAS - ELETRODOS.

2.4.1 - Tipos e movimento dos eletrodos.

A produtividade, precisão dimensional e o custo de operação de U.D.E. são grandemente influenciados pela escolha do material do eletrodo e seu modo de operação.

Como regra geral, menores taxas de desgaste dos eletrodos são proporcionadas pelos materiais que apresentam alto ponto de fusão.

Os eletrodos são executados pelos métodos convencionais de fundição e usinagem.

Os eletrodos de grafite são geralmente utilizados em operação de desbaste, principalmente em peças de aço, mas são muito susceptíveis a choques mecânicos. Em alguns casos, os eletrodos de grafite podem ser utilizados com polaridade inversa, isto é, como polo positivo, com grande eficiência nas operações de desbaste.

Os eletrodos confeccionados em ligas metálicas geralmente não apresentam problemas de execução. Os de metal duro devem ser sinterizados preferivelmente em sua forma final.

Por motivos econômicos é vantajosa a utilização de uma haste com o eletrodo fixado na ponta. A fixação pode ser feita por intermédio de parafusos, solda ou colas à base de resinas epoxi, condutoras de eletricidade.

Em trabalhos repetitivos que normalmente consomem vários eletrodos, é conveniente minimizar-se o custo, utilizando-se eletrodos para desbaste, semi-acabamento e acabamento, sendo também, uma solução bastante prática a utilização de eletrodos escalonados.

A figura 2.15 mostra a aplicação de um eletrodo escalonado.

Os números da tabela 2.2 são referentes a eletrodo de liga de cobre-tungstênio, na execução de um furo quadrado em aço de alta resistência.



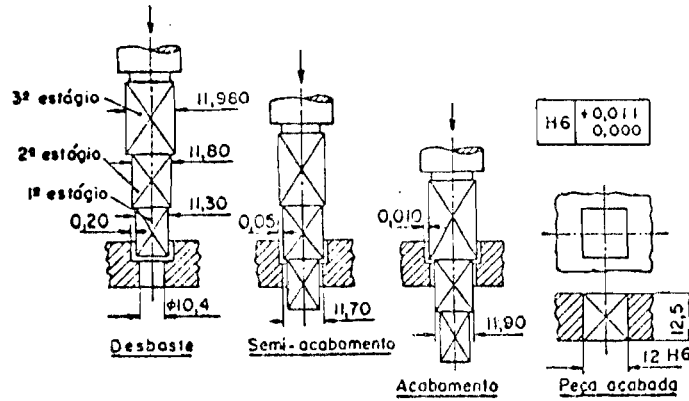


Figura 2.15 - Eletrodo escalonado.

Tabela 2.2 - Variação das condições do processo.

Corrente (Amp.)	12	6	0,5
Frequência (Kc)	5	450	1000
Rugos. Sup. (Micron)	8,0	1,6	0,4
Tolerância (mm)	0,03	0,01	0,005
Taxa de remoção (mm ³ / hora)	500	45	10
Tempo gasto (Min.)	3	10	55

A figura 2.16 apresenta tipos de deslocamentos de eletrodos para execução de usinagem por descarga elétrica (eletroerosão).

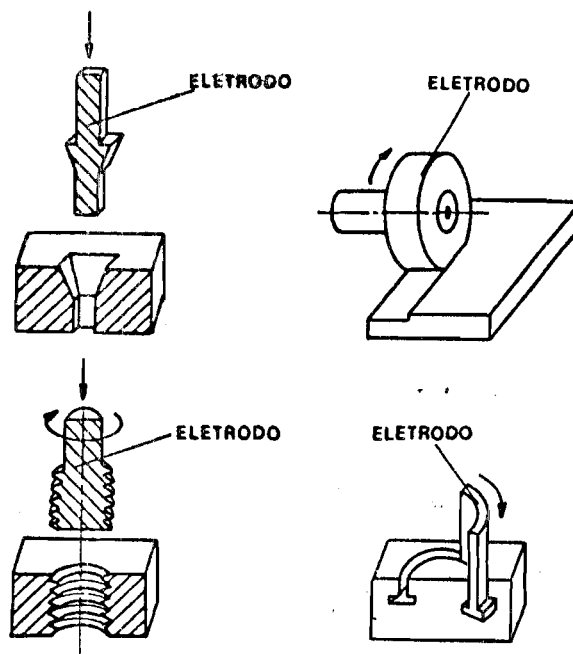


Figura 2.16 - Eletrodos.



2.4.2 - Principais vantagens dos vários materiais utilizados como eletrodos.

Material	Vantagens	Desvantagens
Grafite	<ul style="list-style-type: none"> - Facilmente usinado. - Facilmente fixado por meio de adesivo condutor. - Pode ser retificado depois de fixado. - Menor índice relativo de desgaste. - Pode ser utilizado como uma conveniente fonte de corrente, para operações desbaste "sem desgaste". 	<ul style="list-style-type: none"> - Não pode ser conformado - Necessita de um alto fluxo de fluido dielétrico. - Na usinagem de metal-duro pode ocorrer um perigoso arco elétrico. - Contamina o fluido dielétrico. - Eletrodos pequenos têm problema de fixação.
Ligas de Cobre-Tungstênio	<ul style="list-style-type: none"> - Pode ser fixado por solda. - Boa resistência à quebra dos gumes. - Produz facilmente acabamentos superficiais menores que 1,0 Ra (μm). 	<ul style="list-style-type: none"> - A solda pode amolecer o punção. - Custo maior que o do grafite. - Pode usinar aço somente com polaridade inversa.
Aços	<ul style="list-style-type: none"> - Bom para pequeno número de matrizes. - Punções pequenos são facilmente usinados. - Muito utilizados como punção auxiliar e eletrodo de desbaste. 	<ul style="list-style-type: none"> - Índice de desgaste satisfatório. - Tempo de usinagem é cinco vezes maior que o com eletrodo de grafite.
Ligas 50% Zinco 50% Estanho	<ul style="list-style-type: none"> - Facilidade de cunhagem, para dimensões finais. - Facilidade de fundição. - Permite usinagem precisa de formas complexas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Não produz finos detalhes. - Apresenta rápido desgaste nos cantos. - Possui baixo índice re



	- Pode ser refundido inde	lativo de desgaste.
	finidamente, para rea	
	proveitamento.	
Cobre	- Baixo custo.	- Os cobsres de corte fá
	- Facilidade de usinagem.	cil não são vantajosos
	- Baixo índice relativo de	em todas as dimensões.
	desgaste.	
	- Produz acabamento super	
	ficial bastante regular.	
Latão	- Vantajoso em pequenos tu	- Possui baixo índice re
	bos e arruelas.	lativo de desgaste.
	- Pode ser utilizado em	- Empasta em rebolos de
	quase todos os materiais.	retificação.
Ligas de	- Realiza cortes de preci	- Baixo índice relativo
Prata e	são.	de desgaste.
Tungstênio	- Boa resistência à quebra	- O custo inicial é alto.
	de gumes.	- É difícil de ser usina
	- Resiste bem às vibrações.	do.

A tabela 2.3 apresenta os tipos e as propriedades dos eletro
dos.





- A - Excelente
- B - Bom
- C - Regular
- D - Ruim

Tabela 2.3 - Tipos e Propriedades

Material do Eletrodo	Formas ou processos de obtenção	Circuito Aliment.	Índ. Rel. de Desg.	Custo relativo.	Usina bilidade.	Uso recomend.	
						Metal da peça.	Uso não recomendado.
Grafite	Blocos, Varetas, Tubos	A D	100:1 5:1	Baixo	A	Aço	Ferram. Metal duro
Cobre-							
Tungstênio	Barras, Chapas, Varetas e Tubos	A	8:1 3:1	Médio	C	Todos os metais	Rasgos e Fendas reas
Latão	"	A	1:1 7:1	Baixo	B	Furos	Alta precisão e rasgos profundos
Cobre	"	B	2:1 1:1	Baixo	B		
Prata-							
Tungstênio	Sinterizado	A	12:1 8:1	Alto	C	Todos	
Tungstênio	Arames, Varetas	B	10:1 5:1	Médio	D	Todos	Pequenos furos e rasgos.
Carboneto Tungstênio	Varetas sinteriz.	B	10:1 6:1	Alto	D	Todos	
Aço	Todas as formas	B D	4:1 4:1	Baixo	A	Não ferrosos	Furos passantes. Metal duro.
Zinco	Fundido	C D	15:1 1:1	Baixo	A	Matrizes	
Alumínio	Fundido ou forjado	C D	2:1 5:1	Baixo	B	Aço	Matrizes Furos
Molibidênio	Varetas, Arames	B A	8:1 3:1	Alto	D	Metais refrat	
Níquel	Chapas perfiladas	A	8:1 5:1	Alto	C	Todos	Detalhes

2.4.3 - Desgaste do eletrodo.

Ao se dar a descarga entre eletrodo e peça, uma parte da energia é aplicada ao eletrodo produzindo assim uma cratera também no eletrodo. O tamanho da cratera depende da energia da descarga e do material do eletrodo.

Os materiais para eletrodos que apresentam boas características de desgaste são aqueles de alto ponto de fusão, porém são difíceis de trabalhar.

Um dos principais materiais usados para eletrodos é o grafite, que não tem ponto de fusão indo diretamente à fase de vapor e é fácil de ser trabalhado.

A vaporização de uma dada dimensão de partícula de grafite requer uma quantidade de energia maior que a fusão de uma partícula similar de um eletrodo metálico.

Foram estabelecidas algumas relações para o desgaste de eletrodos metálicos:

$$R_t = 6,51 \times 10^2 (T_{fe})^{-2,28}$$

onde: R_t = percentagem média de metal removido do eletrodo
(in³/amp. min. 10⁴)

T_{fe} = Temperatura de fusão do eletrodo (°C)

e

$$W_r = 2,25 (M_r)^{-2,3}$$

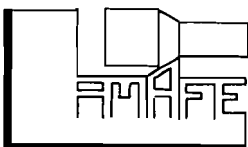
onde: W_r = razão de desgaste (trabalho/ferramenta)

M_r = razão do ponto de fusão (trabalho/ferramenta)

2.4.4 - Sobrecorte

O sobrecorte é o alargamento do furo com relação à dimensão do eletrodo (vide figura 2.17).

O sobrecorte aumenta com o aumento da energia da descarga. Seu relacionamento com a corrente e frequência é mostrado na figura 2.18.



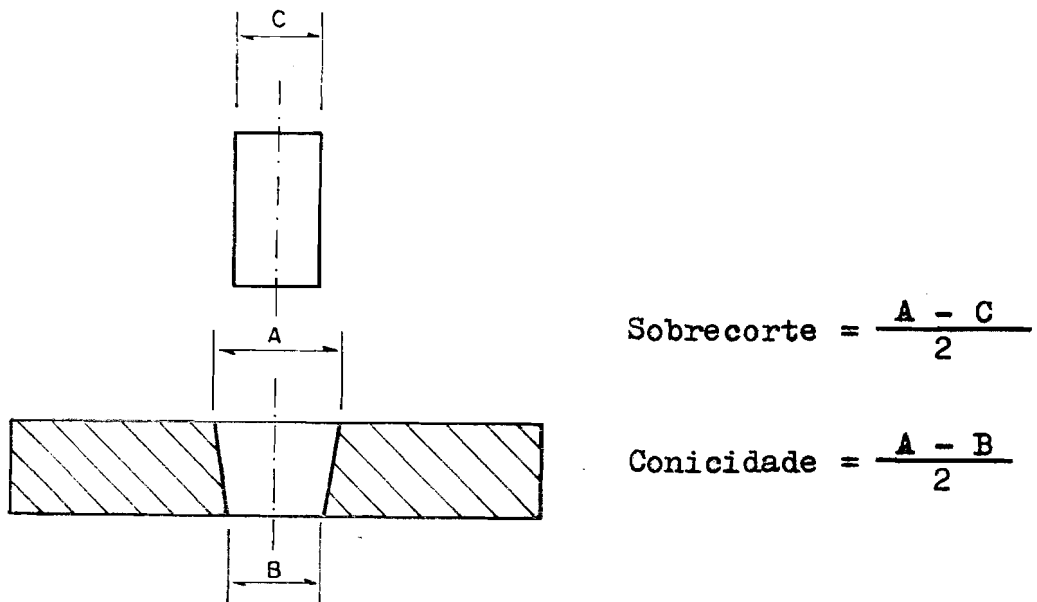


Figura 2.17 - Sobrecorte

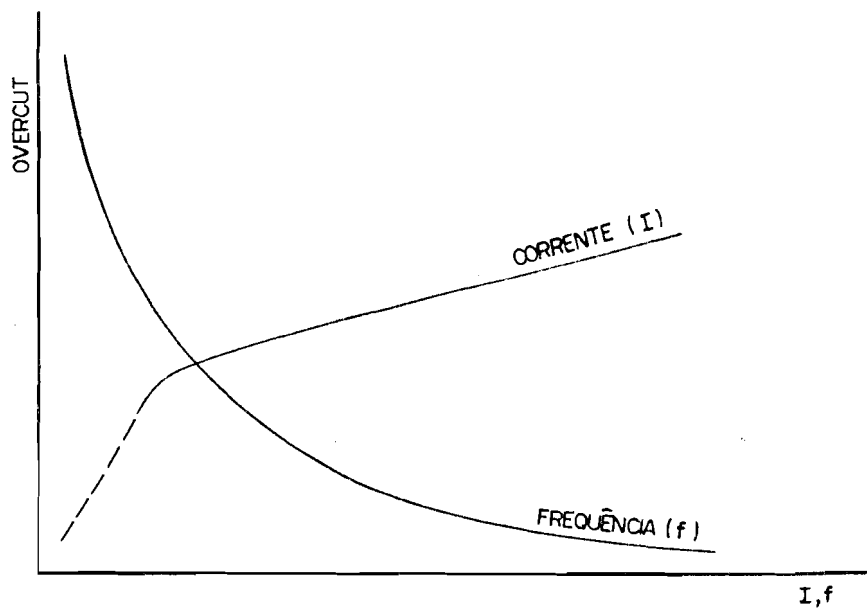


Figura 2.18 - Sobrecorte

2.4.5 - Volume do material retirado.

O material removido da peça varia de 0,15 a 500 cm^3 /hora, dependendo das condições de usinagem.

Uma vez que as partículas do metal são removidas por fusão do mesmo, o volume de metal removido varia com o ponto de fusão da peça.

Foram estabelecidas empiricamente as seguintes relações:

$$R = 2,43 (T_f)^{-1,23}$$

$$V = 1,36 \times 10^{-4} \times (T_f)^{-1,43}$$

onde: R = percentagem média de metal removido da peça
($\text{in}^3/(\text{amp. min.}) \times 10^4$)

T_f = temperatura de fusão do material da peça ($^{\circ}\text{C}$)

V = volume médio/descarga (in^3)

A razão de remoção de metal aumenta com o aumento da corrente.

2.4.6 - Efeitos superficiais.

Por ser um processo técnico a UDE afeta a integridade da superfície usinada.

As partículas de metal fundido que não são expelidas durante o processo se solidificam formando uma pequena camada superficial endurecida que é de aproximadamente de 0,005mm ou menor em operações de acabamento, ou seja, empregando baixa amperagem, alta frequência e constantemente pequena razão de remoção de material.

