

PROCESSOS DE MANUFATURA DISCRETA – SEP-0283

Introdução aos processos não-convencionais de fabricação

Notas de Aulas v.2023 - material exclusivo para apoio didático as aulas das disciplinas SEP0283

Arthur Jose Vieira Porto

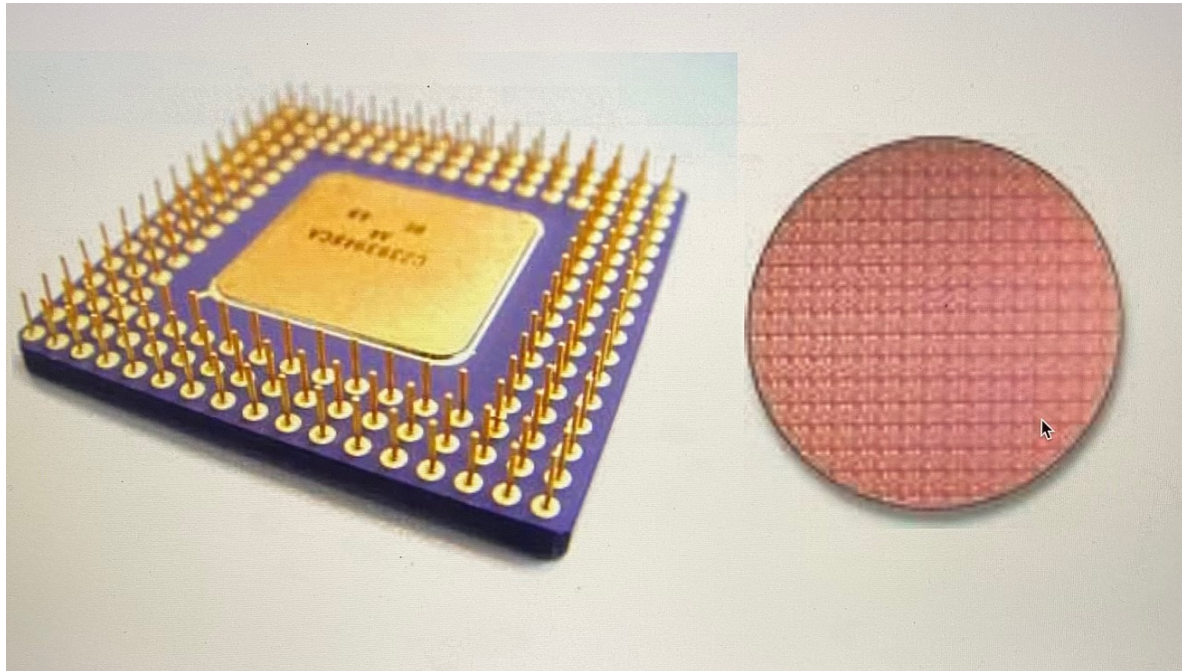
Objetivos da aula

Apresentar as principais características do processos não-convencionais de usinagem

1. Introdução

Processos não-convencionais de usinagem

- Processos onde a **remoção de material não se dá pela formação de cavaco**;
- Fragilidade do material: peça **muito flexível ou delicada para resistir as forças** de usinagem;
- **Limitações** quanto a **distorção e aquecimento** da peça (tensões residuais e trincas);
- Dimensões e qualidades manométricas da peça (por exemplo produção de um microprocessador – chip)