Em operação de desbaste, onde se emprega altas correntes, pulsos de longa duração, a camada pode atingir até 0,3 mm ou mais dependendo do material usinado.

A dureza da camada superficial varia em função da profundidade afetada pelo calor conforme mostra a figura 2.19.



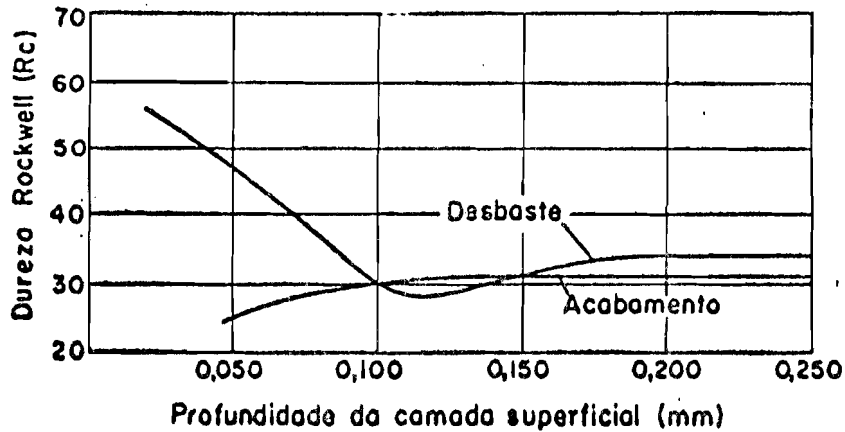


Figura 2.19 - Variação da dureza.

Pode-se ter também, o aparecimento de pequenas trin_{cas} superficiais de 0,002 a 0,01 mm de profundidade o que diminui a resistência à fadiga da peça como mostra a figura 2.20.

Material ensaiado	Resistencia à fadiga à temperatura ambiente, kg ^m /mm ²			
	100	200	300	400
Waspalloy	[Barra hachurada]			
Aço inoxidável	[Barra hachurada]			
Liga 99% Titânio	[Barra hachurada]			
Inconel	[Barra hachurada]			
Alumínio fundido	[Barra hachurada]			
0 100 200 300 400				
<u>Convenção:</u>				
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> Frezado Processo UDE </div>				

Figura 2.20 - Variação da resistência à fadiga.



Resumo dos efeitos superficiais

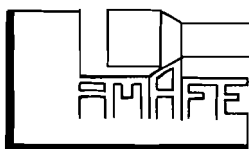
Dureza - Devido às altas temperaturas atingidas na fusão e evaporação do metal há o aparecimento de uma pequena camada superficial endurecida, de aproximadamente 0,002 a 0,10mm de espessura nas operações de acabamento de aços, e de até 0,20mm nas operações de desbaste. A dureza da camada superficial varia em função da profundidade afetada pelo calor.

Resistência à fadiga - Comparando-se a resistência à fadiga de peças submetidas ao processo U.D.E. com os processos convencionais de usinagem, verifica-se que ocorre uma diminuição da resistência à fadiga. Nas aplicações que forem necessárias altas resistências à fadiga, este conveniente pode ser eliminado, removendo-se a camada prejudicial.

Tensões internas - Existe ausência total de tensões internas nas peças usinadas por U.D.E., não ocorrendo deformações posteriores na peça.

Trincas superficiais - A combinação do aquecimento local com o efeito de têmpera do fluido dielétrico pode causar o aparecimento de microscópicas trincas superficiais de 0,002 a 0,010 mm de profundidade, principalmente nas operações de desbaste. Nas peças de aplicações comuns, este efeito é desprezível.

Crateramento - O aparecimento das pequenas crateras, pouco ou nada prejudica o desempenho da peça. Elas são não-direcionais, o que facilita a lubrificação, havendo melhor retenção do lubrificante, pois as pequenas crateras atuam como depósito. Por outro lado, superfícies com irregularidades não direcionais facilitam as operações de polimento porventura necessárias.



2.5 - TIPOS DE CIRCUITOS USADOS.

Existem vários tipos básicos de circuitos elétricos que fornecem DC pulsante para as máquinas de eletroerosão.

Nenhum tipo particular é adequado para satisfazer a todas as condições de usinagem.

O circuito básico, mostrado na figura 2.20A, é o mais simples deles. Neste circuito com a chave (S) na posição (1), a fonte DC (E) carrega o capacitor (C). Movimentando-se a chave (S) para a posição (2) o capacitor é ligado com o eletrodo e a peça, ocorrendo, então, a descarga através^{do} GAP, desde que a distância entre eletrodo e peça seja conveniente.

Ocorrendo a descarga, a chave volta para a posição (1) e o ciclo se repete.

O metal removido pela descarga, o acabamento produzido na superfície e o overcut entre ferramenta e peça são funções diretas do capacitor.

A principal restrição a esse circuito básico é problema mecânico da operação da chave (S) que não pode ser feito a altas frequências como seria desejável.

O circuito da figura 2.20B é conhecido como "Circuito RC" ou "Circuito Russo" (porque foi primeiramente usado por dois pesquisadores russos). Neste circuito o resistor (R) desempenha o papel da chave (S) do circuito básico.

O capacitor (C) é carregado pela fonte (E) através do resistor (R). Quando a voltagem através de (C) atinge um determinado valor, o capacitor (C) se descarrega através da folga, e o ciclo se repete.

O material usado como eletrodo é o cobre, preferencialmente. Este circuito é simples e robusto, porém apresenta baixa razão de usinagem, uma vez que para correntes maiores que 4 ou 5 ampéres o circuito torna-se instável e com operação irregular.

A peça em usinagem pode ser perdida em virtude de "Centelha DC" (a peça é queimada) com o objetivo de aumentar a razão de remoção do metal, foram desenvolvidos os "Geradores Rotativos de Impulsos", aplicados nos circuitos das máquinas EDM como ilustra a figura 2.20C.



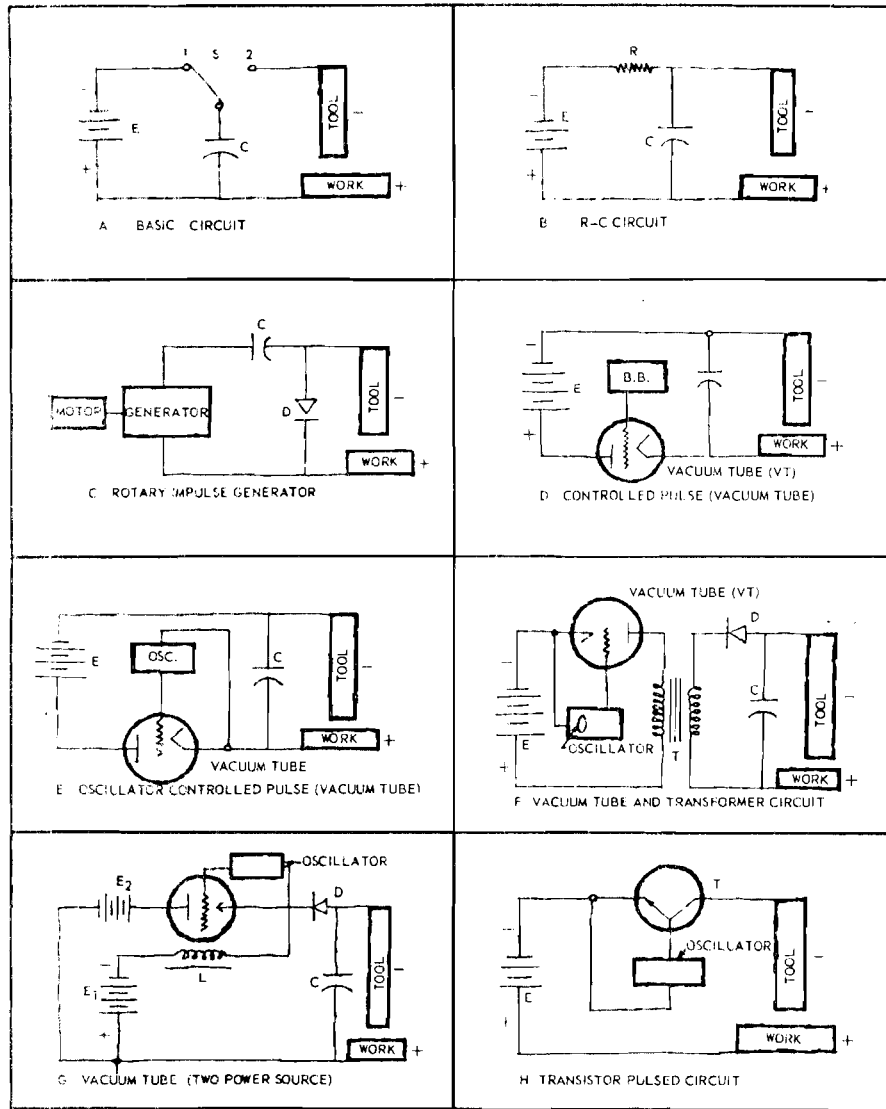
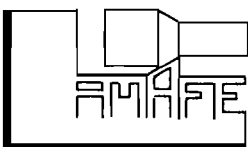


Figura 2.20 - Circuitos.



Neste circuito, o capacitor (C) é carregado através do diodo (D) em 1/2 ciclo.

No 1/2 ciclo seguinte, a soma da voltagem do gerador e da voltagem do capacitor é aplicada ao GAP.

Este circuito possui alta capacidade de remoção de metal, produzindo, porém, superfícies rugosas. A frequência não é ajustável, sendo, dessa forma impossível produzir melhores acabamentos.

Um ponto negativo nos circuitos anteriores é a falta de um meio de parar o fluxo de corrente caso haja curto-circuito. No GAP isto pode ser feito mecanicamente, afastando-se o eletrodo da peça, porém, sendo um processo que requer um tempo longo poderão ocorrer danos à peça, como queimaduras, fusão, etc.

Os outros circuitos mostrados na figura 2.20 tem por objetivo parar a corrente, eletronicamente, caso haja um curto-circuito. Nestes circuitos lança-se mão de tubos de vácuo e transistores para atingir esse fim.

2.6 - MÁQUINAS UDE.

A máquina de usinagem por descarga elétrica é constituída das seguintes partes principais:

- base e coluna
- mesa móvel em duas direções
- cabeçote porta-ferramenta
- fonte alimentadora de potência
- servomecanismo de controle do avanço do eletrodo
- bomba e circuito para fluído dielétrico.

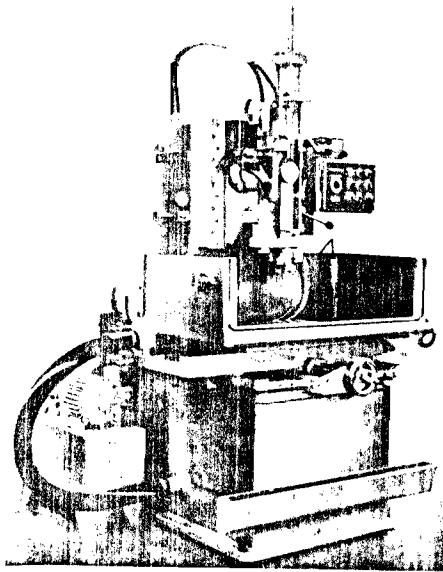
Estas partes convenientemente dimensionadas e dispostas dão origem a diferentes tipos e tamanhos de máquinas.

Alguns modelos estão mostrados nas figuras 2.21 a 2.25.

Todos os tipos possuem um servo mecanismo que mantém constante a folga entre o eletrodo e a peça. Esse servo mecanismo pode ser eletro-hidráulico, eletro-pneumático, eletro-dinâmico ou servomotor.

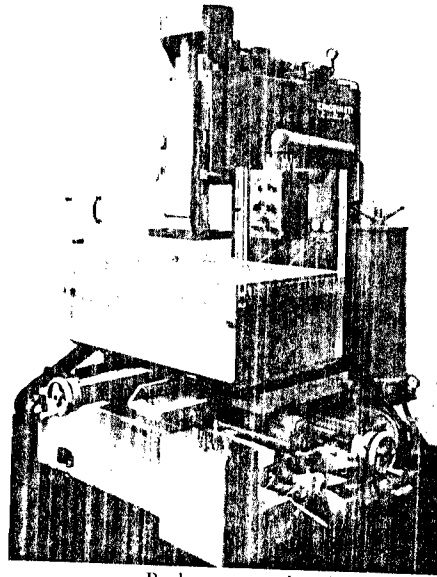
A fonte alimentadora de potência pode ser separada da máquina e contactada com esta por meio de cabos elétricos ou pode ser montada diretamente na máquina.





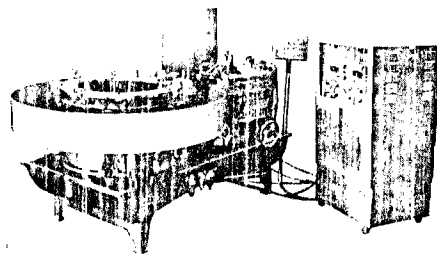
Bed-type, quill head machine. (Courtesy, The Ingersoll Milling Machine Company)

Figura 2.21



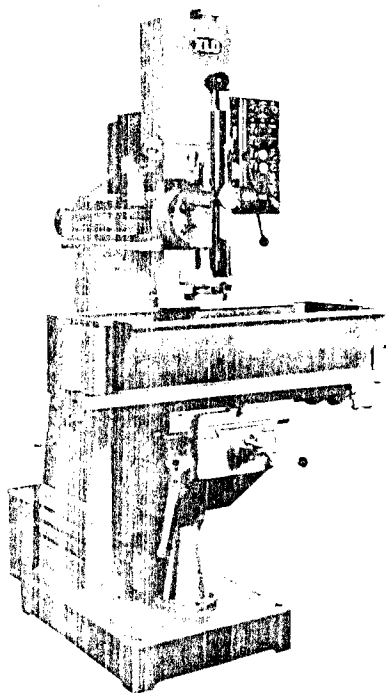
Bed-type, ram head machine. (Courtesy, The Cincinnati Milling Machine Company)

Figura 2.22



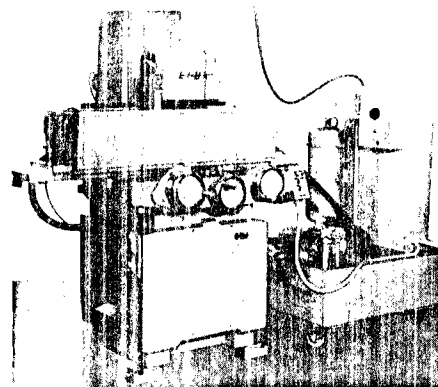
Horizontally actuated machine. (Courtesy, The Ingersoll Milling Machine Company)

Figura 2.23



Knee-type, quill head machine. (Courtesy, The Ex-Cell-O Corporation)

Figura 2.24



EDM grinder. (Courtesy, Elox Corporation of Michigan)

Figura 2.25



A base da máquina serve, normalmente, de reservatório do fluido dielétrico.

A mesa de duas coordenadas é normalmente montada sobre a base permitindo o posicionamento da peça com relação ao eletrodo fixado no cabeçote.

Apesar de não haver contato físico entre eletrodo e peça e, portanto, não haver forças de corte, a estrutura da máquina não pode ser muito leve, porque o fluido dielétrico pressurizado, que deve passar entre eletrodo e peça, exercerá uma força sobre o eletrodo que é considerável, se grandes eletrodos forem usados.

Por exemplo, consideremos o caso de um eletrodo quadrado de 25 cm de lado. Usando-se uma pressão no dielétrico de $1,4 \text{Kgf/cm}^2$, teremos uma força de separação de aproximadamente 900Kgf exercida na máquina.

A estrutura da máquina deve ser projetada para resistir a esse carregamento, garantindo a constância da folga entre eletrodo e peça em torno de 0,025mm.

Folgas nas guias do cabeçote podem causar erros na usinagem.

Máquinas de UDE com controle numérico também são disponíveis para o posicionamento de trabalho.

2.7 - APLICAÇÕES PRÁTICAS - TOLERÂNCIAS - ACABAMENTO.

As tolerâncias que se podem obter na UDE vão de 0,005 a 0,025mm nas operações de acabamento e de 0,05 a 0,15mm nas operações de desbaste.

A conicidade varia entre 0,01 a 0,5mm por 100mm e o overcut entre 0,005 a 0,15mm, raios de canto de 0,4mm são comuns.

Os acabamentos superficiais são tipicamente na escala de 63 a $125 \mu\text{in}$ (A.A.), podendo obter-se até $4 \mu\text{in}$ com equipamentos sofisticados.

Atualmente a UDE já desempenha um importante papel na usinagem. Ela complementa e às vezes substitui a usinagem convencional e tem se mostrado eficiente na execução de matrizes, moldes, ferramentas especiais, pequenos furos, rasgos, principalmente em

materiais já tratados termicamente eliminando assim os tratamentos subsequentes à usinagem nos métodos convencionais (que podem dar origem à distorções).



Muito usada nas indústrias aeroespaciais e eletrônicas onde os requisitos de produção são relativamente baixos.

As principais vantagens e desvantagens da UDE estão na tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Principais vantagens e desvantagens

No seu atual estágio de desenvolvimento, a U.D.E. apenas não é uma concorrente ativa aos processos convencionais quanto à capacidade de remoção de material e tem-se mostrado extremamente eficiente na usinagem de formas complexas e de materiais extremamente duros.

Vantagens	Desvantagens
- Aplicação a qualquer material eletricamente condutor.	- Custos de aquisição e manutenção do equipamento relativamente altos.
- Facilidade de executar furos, rasgos e cavidades de formas complexas.	- Exige operadores especializados.
- Usinar materiais extremamente duros, tais como: aço temperado, ligas exóticas (Astalloy, Waspalloy, Nimonic, etc), ligas de titânio e metal duro.	- Não é aplicável a material não condutor.
- Proporciona bom acabamento superficial.	- Apresenta pequena taxa de remoção de material.
- Apresenta boa precisão dimensional.	- Consome o eletrodo (em taxas algumas vezes bastante altas).
- Não altera as propriedades do metal da peça.	- Necessita fluido dielétrico e equipamento para filtrá-lo.
- Não induz esforços sobre as peças.	- Causa efeitos superficiais tais como endurecimento de uma fina camada e trincas microscópicas.

2.8 - OUTROS TIPOS DE U.D.E.

2.8.1 - Corte por fio com descarga elétrica (CFDE).

É uma forma especial de UDE na qual o eletrodo é substituído por um fio condutor que se move continuamente.

O fio pode ser de cobre ou latão, de diâmetro da ordem de 0,05mm até 0,25mm.



Usualmente o movimento do fio num determinado percurso é controlado numericamente.

O dielétrico é óleo ou água destilada (desionizada), trazido até a região de trabalho pelo movimento do arame.

É aplicado na confecção de matrizes, cortes de contornos complicados, etc., estando o material tratado ou não.

Podem ser cortados materiais com espessuras de 0,025mm até 75mm na razão de 645mm²/hora.

Em desbaste pode-se alcançar até 100mm/min.

A precisão normal de posicionamento é da ordem de $\pm 0,005\text{mm}$.

2.8.2 - Serramento por descarga elétrica.

É uma variação da UDE que combina o movimento da serra de fita com a erosão elétrica da peça.

A serra possui um movimento rápido da ordem de 1500m/min., 0,63mm de espessura, feita de aço especial.

O gume da fita é guiado dentro da peça pelos insertos faceados de M.D.

Um corte de serra de 1/32" é formado, porém não é mantida controlada a folga entre a lâmina da fita e a peça como na UDE.

Não se usa fluido dielétrico, existindo um arco contínuo de baixa voltagem (6 a 24 Volts), alta corrente da fonte de potência.

É aplicado para cortar estruturas frágeis como alumínio, aço inox, ou titânio poroso. Cortes com profundidade de 1mm podem ser feitos. Somente materiais condutores podem ser cortados com EDS

A escala da razão de usinagem é da ordem de 30 a 1300 cm²/min, planeza da ordem de $\pm 0,08\text{mm}$ com baixa razão de avanço de $\pm 0,4\text{mm}$.

A superfície usinada possui uma camada dura e uma camada afetada termicamente abaixo da superfície.



3. USINAGEM E SOLDA POR FEIXE DE ELETRONS

3.1 - GENERALIDADES.

Este método utiliza um feixe de eletrons altamente acelera dos, em uma câmara na qual produziu-se vácuo.

No impacto dos eletrons focalizados em um determinado ponto da peça, a energia cinética transforma-se em calor que, dependen do de sua intensidade e concentração, aquece ou vaporiza uma pe quena porção de material da peça.

O processo permite a obtenção de densidade de potência da or dem de 150 Kw/mm^2 , capazes de vaporizar qualquer material ou liga atualmente conhecidos.

O vácuo é necessário para evitar a dispersão do feixe de ele trons pela colisão com as moléculas do ar, ou qualquer gás inter posto entre o canhão gerador de eletrons e a peça. A dispersão é proporcional à densidade do gás e a distância percorrida pelo fei xe de eletrons.

O canhão de eletrons é um triodo, que consiste de um filamento de tungstênio que emite eletrons quando aquecido, um colimador eletrostático, uma grade para controle da corrente e um anodo que origina a aceleração dos eletrons.

O esquema de um canhão de eletrons típico, é mostrado na fi gura 3.1.

3.2 - MECANISMO DE PENETRAÇÃO DO METAL.

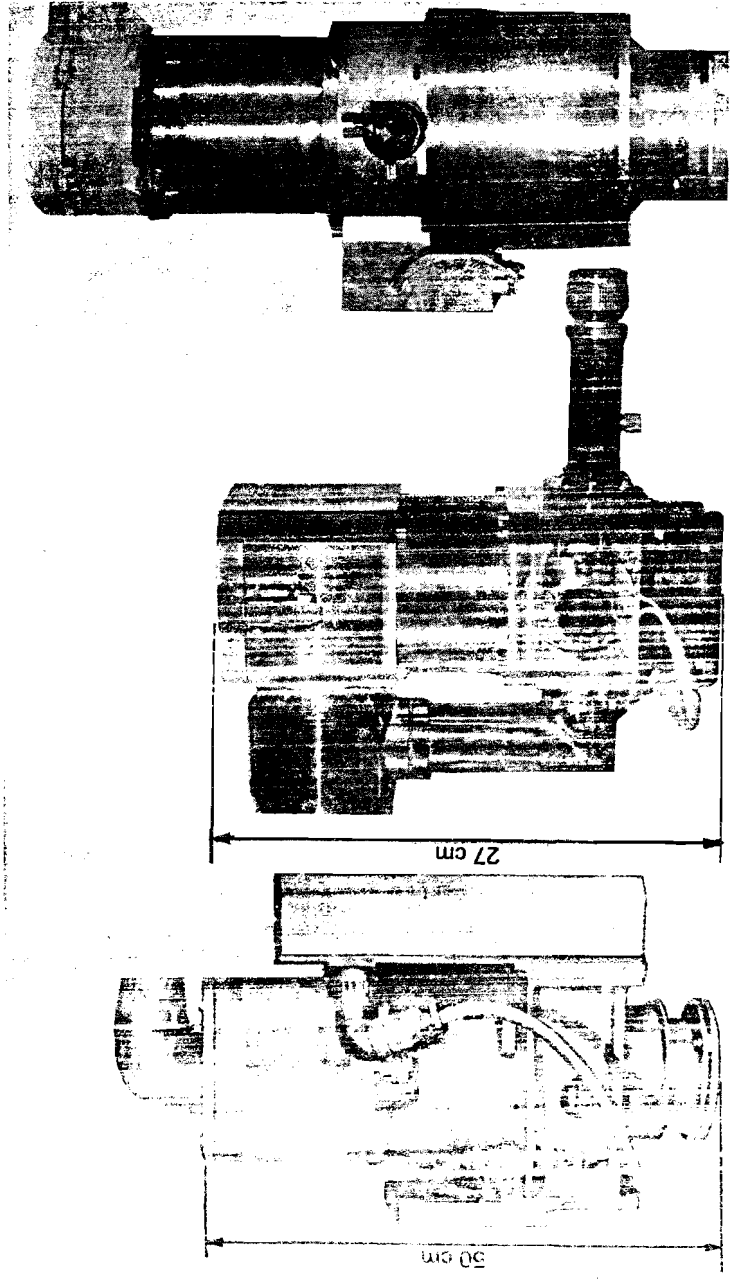
Em aplicação de um canhão de 100 Kw de potência, o eletron e mitido penetra na peça a uma profundidade média de $10/\mu\text{m}$, e o tem po decorrido até que outro eletron se choque no mesmo lugar é de um milésimo de segundo em média.

O aquecimento provocado pelo choque do eletron causa simulta neamente a vaporização da área de contato e a liquefação da área imediatamente abaixo (ver figura 3.2).

As condições de usinagem e solda podem ser ajustadas dentro de uma larga faixa, de acordo com o material da peça e a operação a ser executada.



A fim de melhorar as condições operacionais, nor malmente existem duas câmaras de vácuo. Em uma delas



- 100 kW electron gun

- Small electron gun of low power with lens viewing system and focusing.

- Unpumped electron gun type SV 7, with viewing system - focusing and deflection.

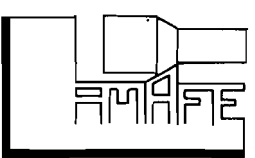
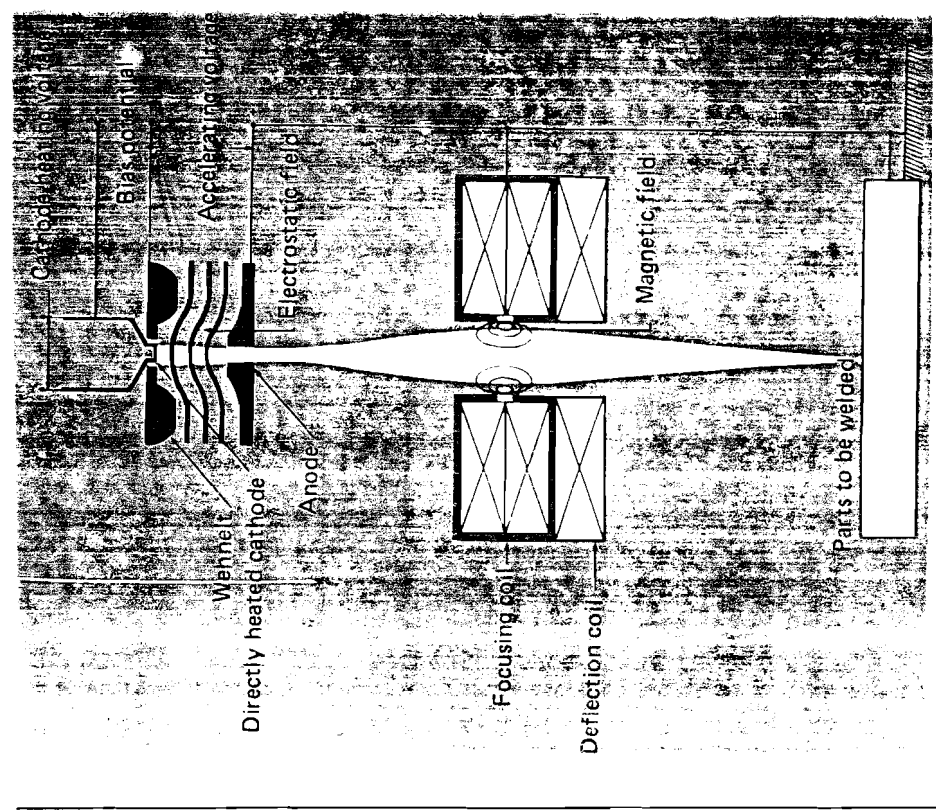


Figura 3.1 - Esquema de um canhão de eletrons típico.

(onde é gerado o feixe), faz-se alto vácuo e na outra câmara coloca-se a peça a ser trabalhada, na qual o vácuo é menor. Por ocasião da colocação ou retirada da peça, a comunicação entre as duas câmaras é bloqueada, evitando-se assim a alteração da câmara de alto vácuo.

O equipamento adicional necessário para operações de usinagem e solda, inclui um visor ótico para focalização do feixe, e uma mesa móvel ou dispositivo de alimentação, para posicionamento no início da operação ou deslocamento da peça em trabalho.

Para produção seriada podem ser utilizadas várias fontes de feixe de eletrons e diferentes câmaras de trabalho.

As câmaras de trabalho devem possuir menores dimensões possíveis, em relação às peças a serem trabalhadas. Se a câmara for grande e as peças pequenas, deve-se colocar blocos para preencher os espaços vazios.

Algumas características do processo:

- Feixe de eletrons com diâmetro variando de $10\mu\text{m}$ a $30\mu\text{m}$.
- Razão de remoção da ordem de $1,64\text{ cm}^3/\text{min}$.
- Razão de penetração de $0,25\text{ mm/s}$.
- Furos (usináveis) com $L/D = 20$.
- Tolerância do feixe $\pm 2\mu\text{m}$ a $\pm 50\mu\text{m}$.
- Velocidade do eletron de 100 m/s a uma aceleração potencial de 150 Kv .
- Duas classes de máquinas:
 - . Baixa voltagem - 30 a 60 Kv .
 - . Alta voltagem - 100 a 150 Kv .

Aplicações:

Solda.

Usinagem de furos e rasgos.

Corte.

Solda - um grande progresso está ocorrendo com a aplicação do feixe de eletrons na soldagem em larga escala ou de peças impossíveis de serem soldadas com os métodos convencionais. Isto se deve ao consumo relativamente baixo de energia, perfeição, alta resistência e pureza da solda.



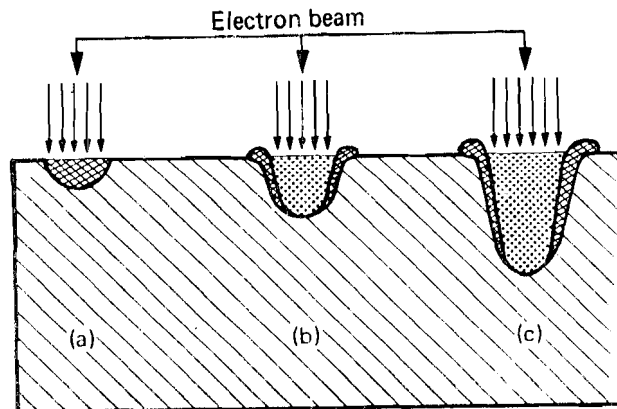


Figura 3.2 - Mecanismo de penetração.