1. Introdução

Precisao dos processos

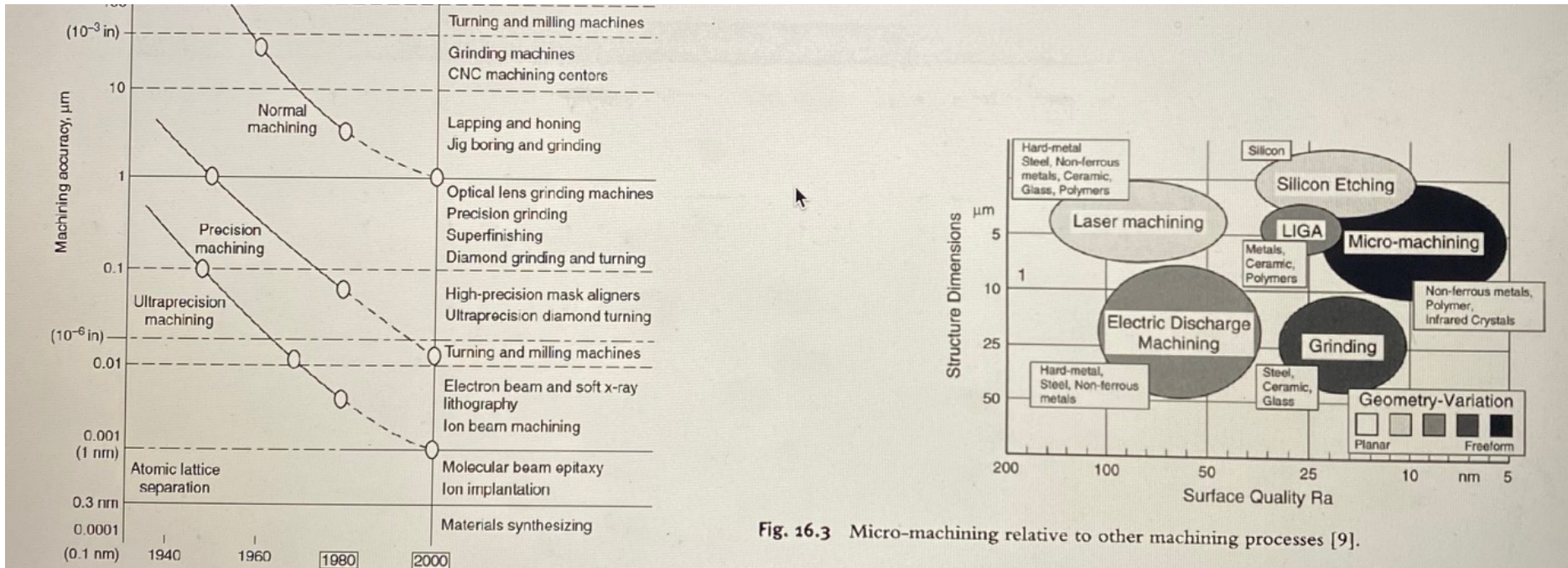