Industrialmente, as empresas nucleares e aeronáuticas são as principais usuárias deste processo, que satisfaz plenamente as suas necessidades em perfeição, qualidade e repetibilidade.

Há três processos de soldagem:

- Em alto vácuo
- Em vácuo médio
- Sob pressão atmosférica.

O processo em alto vácuo possibilita um maior rendimento na conversão de energia, e soldas de alta pureza e resistência. Sua desvantagem é a necessidade de alto vácuo, da ordem de $0,1\text{ mmHg}$, mas o tempo necessário para um ciclo completo de operação é menor.

Em operações onde é necessária uma extrema pureza de solda, este é o único processo aceitável.

A utilização do processo em vácuo médio da ordem de 100 a 500 mmHg , é relativamente nova, apresentado grande versatilidade de aplicação, mantendo uma ótima qualidade de solda e com tempo de aplicação bem menor.

O processo sob pressão atmosférica utiliza gases inertes protetores (principalmente argônio e hélio), que normalmente possuem um índice de impurezas (oxigênio, nitrogênio, óleos, vapor d'água, etc.) da ordem de 50 ppm . Este índice de impurezas do gás inerte é aceitável correspondendo às condições de vácuo moderado. Sua

utilização é limitada aos casos em que o feixe de elétrons percorre no máximo 15 mm através do gás protetor,



enquanto que no processo de vácuo médio, pode ser utilizado em distâncias de 500 mm.

É importante notar que um equipamento de alto vácuo pode ser regulado para vácuo médio. Esta combinação permite a execução de soldas de alta pureza, utilizando-se alto vácuo, bem como alta produção com vácuo moderado, na mesma máquina, como mostra a figura 3.3:

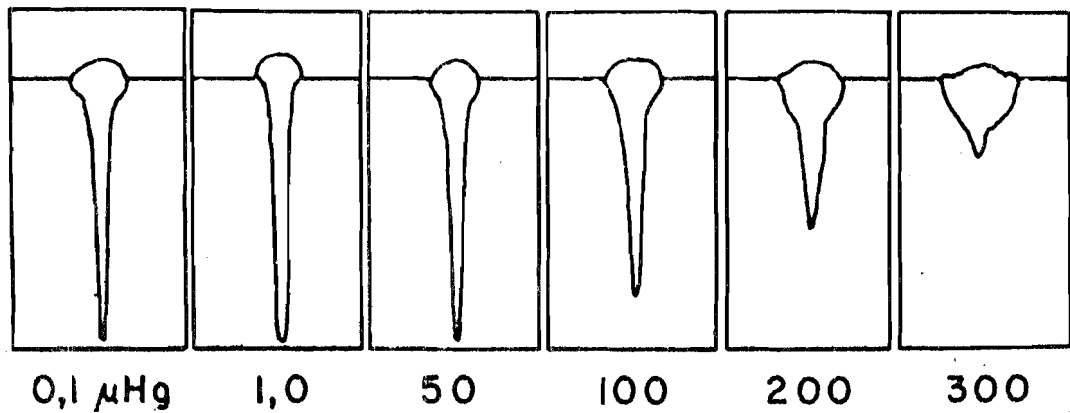


Figura 3.3 - Profundidade de penetração versus densidade de vácuo.

A profundidade e a largura da zona fundida dependem da intensidade do vácuo, da profundidade afetada pelo calor, do material da peça, da distância percorrida pelo feixe, como mostra a figura 3.4:

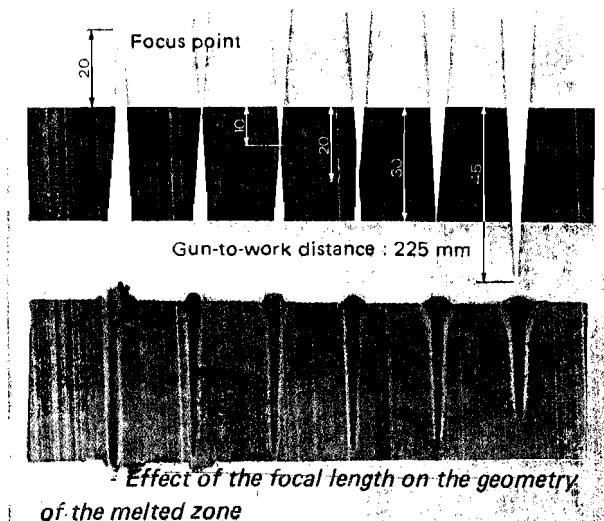


Figura 3.4 - Profundidade de penetração versus distância do canhão.

Devido à possibilidade de deflexão do feixe por meio de uma bobina, pode-se executar soldas paralelas praticamente contínuas, enviando-se uma corrente cuja forma é uma onda quadrada, ou então uma solda em zigue-zague por meio de uma onda senoidal.

A velocidade de soldagem pode ser superior a 150 mm/s.

A solda por feixe de eletrons é o processo que provoca as menores deformações ou distorções, por gerar uma zona afetada pelo calor em mínimas proporções e por ter menor tempo de contato com a peça.





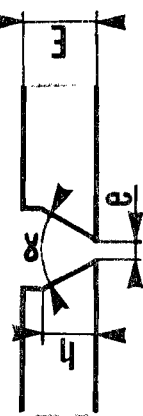
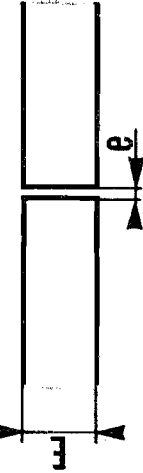
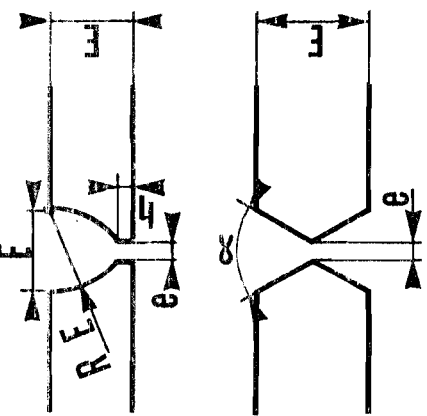
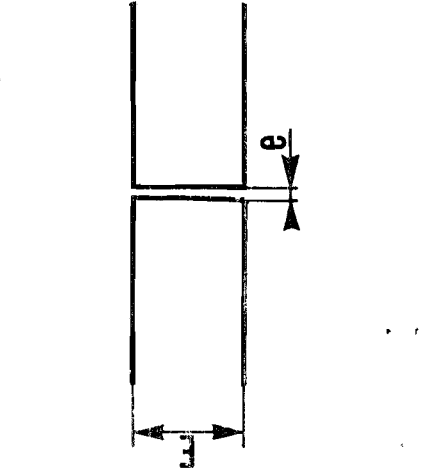
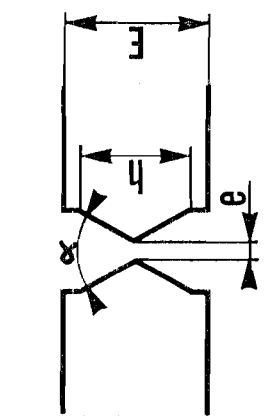
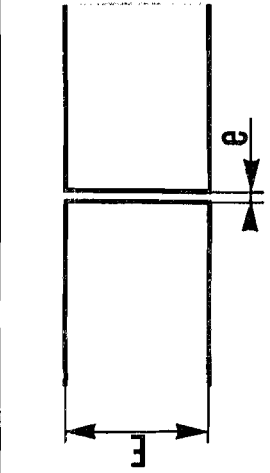
O fenômeno anteriormente citado, aliado a alto fator de penetração, possibilitaram o desenvolvimento de novas técnicas e perfis de solda.

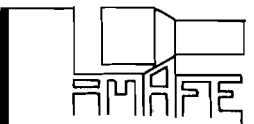
As técnicas de soldagem com aplicação de feixe de eletrons elimina a necessidade de preparação das peças, além de possibilitarem uma solda contínua e características de forma e posição que nenhum processo convencional permite, como mostram as figuras 3.5, 3.6 e 3.7.

A tabela 3.1 apresenta as comparações entre feixe de eletrons e processos convencionais (Tig/Mig) quanto à preparação.



Tabela 3.1 - Tipos de solda.

THICKNESS IN MM (E)	PREPARATION FOR FUSION WELDING	PREPARATION FOR ELECTRON BEAM WELDING
$E < 4$	 <p>$e = 1 \text{ to } 2 \text{ mm}$</p>	 <p>$e < 0,125 \text{ mm}$</p>
$4 < E < 20$	 <p>α from 60 to 80° $e = 1 \text{ to } 3 \text{ mm}$</p>	 <p>$e < 0,125 \text{ mm}$</p>
$20 < E < 40$	 <p>α from 60 to 70° $e = 3 \text{ mm}$ $\frac{E}{2} < h < 20 \text{ mm}$</p>	 <p>$e < 0,125 \text{ mm}$ E max. for copper alloys</p>
$40 < E < 60$	 <p>$e = 3 \text{ mm}$ $R = E$ $h = 4 \text{ mm}$ $\alpha = 60^\circ$</p>	 <p>$e < 0,125 \text{ mm}$</p>
$60 < E < 80$	 <p>$e = 3 \text{ mm}$ $\alpha = 60^\circ$ $\frac{E}{2} < h < 40 \text{ mm}$</p>	 <p>E max. for steels $e < 0,125 \text{ mm}$</p>



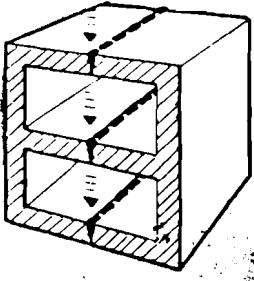
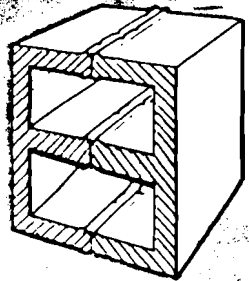
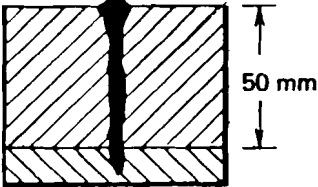

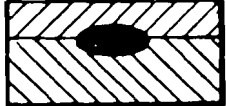
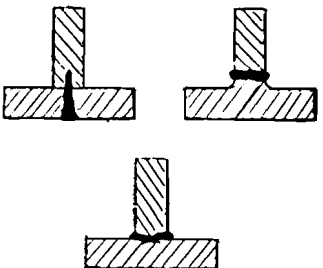
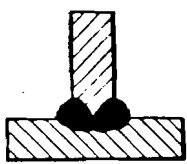
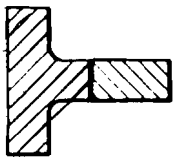

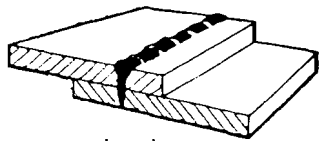
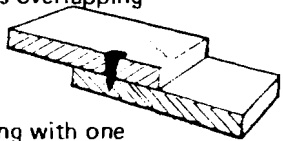

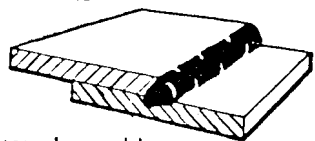
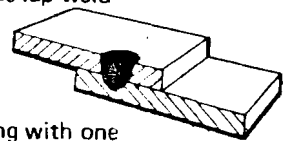

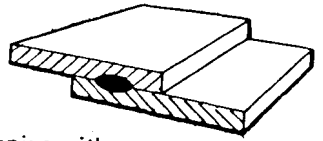
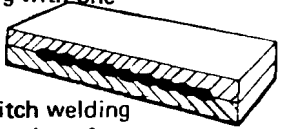
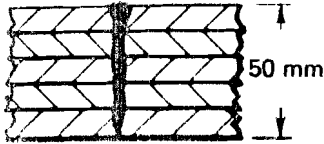


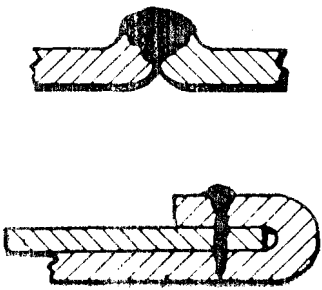
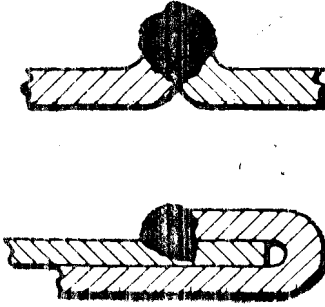
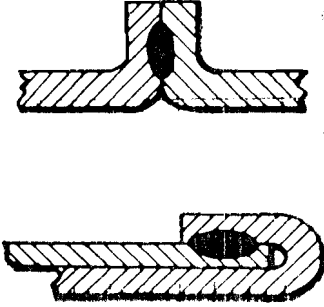
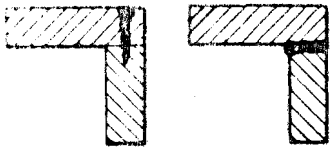
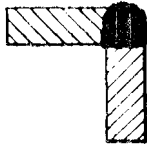









	ELECTRON BEAM	TIG/MIG	RESISTANCE
MULTIPLE BUTT-WELDING	 <p>All welds are performed in one pass</p>	<p>Not applicable</p>	 <p>All welds are performed simultaneously</p>
PENETRATION	<p>Weld through a thick metal to reach thin strip underneath.</p>  <p>Penetration of 50 mm max. in stainless steel</p>	 <p>Weld in thin material, generally 2.28 mm max.</p>	 <p>Not applicable. The weld is always made at the interface.</p>
"T"			 <p>"T" welds of small transverse sections, either flash-butt or projection welded.</p>
OVERLAPPING BUTT-WELD	<p>Butt weld</p>  <p>Continuous overlapping</p>  <p>Overlapping with one spotweld</p> 	<p>TIG butt-weld</p>  <p>Continuous lap weld</p>  <p>Overlapping with one TIG-spotweld</p> 	<p>Flash-butt welding only</p>  <p>Overlapping with one spotweld</p>  <p>Seam or stitch welding with overlapping of spotwelds</p> 



Figura 3.5 - Tipos de solda.

	E.B. WELDING	TIG/MIG	RESISTANCE
MULTIPLE THICKNESSES	 <p>50 mm</p>	 <p>Only for thin sections</p>	 <p>Only for thin plates on material of equal dimensions</p>
EDGES			
ANGLES			
JOINT PREPARATION	 <p>Butt-weld is necessary in all cases. Joint alignment and gap must not exceed .005 in.</p>	 <p>"V" joint</p>  <p>"X" joint</p>  <p>Half "U" joint</p>  <p>"U" joint</p>  <p>Double "U" joint</p>	 <p>Flash-butt weld edges can be of irregular shape.</p>  <p>For overlapping assembly, the surfaces must be in contact under pressure.</p>

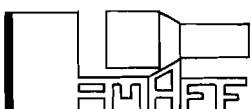


Figura 3.6 - Tipos de solda.

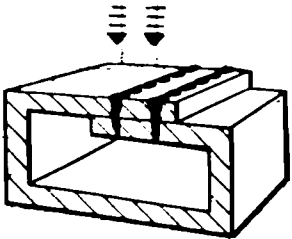
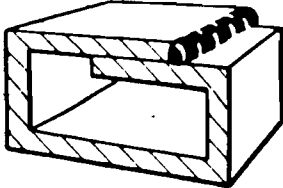
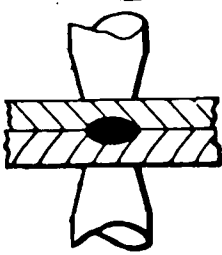
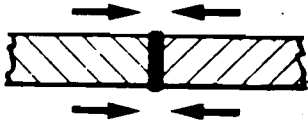

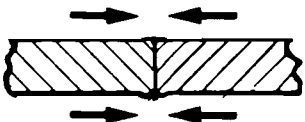
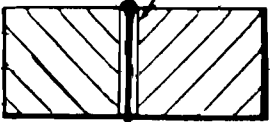


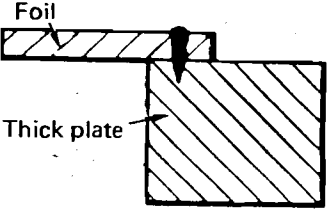
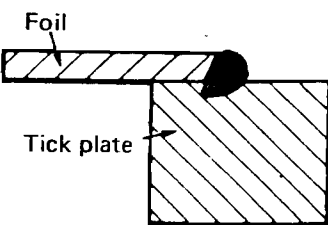
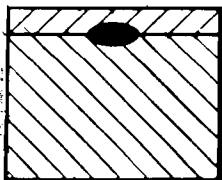
	ELECTRON BEAM	TIG/MIG	RESISTANCE
ACCESSIBILITY	 <p>COMPLETE PENETRATION ALTHOUGH ACCESS IS FROM ONE SIDE ONLY •</p>	 <p>WELD ONLY ONE SIDE * (EXCEPT FOR CERTAIN CIRCUMSTANCES)</p>	 <p>ACCESSIBILITY ON BOTH SIDES IS GENERALLY NECESSARY</p>
	 <p>NARROW WELDS OF RECTANGULAR CROSS-SECTION PRODUCE UNIFORM SHRINKAGE</p>	 <p>SHRINKAGE DIFFERENCES PRODUCE ANGULAR DISTORSION</p>	 <p>BUTT-WELDING PRODUCES LINEAR SHRINKAGE</p>
HEAT AFFECTED ZONE ON 25 mm STAINLESS STEEL - SHRINKAGE	<p>Thick weld</p> <p>Heat affected zone has reduced dimensions</p>  <p>one pass</p> <p>15.000 W - 85 cm/mn</p>	<p>Wide heat affected zone</p>  <p>Multiple passes</p> <p>4500 W - 50 cm/mn for each pass</p>	<p>(625 mm²)</p> <p>Small heat affected zone</p> 
THIN STRIP ON THIN PLATE	 <p>NON SYMMETRIC ASSEMBLIES CAN BE PERFORMED SINCE E.B. WELDING DOES NOT DEPEND ON THERMAL CONDUCTIVITY</p>	 <p>THIS ASSEMBLY IS DIFFICULT TO WELD DUE TO UNEVEN HEAT DIFFUSION</p>	 <p>MAXIMUM ASPECT RATIO 10 : 1</p>



Figura 3.7 - Tipos de solda.

3.3 - FUNDAMENTOS BÁSICOS.

Um eletrón passando por um campo elétrico e é submetido a uma força F . Esta força é descrita, negligenciando-se os efeitos relativísticos, como:

$$F = -eE = -e \frac{dV}{dX} = m \frac{dv}{dt}$$

onde: e é a carga do eletrón = -1.59×10^{-9} coulomb
 $\frac{dV}{dX}$ é a derivada do potencial elétrico V na direção X
 m é a massa do eletrón = $9,1 \times 10^{-31}$ Kg
 $\frac{dv}{dt}$ é a aceleração do eletrón

Então, multiplicando-se os dois membros por dx e integrando-se, temos:

$$- e \cdot V = \frac{1}{2} mv^2$$

onde V é a diferença de potencial a que é submetido o eletrón e $(1/2 mv^2)$ é a energia cinética adquirida pelo eletrón.

Para um fluxo de n eletróns por segundo, a equação (2) fica:

$$- enV = \frac{1}{2} nmv^2 = w$$

onde " en " é a intensidade de corrente do feixe e " w " é o poder do feixe em watts.

Em um canhão de eletróns, o feixe é focalizado na peça por campos eletrostáticos e magnéticos, que permitem alta concentração de potência no alvo. A ordem de magnitude da potência específica, definida pela razão entre a potência do feixe (w) e a seção do feixe no alvo, possibilita definir diferentes campos de aplicação do F.E.:

- para w/s menor que 10 Kw/mm^2 , F.E. é usado para fusão de metais (metalurgia).
- para w/s entre 10 Kw/mm^2 e 100 Kw/mm^2 , F.E. é usado para solda.
- para w/s maior que 100 Kw/mm^2 , F.E. é usado para usinagem.



3.4 - USINAGEM

Basicamente, o processo de usinagem por feixe de eletrons ' consiste da vaporização controlada do material da peça.

As condições de corte podem ser ajustadas em uma larga faixa, de modo a satisfazer as condições relativas a cada material da peça, profundidade e largura de corte.

Ligas de alto ponto de fusão e barras espessas são usinadas por meio de um feixe de alta densidade de potência, pulsos longos e altas frequências.

Em usinagem de cerâmicas e ligas super-duras, com tendências a trincas, deve-se usar baixa amperagem e pulsos de curta duração.

O processo permite a execução de furos e ranhuras de apenas alguns centésimos de milímetros.

Furos progressivamente maiores podem ser executados por meio da bobina de deflexão magnética ou por trepanação da peça.

Pode-se executar com facilidade furos com profundidade 20 vezes maior que o diâmetro. E furos com $L/D > 100$ podem ser executados com desvio de $D/2$, e esses furos não poderiam ser executados eficientemente por nenhum outro método.

Em comparação com o processo Laser, a profundidade dos danos causados pelo calor, é menor no processo por feixe de eletrons.

Outras aplicações:

- Usinagem precisa de válvulas eletrônicas.
- Calibragem de resistores.
- Vaporização e deposição de finas películas de metais com alta pureza.
- Tratamento térmico com profundidade variável controlada.

Principais vantagens e desvantagens do feixe de eletrons:

- Vantagens:
 - . Capacidade de executar furos e rasgos muito pequenos, com alta precisão em curto tempo.
 - . Capacidade de soldar e usinar qualquer material conhecido.
 - . Capacidade de executar furos e rasgos profundos, não executáveis com qualquer outro processo.
 - . Executar soldas de alta pureza.



- . Ausência de contato mecânico entre a peça e a ferramenta.
 - . Facilidade de automatização das operações de usinagem e solda.
- Desvantagens:
- . Equipamento de alto custo e necessidade de operador especializado.
 - . Aplicação limitada pelas dimensões da câmara de trabalho.
 - . Baixa taxa de remoção de material nas operações de usinagem.
 - . Necessidade de efetuar vácuo ou utilizar gás inerte.
 - . Furos não muito uniformes e possibilidade de ruptura dielétrica em material não condutor de eletricidade.

3.5 - EMISSÃO DE RAIOS X

O impacto entre eletrons e metal, em adição à geração de calor, produz raio X.

Efetivamente, deve-se proteger o operador da exposição a esses raios.

As paredes da câmara de vácuo com espessuras de em média 12 mm, absorvem os raios emitidos pela voltagem de até 60 Kv, pois o coeficiente de absorção de radiação é inversamente proporcional ao cubo da voltagem de aceleração.

Deve-se medir a dose de radiação em uso de voltagem acima de 60 Kv e o possível "viciamento" do equipamento.

A dose de radiação emitida por uma voltagem de 100 Kv é aceitável ao corpo humano, desde que a exposição não seja contínua e que a atmosfera em torno seja sempre renovada.

A razão de emissão de raio X é da ordem de 5% da potência do feixe.

3.6 - ENERGIA REQUERIDA PARA VAPORIZAÇÃO

G = razão de remoção de material.

$$G = \eta \cdot P/W \quad (\text{cm}^3/\text{s})$$

onde:



P = Potência (watts)

W = Energia específica para vaporização do metal (Joule/cm³)

η = Eficiência

$$W = [C. (T_m - 20^\circ\text{C}) + C (T_B - T_m) + H_f + V_v]$$

onde:

C = Calor específico

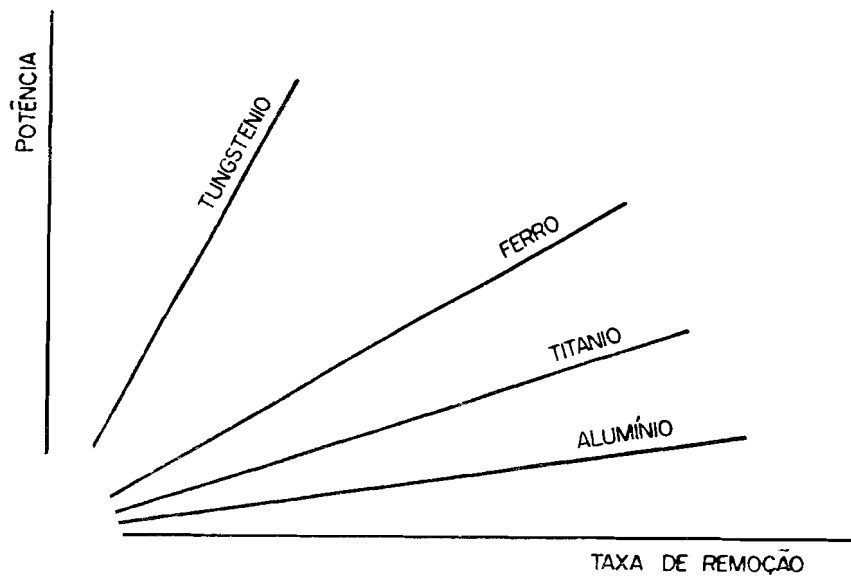
T_m = Temperatura de fusão

T_B = Temperatura de ebulição (vaporização)

H_f = Calor de fusão

H_v = Calor de vaporização

As quatro figuras apresentadas a seguir mostram aplicações do feixe de eletrons.

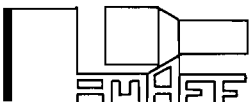
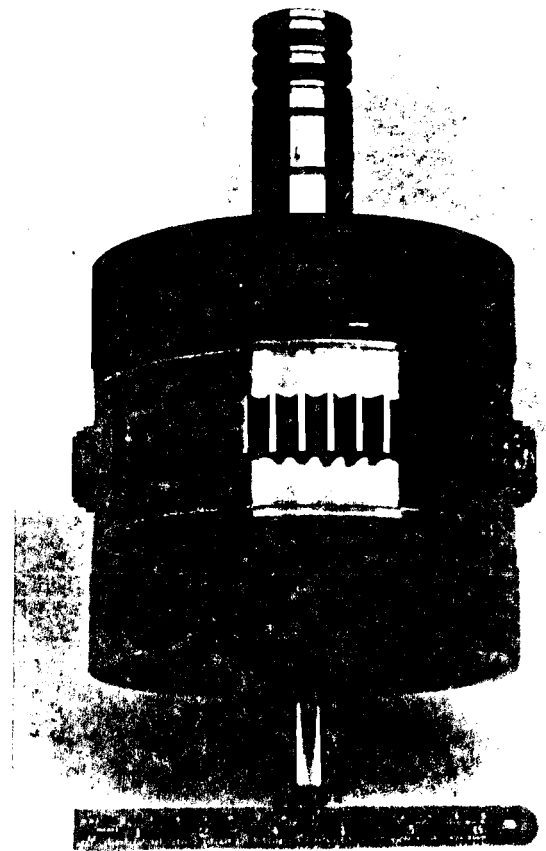
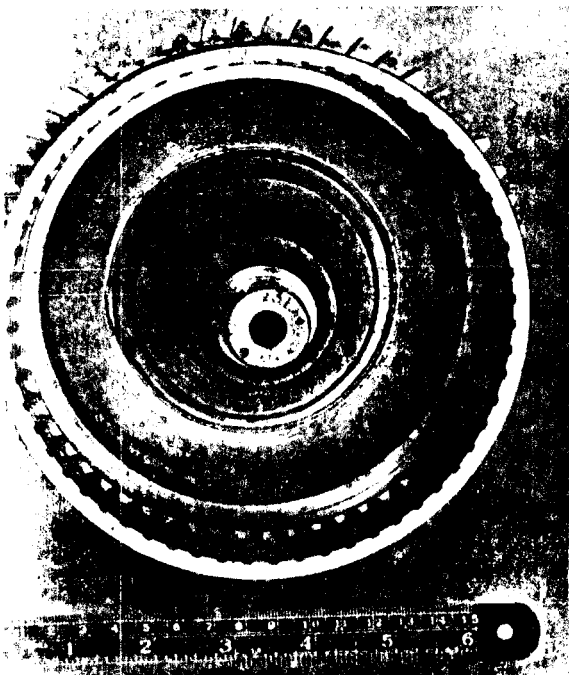
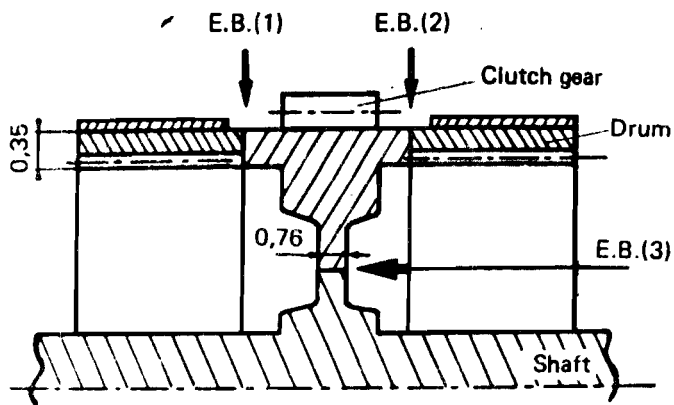


CLUTCH

assembly of clutch gear, clutch drums and forward shaft.