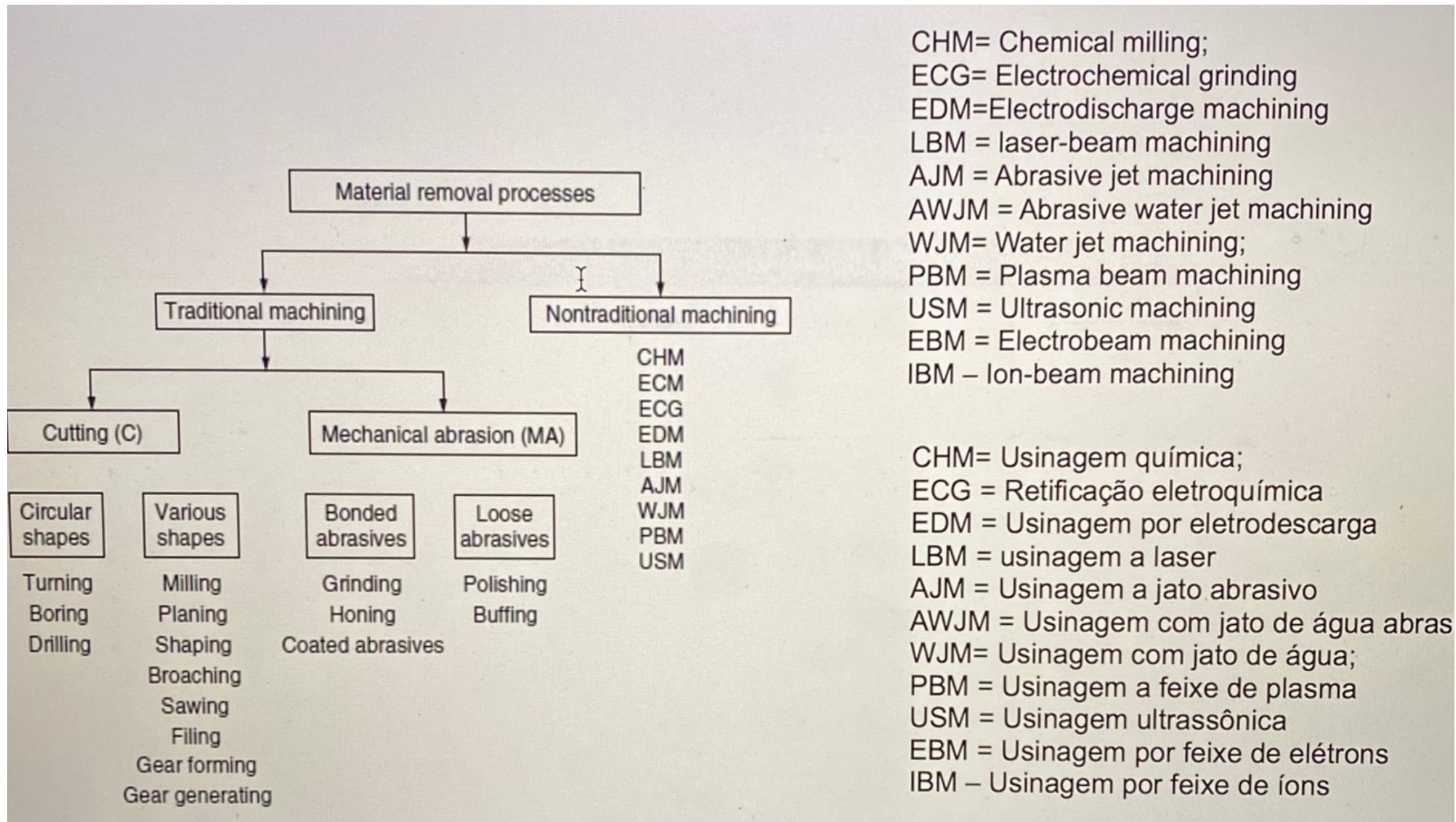