MATERIAL : SAE 8620 STEEL

The assembly was performed with three butt welds :
 a circumferential weld : drum to gear assembly
 a circumferential weld : drum to gear assembly
 an annular weld : shaft to gear assembly

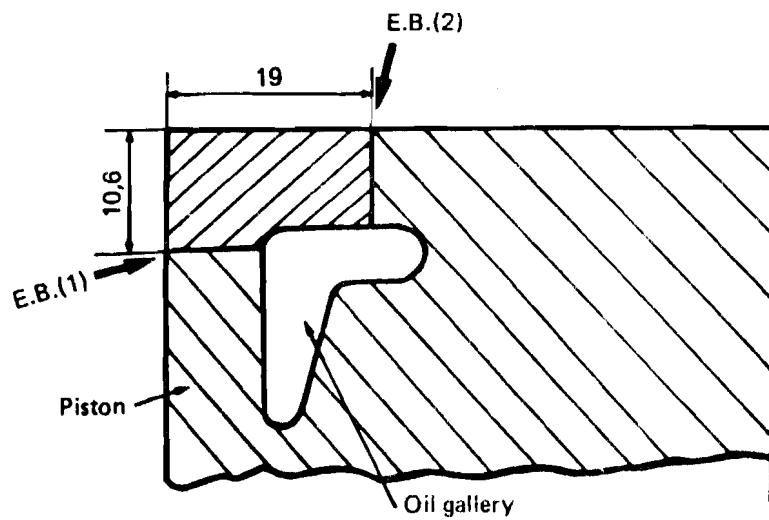


DIESEL TRUCK PISTON

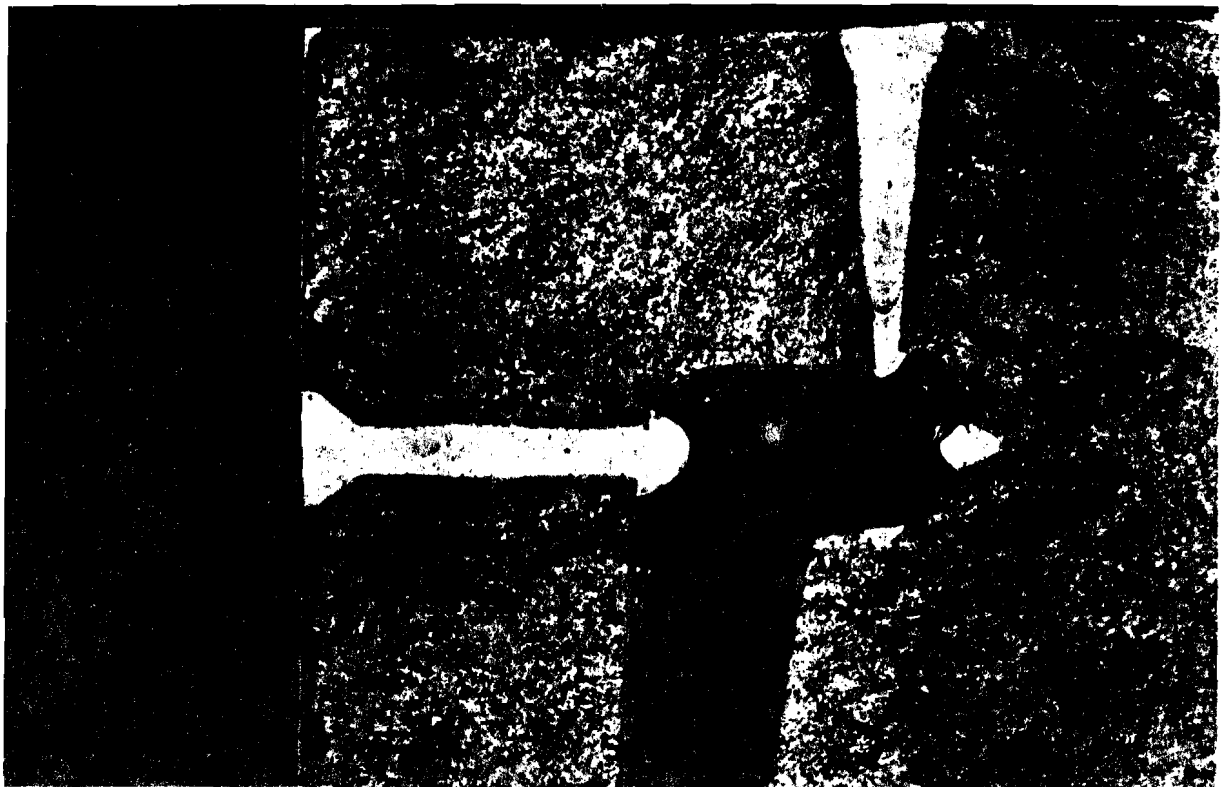
Assembly of cast aluminium piston and oil gallery closure ring.

MATERIAL : APEX RED X-20 CAST ALUMINIUM

The assembly was performed with a circumferential square butt weld and an annular square butt weld.



Macro-section of the weld



CENTER WING-BOX OF THE F-14 A

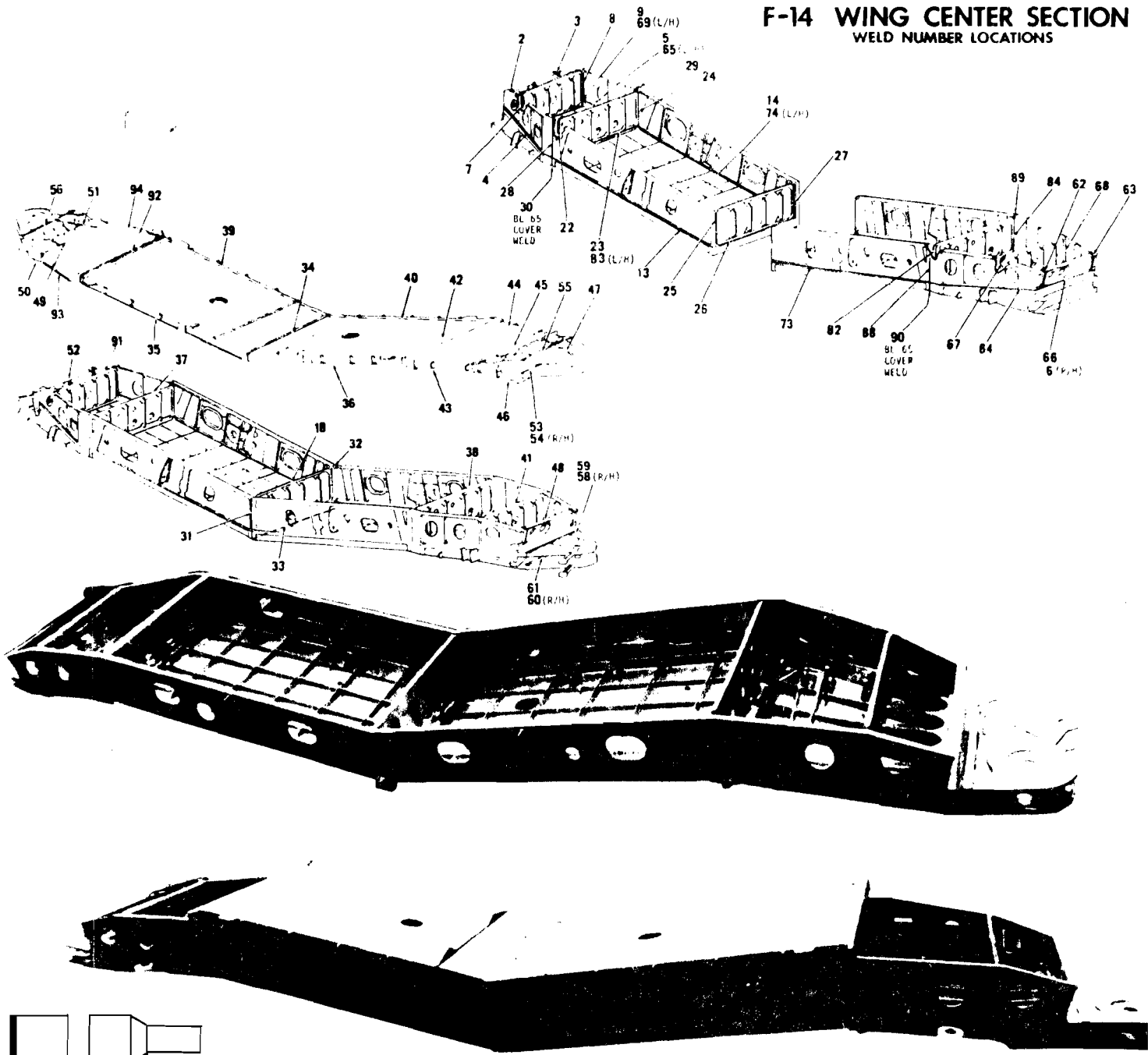
Assembly of the 31 plates with 90 E.B. welds produce the wing-box.

MATERIAL : FORGED TITANIUM ALLOY

The center wingbox of the Grumman F-14, a variable wing aircraft, is a vital structural part whose ends serve as pivots for the wings.

The basic rectangular section is assembled by electron beam welding to join the various bases, webs and walls. This technique, permitting a very substantial weight reduction, is the only one which could produce these assemblies with super strength and close tolerances. In view of the piecepart size, welding was performed in very large chambers similar to that shown on page 123.

F-14 WING CENTER SECTION
WELD NUMBER LOCATIONS



SATURN LAUNCHER "Y" RING ASSEMBLY

Welding of segments for the manufacture of 4 large rings to be used for joining the cylindrical sections to the domes and fuel - oxidizer tank skirts in the S-1C stage.

MATERIAL : ALUMINIUM ALLOY : 2219

10 metre dia. - ring - thicknesses range from 9.6 to 59,6 mm - height : 700 mm

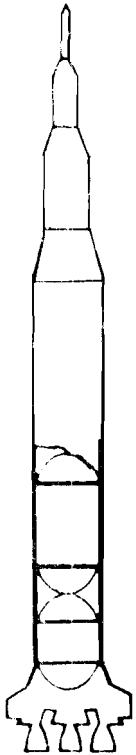
The various sections of the "Y" ring are handled and positioned in an E.B. welder where they are clamped around the area to be butt-welded.

Due to variations in "Y" ring cross-section thickness from 9.6 to 59.6 mm, it was necessary to determine beam parameters for current and voltage programming so that a satisfactory weld could be achieved on full length of the ring. The weld was performed at constant speed, beam power being programmed in relation with ring thickness.

Welding parameters :

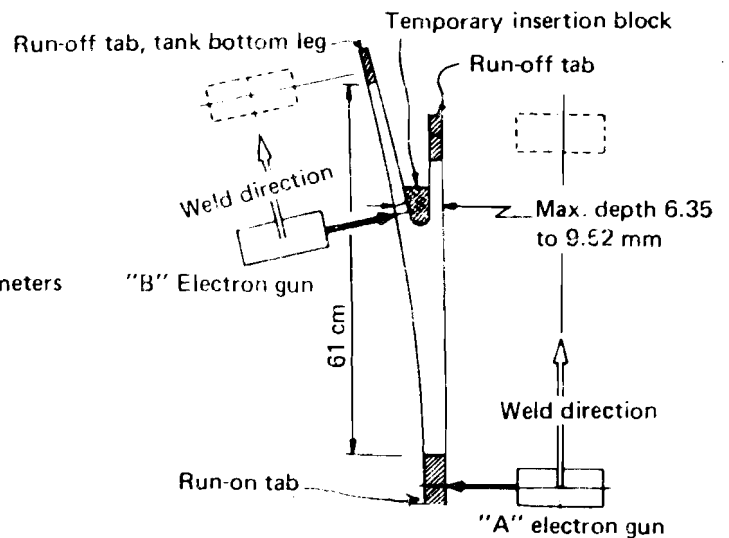
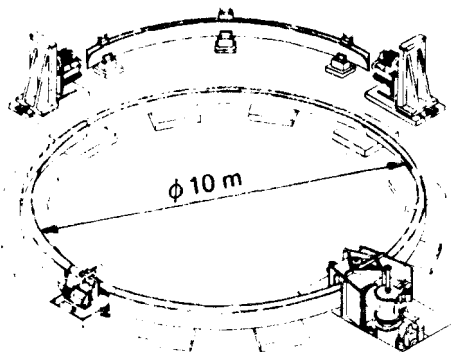
Welding speed : 1.08 metre/minute

Power : 30 kW for 59.6 mm - (30 kV, 500 mA)



Relation between E.B. welding parameters and "Y" ring section thicknesses

Cross-sectional view of Y ring
Welding arrangement



4. LASER

A sigla L.A.S.E.R. (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) representa um feixe de luz de alta energia.

4.1 - PRINCÍPIOS FÍSICOS

Como muitos dos processos avançados, os princípios fundamentais de um Laser devem ser explicados em nível atômico.

Um elétron orbital de um átomo pode pular para um nível mais alto de energia por absorção de um quantum de energia de estimulação, e quando emite ou irradia a energia absorvida, simultaneamente o elétron cai de volta à sua órbita original ou a um nível intermediário.

Se, enquanto o átomo está em um estado de excitação, outro quantum de energia for absorvido pelo elétron, 2 quanta de energia são irradiados e o elétron cai para um nível de energia menor, (ver figura 4.1).

A energia radiativa tem precisamente o mesmo comprimento de onda que a energia de estimulação.

Como resultado, a energia de estimulação é a base da operação do Laser.

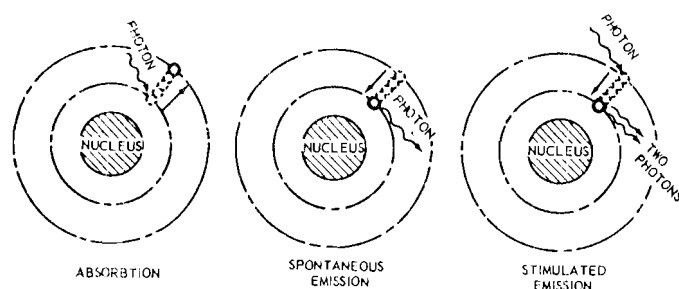


Figura 4.1 - Processo de emissão estimulada.

A diferença entre o Laser e a luz comum, é que nesta os átomos irradiam individualmente e ao acaso, ao passo que no Laser, os átomos são "acoplados" e irradiam juntos. A energia radiante tem o mesmo comprimento de onda que a energia estimulante e está em fase com ela.



A fonte emissora pode ser um rubi sintético estimulado por lâmpada xenon de luz instantânea (lâmpada

Flash).

Colocando-se a fonte emissora numa cavidade ótica e usando-se espelhos para concentrar a luz (ver figura 4.2), a energia é capturada na fonte e vai sendo submetida a sucessivas reflexões internas, até que um feixe de luz altamente amplificado é emitido.

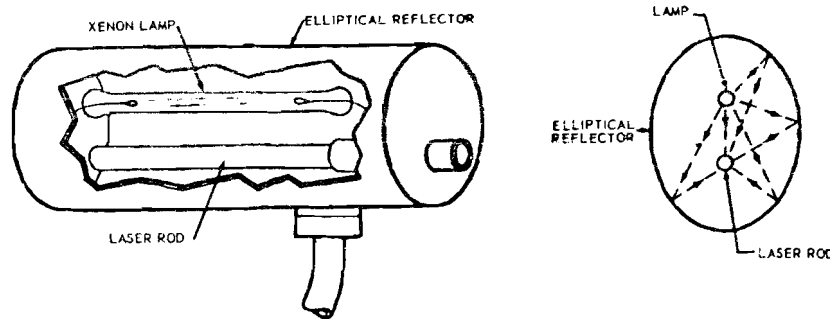


Figura 4.2 - Tubo Laser.

Esta luz é dita "coerente" por ser monocromática, enquanto que a luz comum é "incoerente", pois consiste de uma combinação de frequências.

As principais propriedades do Laser e suas aplicações são:

- Retilidade do feixe e velocidade de propagação - alinhamentos precisos, interferometria e medida de distância.
- Geração de calor pela focalização do feixe-corte, solda, microusinagem, tratamento térmico, vaporização (ex.: Balanceamento preciso de rotores).

Os quatro tipos de Laser atualmente em operação e os meios ativos mais utilizados são:

- Estado sólido: Rubi ou vidro com neomídio.
- Estado gasoso: CO_2 , HeNe
- Estado líquido: Soluções aquosas com corantes.
- Semicondutores: Compostos de Gálio.

As características fundamentais de cada tipo de Laser determinam o seu campo de aplicação prática. Entretanto, cada tipo envolve a geração e emissão de um bem definido e estreito feixe de luz coerente, dirigido ao longo de um eixo retilíneo, e concentrado por meio de lentes num determinado ponto da peça em trabalho, conforme a figura 4.3.



Somente os mais poderosos e seguros dos vários tipos de Laser são apropriados para solda e usinagem. Os materiais mais largamente utilizados para o bastão Laser são os de estado sólido e gasoso. Os Laser industriais de alta potência (10 Kw) geralmente são de CO_2 e os de baixa potência (metrologia) são de HeNe .

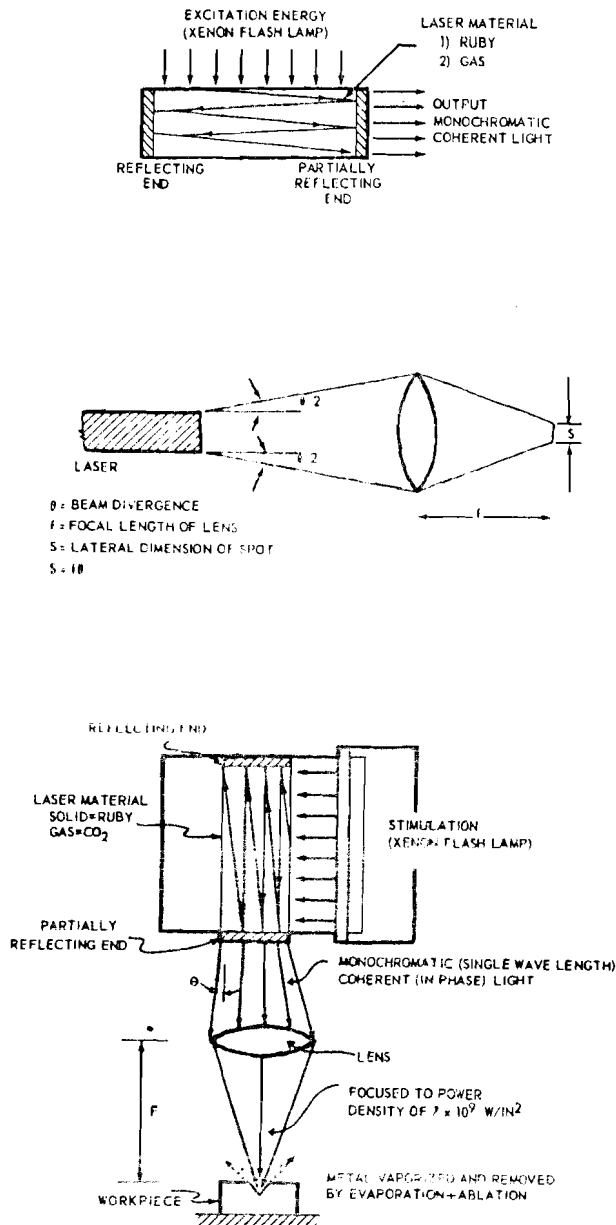


Figura 4.3 - Sistema Laser.

O equipamento adicional necessário para executar operações de solda e usinagem, inclui um microscópio triocular para observação da peça a ser trabalhada e focalizar o feixe, além de uma mesa móvel de 3 coordenadas.



A densidade de potência da ordem de 1.000 Kw/mm^2 , obtida com vários tipos comerciais de Laser, permite a vaporização de todos os materiais atualmente conhecidos (Ex.: furos em matrizes de dia mante para extrusão de fios).

Variando-se a densidade de potência (frequência do Flash da lâmpada, diâmetro do furo de saída, espelhos), pode-se realizar o perações de solda, corte e usinagem.

4.2 - APLICAÇÕES PRÁTICAS DO LASER

4.2.1 - Solda de materiais metálicos e não metálicos.

As grandes aplicações práticas do Laser neste campo são devidas a grande velocidade de aplicações de calor e a proprieda de de atravessar superfícies com transparência ótica, sem pratica mente afetá-las. Um exemplo típico da utilização da grande velo cidade de aplicação de calor, é a solda em peças de cobre onde as soldas convencionais aqueceriam outras partes da peça, inutilizan do-a. A propriedade de atravessar superfícies com transparência' ótica possibilita por exemplo, a recuperação de válvulas de alto custo, soldando grades ou ligações interrompidas dentro do seu in vólucro de vidro.

4.2.2 - Usinagem.

Neste caso, na região atingida pelo Laser há uma vapori zação do material, pela aplicação de calor concentrado.

Na usinagem é necessário uma pulsação curta e de alta intensidade, para minimizar a profundidade da zona afetada pelo calor e manter um bom controle dimensional.

No estágio atual do desenvolvimento do método Laser pa ra aplicação em operações de usinagem, sua utilização só é justi ficada em aplicações excepcionais, que envolvam aplicações mi croscópicas ou de alta precisão, difíceis de serem executadas por outros métodos.

Embora possa ser aplicada a vários metais ou ligas metá licas, inclusive metal duro, seu maior emprego tem sido em mate riais cerâmicos.

As características dimensionais típicas de furos produzidos por Laser são:



- precisão dimensional $\pm 0,003$ mm
- raio de canto 0,03 mm
- conicidade 5%

A aplicação do Laser na operação de corte de perfis em ligas superduras e inox (que não podem ser expostos muito tempo ao calor) apresentou ótimos resultados, tanto pela qualidade do corte (precisão), como pela velocidade de corte, repetibilidade do processo, mínima perda do material e baixo custo unitário, tendo sido adotado pela indústria aeroespacial. Ver tabela 4.1.

A fácil automação do processo Laser, permitida pela segurança do método, multiplicação dos pontos de aplicação para uma mesma fonte, possibilitou o desenvolvimento de sistemas C.N.Laser para soldas múltiplas, grandemente utilizado na indústria automobilística.

Balanceamento de rotores. Devido a taxa constante de remoção de material em cada pulso, é possível balancear rotores com alta precisão, enquanto o mesmo está girando. O acoplamento e a coordenação da emissão das pulsações é feito por um transdutor que determina a posição da massa desequilibrada.

Principais vantagens:

- Ausência de contato direto e grandes esforços entre a peça e a ferramenta.
- Aplicação em qualquer material conhecido.
- Capacidade de operar através de ar, gases inertes, vácuo, líquidos e sólidos com transparência ótica.
- Precisão e capacidade de executar furos e cortes de pequenas dimensões.
- Conveniência para o corte de cerâmica e outros materiais sensíveis ao choque.
- Possibilidade de controle da taxa de remoção de material da peça.

Principais desvantagens:

- Alto investimento de capital e custo de operação.
- Baixa taxa de remoção de material.
- Baixo rendimento na conversão de energia elétrica em calor ($CO_2 \approx 20\%$).
- Necessidade de operador especializado.



Tabela 4.1 - Condições do processo.

Thick, in.	Sample Best . Cut Power, kW	Speed, ipm	Jet Pressure, psig	Approx. Kerf, in.		HAZ, in.	
				Top	Bottom	Top	Bottom
	Oxygen Jet Assisted						
0.125	0.75	50	75	0.032	0.052	0.008	0.013
0.125	1.50	70	120	0.035	0.041	0.0035	0.011
0.125	3.00	130	120	0.027	0.042	0.0075	0.025
0.125	6.00	200	200	0.021	0.024	0.004	0.014
0.125	1.50	45	200	0.040	0.043	0.0045	0.012
0.25	3.00	70	150	0.047	0.058	0.003	0.014
0.25	6.00	100	180	0.061	0.063	0.006	0.045
0.38	3.00	30	200	0.055	0.129	0.004	0.038
0.38	6.00	60	200	0.054	0.125	—	—
	Carbon Dioxide Jet Assisted						
0.125	1.50	50	100	0.016	0.014	0.0105	0.025
0.125	3.00	80	120	0.013	0.015	0.007	0.0255
0.125	6.00	100	250	0.020	0.016	0.0005	0.0315
0.25	3.00	15	200	0.021	0.030	0.024	0.033
0.25	6.00	30	200	0.025	0.025	0.022	0.033
0.38	6.00	18	350	0.025	.01-.14	0.015	0.057
	Nitrogen Jet Assisted						
0.125	3.00	80	200	0.020	0.022	0.005	0.014
	Air Jet Assisted						
0.125	3.00	80	200	0.024	0.014	0.0085	0.0205

Os Laser de baixa potência (500w), não apresentam perigo ao contato com o corpo (deve-se apenas evitar que o foco se concentre na retina, pois poderá causar problemas na vista), mas, deve-se evitar qualquer contato com os Laser de alta potência. Não existem perigos de radiação venenosa, pois a maioria dos Laser concentram-se na faixa do infra-vermelho.

A figura 4.4 mostra a variação do custo do equipamento em relação à potência.

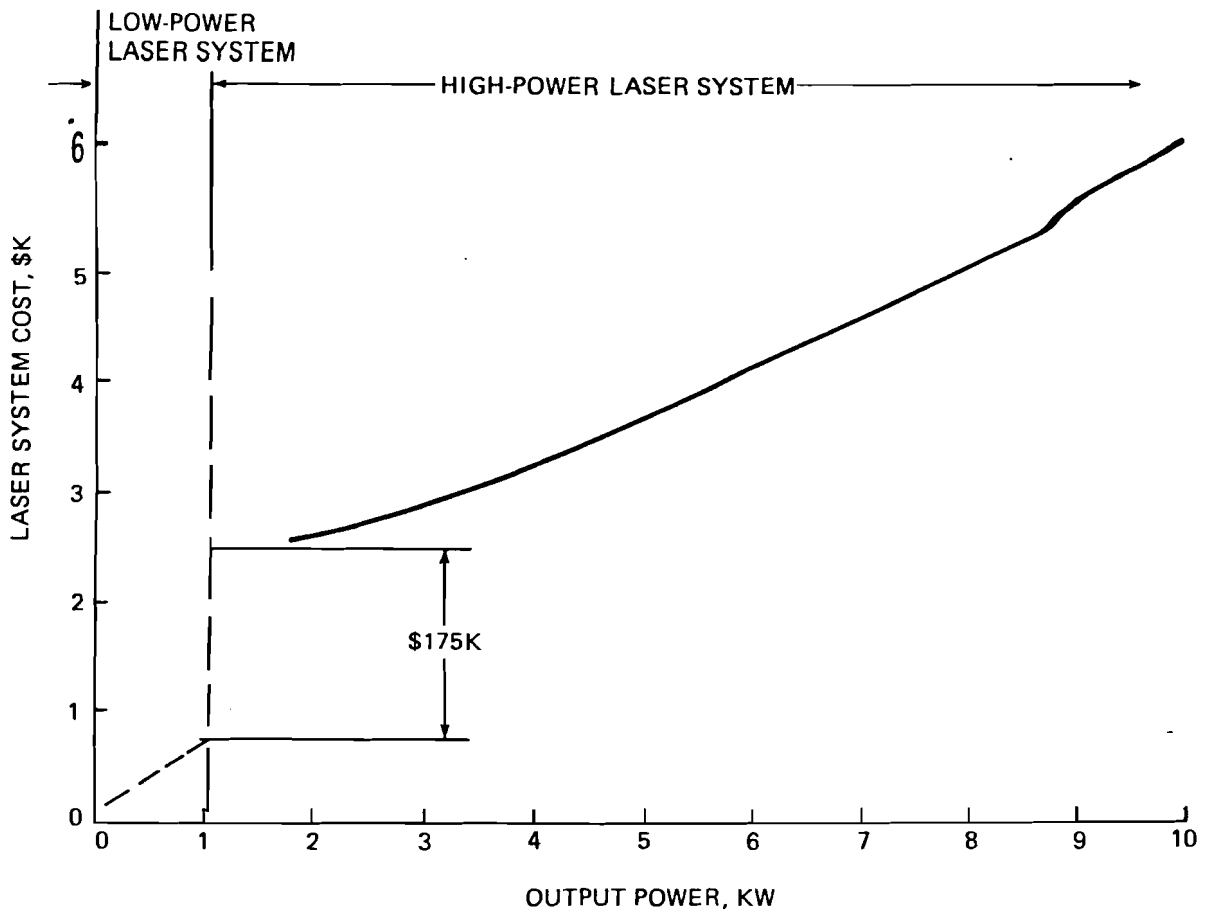


Figura 4.4 - Custo do equipamento.

5 - USINAGEM POR ARCO PLASMÁTICO

5.1 - GENERALIDADES

O plasma é definido como um gás que foi aquecido a uma temperatura suficientemente alta para iniciar uma ionização parcial. A maioria dos aparelhos utilizam um arco elétrico para aquecer o gás até o estado de plasma e existem desde o ano de 1900. Entretanto, o refinamento destes aparelhos para desenvolver equipamento comercial de plasma para corte de metal, data do ano 1960.

Corte por plasma refere-se ao corte de metal realizado por um tipo de "tocha de oxigênio". As primeiras aplicações do corte por arco plasmático (C.A.P.) foram em metais de corte difícil como: aço inox, monel e super ligas. A operação é normalmente usada para cortar a modelagem superficial em placas ou barras onde o fluxo de oxigênio cortante penetra inteiramente através da espessura do metal, isto pode ser usado em várias operações.

E fica então evidente que equipamento muito simi



lar pode ser efetivamente usado para substituir operações de usinagem convencional tais como: torneamento, serramento e plainamento.

5.2 - PRINCÍPIOS DO PROCESSO

No C.A.P., o plasma básico é gerado pela sujeição de um volume de gás ao bombardeamento de eletrons gerados por um arco - elétrico. Os eletrons em alta velocidade colidem com as moléculas diatômicas, provocando a ionização dos átomos. A figura 5.1 mostra um arco onde o cátodo está no gerador de plasma e o anodo na peça obra. O gás que formará o plasma é forçado através de um bico restritor com um duto, de maneira a conseguir um arco estabilizado. A constrição do gás no bico, produz uma alta velocidade de saída e uma alta temperatura.

O fenômeno básico de aquecimento que tem lugar na peça é uma combinação do aquecimento do anodo através do bombardeamento direto de eletrons, mais o aquecimento por convecção proveniente da alta temperatura do plasma que acompanha o arco. Em alguns casos é desejável obter-se uma terceira fonte de calor através da injeção de oxigênio na área de trabalho e conseguindo vantagens na reação exotérmica de oxidação (Ver figura 5.2).

Para um C.A.P. otimizado em operações de corte ou usinagem, acima de 45% da potência elétrica consumida pela tocha é efetivamente usada para remover material da peça-obra.

A figura 5.3 mostra os itens completos de um C.A.P. O circuito de água fria é necessário para manter a temperatura adequada do eletrodo gerador de plasma.

Normalmente o material do cátodo é o tungstênio.

O gás para formação do plasma normalmente não inclui oxigênio e o principal fator para escolha do gás é a taxa de remoção, sendo que a mistura de Nitrogênio com 20% de Hidrogênio propicia a máxima taxa de remoção de material. A figura 5.4 apresenta a relação entre a área do bico restritor e a taxa de remoção de material, para várias combinações de gás.

A figura 5.5 apresenta a interrelação entre os vários fatores envolvidos em torneamento por arco plasmático.