Fig. 16.3 Micro-machining relative to other machining processes [9].

2. Classificação dos processos



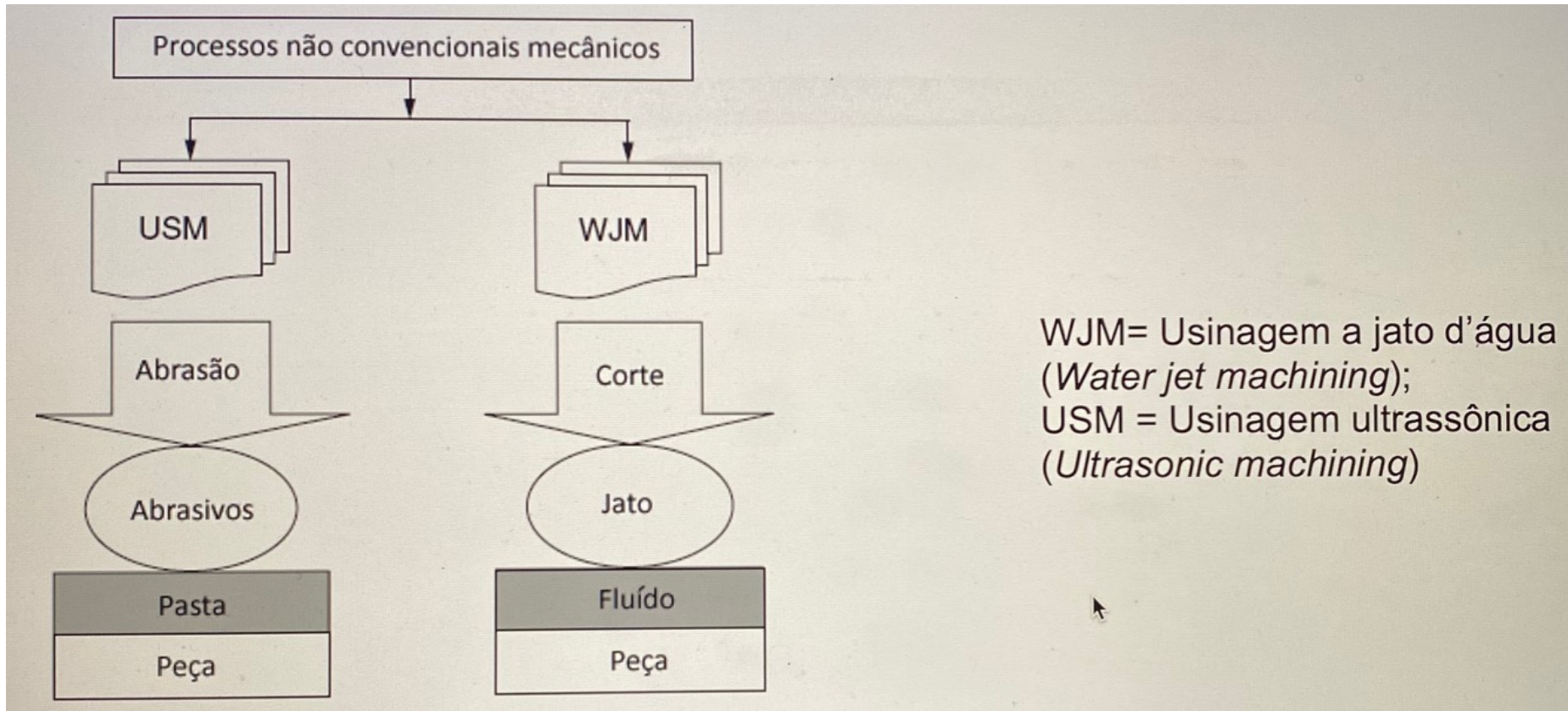
CHM= Chemical milling;
 ECG= Electrochemical grinding
 EDM=Electrodischarge machining
 LBM = laser-beam machining
 AJM = Abrasive jet machining
 AWJM = Abrasive water jet machining
 WJM= Water jet machining;
 PBM = Plasma beam machining
 USM = Ultrasonic machining
 EBM = Electrobeam machining
 IBM – Ion-beam machining

CHM= Usinagem química;
 ECG = Retificação eletroquímica
 EDM = Usinagem por eletrodescarga
 LBM = usinagem a laser
 AJM = Usinagem a jato abrasivo
 AWJM = Usinagem com jato de água abras
 WJM= Usinagem com jato de água;
 PBM = Usinagem a feixe de plasma
 USM = Usinagem ultrassônica
 EBM = Usinagem por feixe de elétrons
 IBM – Usinagem por feixe de íons