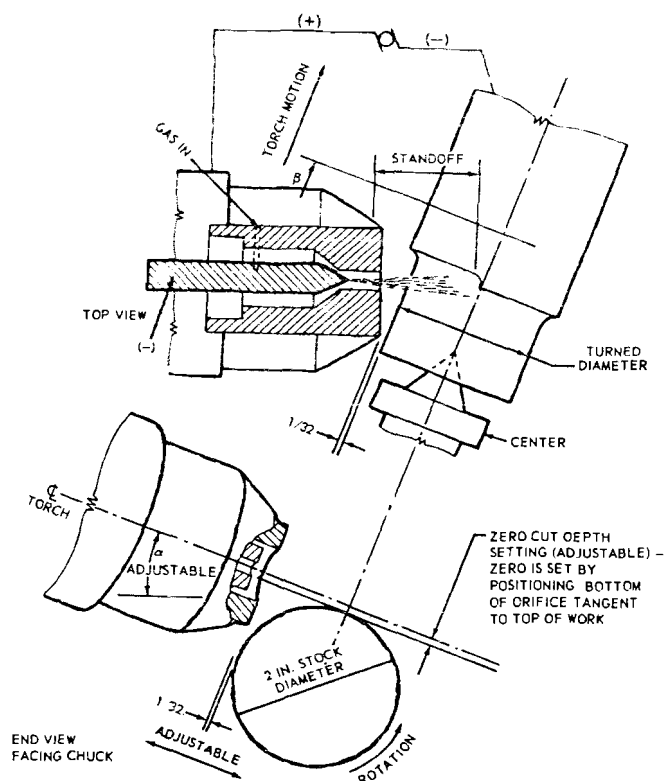


Figura 5.1 - Torneamento por plasma.

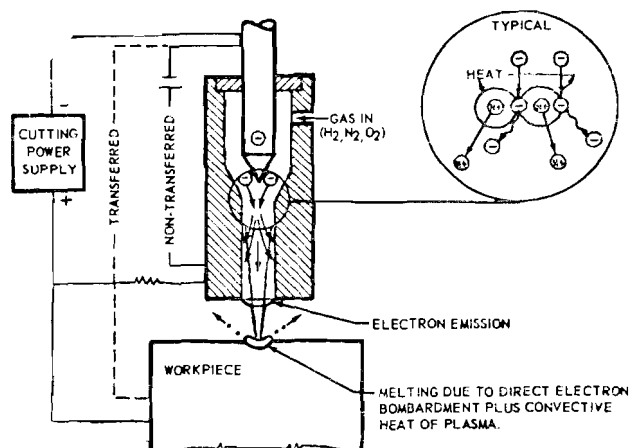


Figura 5.2 - Esquema de uma máquina de arco de plasma.

A principal vantagem do C.A.P. é que ele é um processo igualmente efetivo para usinagem de qualquer metal de quaisquer durezas e de materiais refratários, além do fato de não haver acoplamento físico entre a ferramenta (tocha) e a peça. Outra grande vantagem é o baixo custo do equipamento, que pode ser adaptado em máquinas convencionais.



A principal desvantagem é a alteração das características metalúrgicas da superfície das peças, efeito

que pode ser atenuado com uma posterior remoção de uma camada de 1,25 mm da superfície da peça.

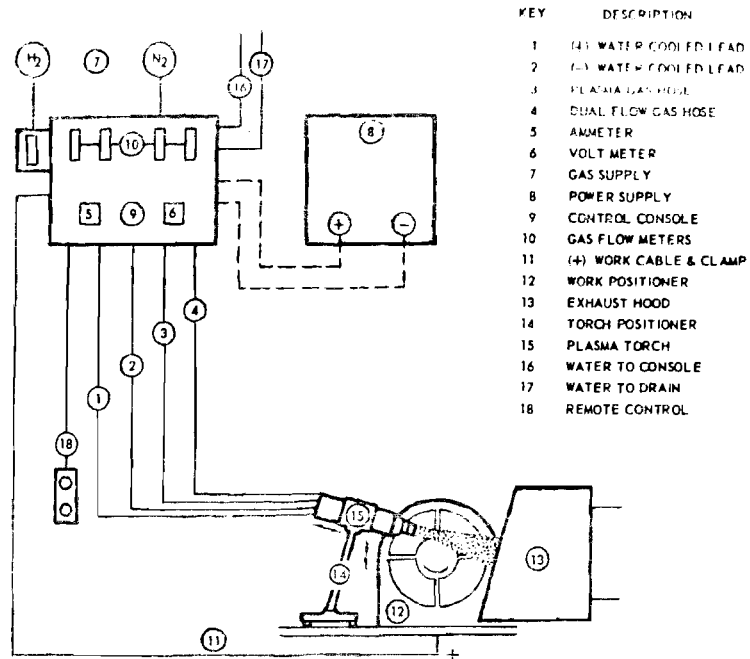


Figura 5.3 - Equipamento C.A.P.

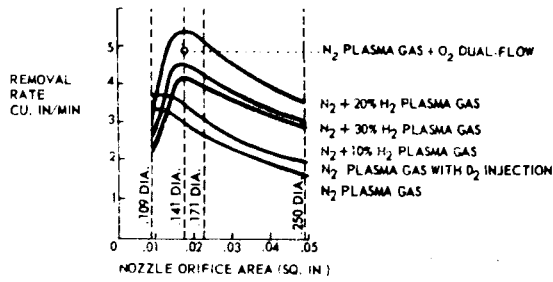


Figura 5.4 - Tipos de gás.

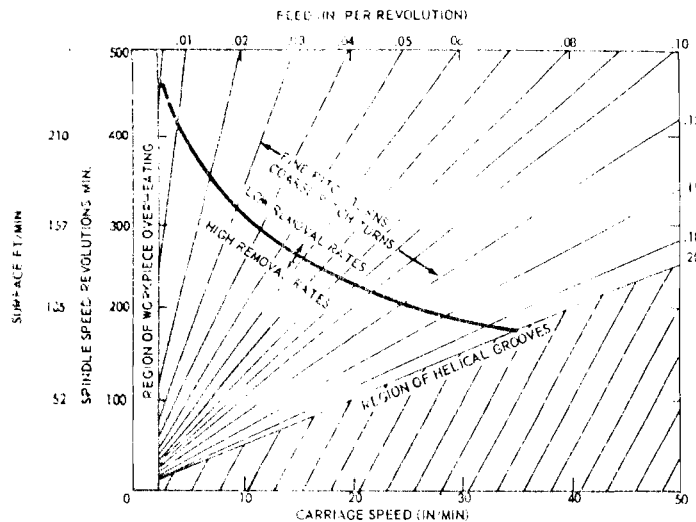


Figura 5.5- Interrelação dos fatores.



6 - JATO ABRASIVO

6.1 - GENERALIDADES.

O corte por jato abrasivo (CJA) difere do convencional jato de areia por utilizar um abrasivo muito fino e por ter os parâmetros do processo e ação de corte cuidadosamente controlados. O processo pode ser usado para cortar metais de elevada dureza, materiais brutos (germanio, silício, mica, vidro e cerâmica) em operações de corte, acabamento e limpeza. O processo é inerentemente livre de problemas de trepidação e vibração pois a ferramenta não tem contato com a peça. A ação de corte é a frio pois o gás transportador também serve como um resfriador.

6.2 - PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO

No jato abrasivo, o material é removido da peça-obra pela aplicação de um jato de gás em alta velocidade contendo finas partículas abrasivas. Os elementos que podem ser encontrados em uma aplicação típica são mostrados esquematicamente na figura 6.1.

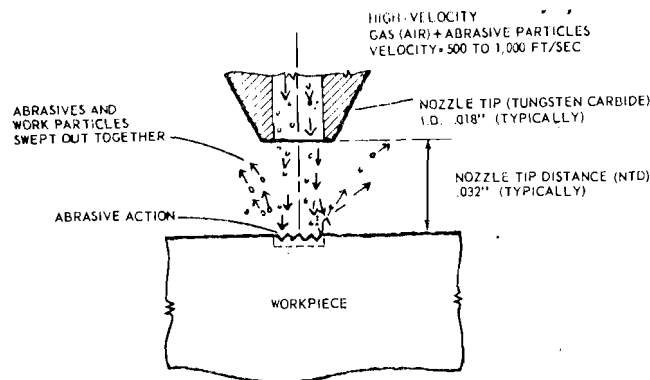


Figura 6.1 - Corte por jato abrasivo.

Características do processo:

- Abrasivo - 0,025 mm de diâmetro.
- Gás (ar) a uma pressão de várias atmosferas.
- Diâmetro do bico - 0,075 a 0,45 mm.
- Distância entre a peça e o bico - 0,82 mm.
- Velocidade do gás - 150 a 350 m/s.



6.3 - PARÂMETROS DO PROCESSO

Os critérios usados para avaliar o processo são: taxa de remoção de material, geometria do corte, rugosidade superficial e razão de desgaste do bico. Entre as muitas variáveis que influem nesses resultados estão:

1. abrasivo - composição, resistência, tamanho, forma e razão de fluxo de massa.
2. gás - composição, pressão e velocidade.
3. bico - geometria, composição, distância e inclinação à superfície de trabalho.

6.4 - ABRASIVOS

O óxido de alumínio é o abrasivo preferido em muitas aplicações, e o carboneto de silício é utilizado em aplicações especiais. É importante que as partículas de abrasivos tenham ângulos agudos.

O tamanho das partículas é importante, e os melhores resultados em corte tem sido obtidos quando o tamanho das partículas varia entre 15 e 40 micra.

São utilizados pós específicos para limpeza, acabamento e polimento, tais como:

1. limpeza leve e acabamento - dolomita.
2. limpeza extra-fina - bicarbonato de sódio tratado.
3. polimento - micro-partículas de vidro.

A re-utilização do pó abrasivo não é recomendada, não só porque a eficiência da ação abrasiva decai muito, como também porque a contaminação do pó pode provocar um alto desgaste no bico.

Para cada combinação de pó, bico, distância entre peça e máquina, existirá uma máxima taxa de remoção, isto é, existirá um fluxo com densidade ideal de pó abrasivo, e a figura 6.2 mostra-nos isto.



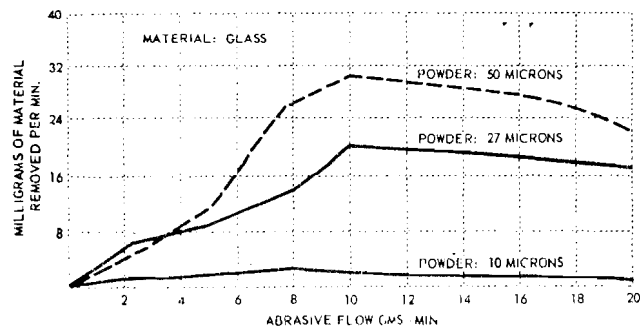


Figura 6.2 - Comparação dos efeitos da densidade do pó na taxa de remoção.

6.5 - GÁS

O corte por jato abrasivo é operado a pressões de 30 a 120 Pa, dependendo do tipo de trabalho executado.

A figura 6.3 mostra-nos a relação entre a pressão do bico, e a taxa de remoção de material.

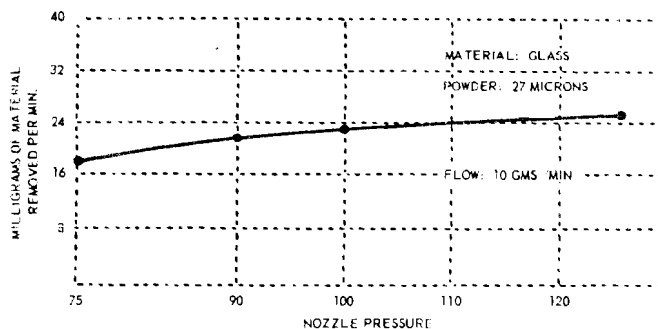


Figura 6.3 - Pressão X Remoção.

6.6 - BICO

Os bicos de descarga são feitos de carboneto de tungstênio e de safira. Para operações normais, é preferida uma abertura de descarga com área da seção transversal entre $0,0001 \text{ mm}^2$ e $0,00036 \text{ mm}^2$. Configurações típicas de bicos são mostradas na tabela I e figura 6.4



Tabela I - Tamanho e materiais de bicos.

Round Orifice (in.)	Material	Rectangular Orifice (in.)	Material
.07 diameter	carbide	.004 x .020	carbide
.08 diameter	sapphire	.006 x .020	carbide
.11 diameter	carbide	.006 x .060	carbide
.15 diameter	carbide	.006 x .075	carbide
.18 diameter	sapphire	.006 x .100	carbide
.26 diameter	carbide	.007 x .125	carbide
.26 diameter	sapphire	.010 x .030	carbide
.32 diameter	carbide	.026 x .026	carbide

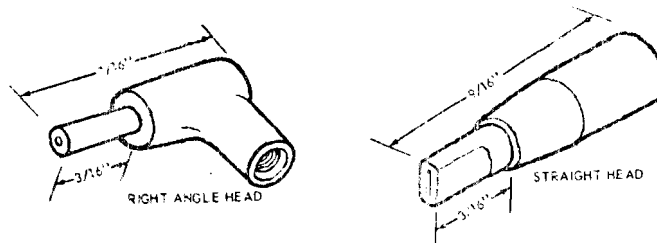


Figura 6.4 - Geometria dos bicos.

A vida útil de um bico de carboneto de tungstênio fica entre 12 e 30 horas de operação. Bicos de safira, quando usados com pó de até 27 micra tem uma vida útil de até 300 horas.

A distância entre o bico e a peça-obra deverá ser estabelecida em função do ângulo de dispersão do jato abrasivo, que é de aproximadamente 7° . A figura 6.5 mostra-nos a influência da aproximação do bico à peça.

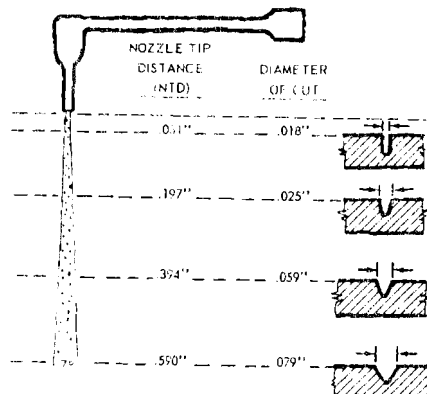


Figura 6.5 - Corte com bico de 0.018 mm.



6.7 - APLICAÇÕES

A aplicação do jato abrasivo em limpeza e acabamento, proporciona bons resultados e baixo custo, o uso de pó de 50 micra permite obter rugosidades de 38 a 55 micro inch e pó de 40 microns ' permite obter rugosidades de 6 a 8 micro inch.

O quartzo, a safira, a mica, o vidro e outras estruturas cristalinas podem ser cortadas e modeladas pelo jato abrasivo.



7- BIBLIOGRAFIA

1. Non-Traditional Machining Process - ASTME - 1967
2. Tool & Manufacturing Engineers Hand Book
SME - 3ª edição 1976
3. Tecnologia Mecanica - G. F. Micheletti
4. Usinages Par Procédés Non Conventionnels
C. Marty, Ed. Masson et Cie
5. Electron Beam Welding
SCIAKY - Edition Anglaise
6. Electron Beam Welding
M. J. Fletcher - Mills & Boon Limited