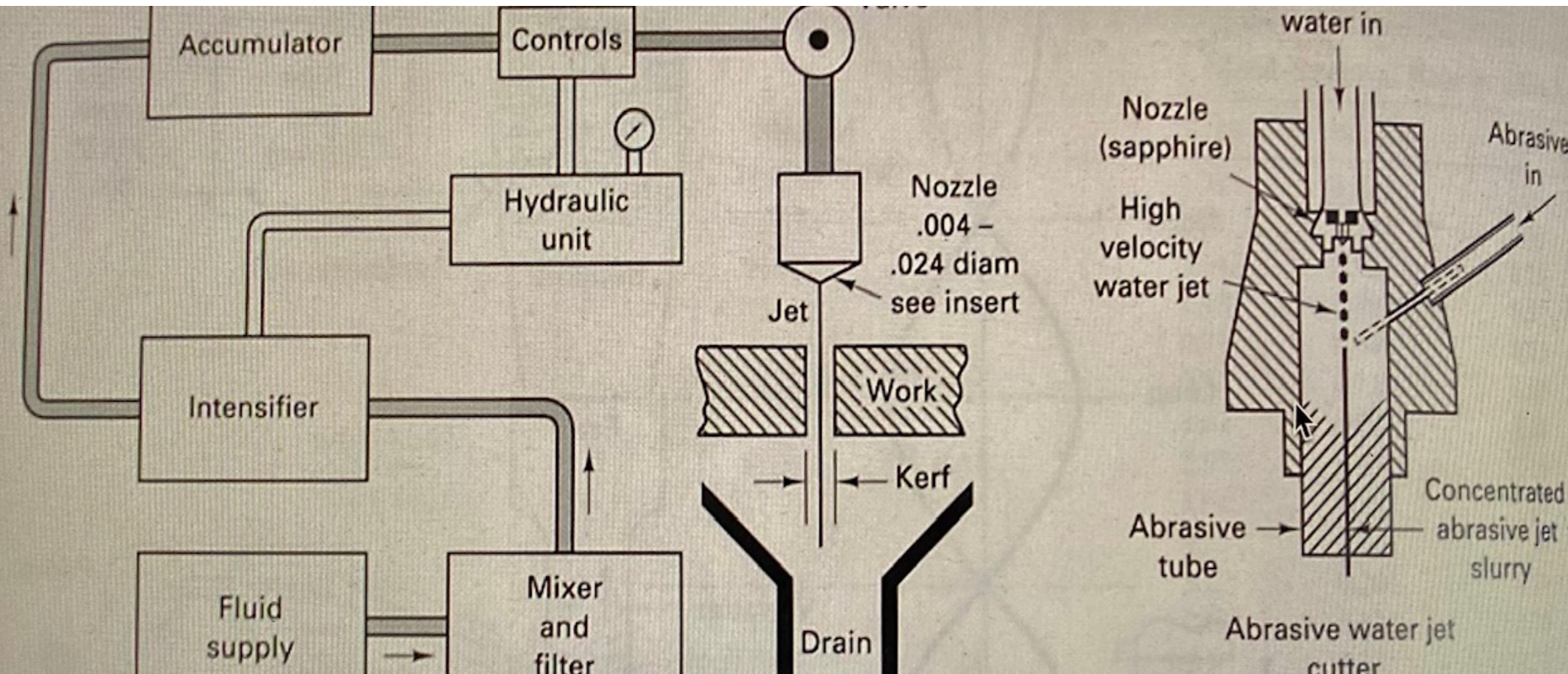
2. Classificação dos processos

- **Tipo de energia fundamental:**
 - Mecânica: (processos de corte multiponto ou por erosão)
 - Química e Eletroquímica: (reações químicas potencializadas) (Dissolução eletrolítica)
 - Térmica: (fusão e vaporização do material - altas temperaturas em regiões extremamente localizadas)

2.1 Processos de energia fundamental mecânica



2.1.1 Usinagem por jato de água



2.1.1 Usinagem por jato d'água



2.1.1 Usinagem por jato d'água

- **Características do processo:**

- Fluido aplicado a alta velocidade (**Mach 2** - 680.58 m/s, podendo chegar a 914 m/s)
- Adição de um polímero de cadeia longa – tornar jato coerente na saída;
- **Pressão** na saída do bocal **690 e 4140 bar**;
- Fluidos alternativos utilizados (álcool, glicerina, óleos vegetais) – processamento de carnes, produtos cozidos e comidas congeladas;
- Diâmetro do jato: 0.076 – 0.51 mm
- Aplicações típicas:

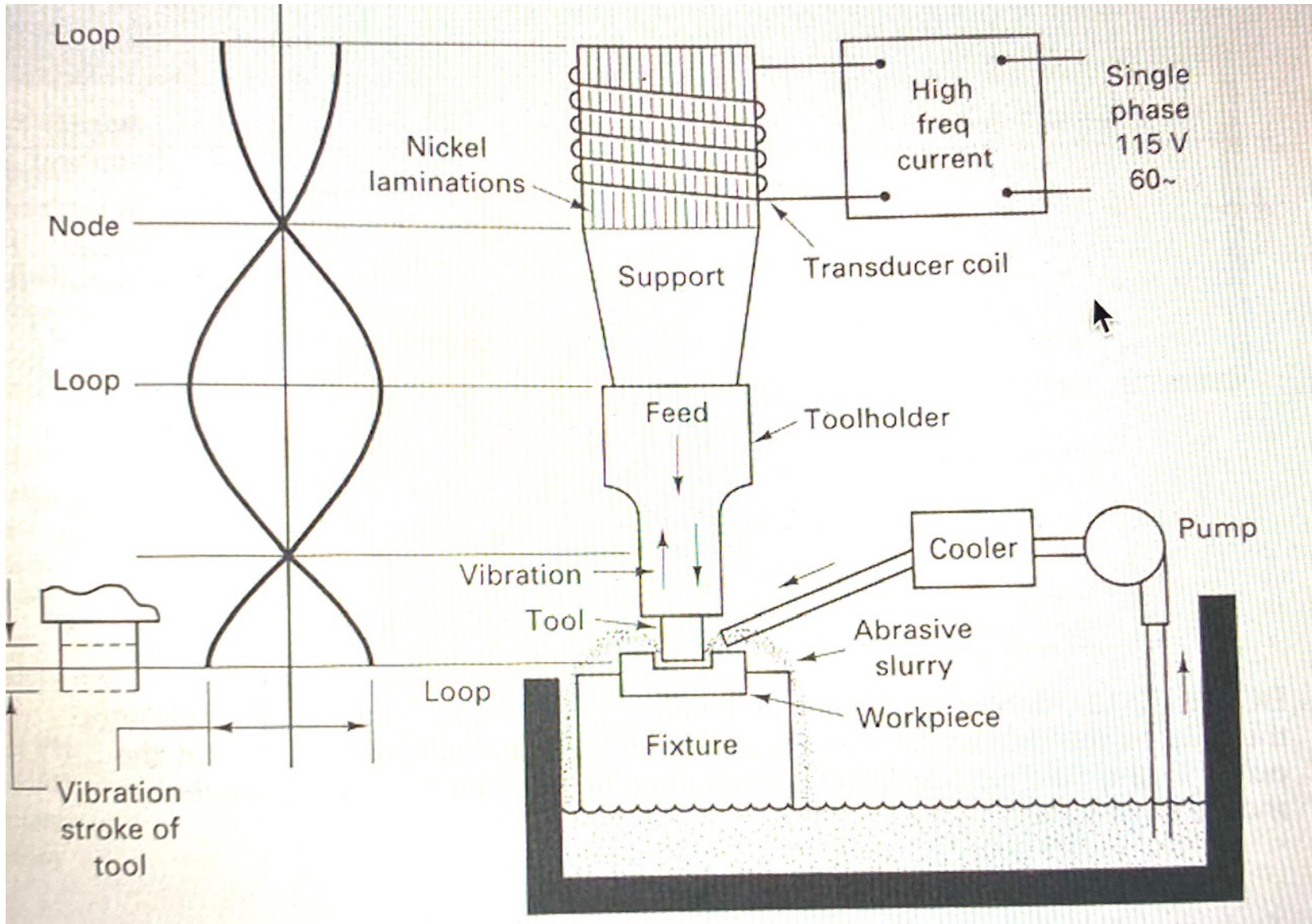
Corte de materiais não metálicos moles, tais como: revestimentos acústicos, plásticos, papelão, amianto (sem formação de poeira), couro, borracha, fibra de vidro, e tecidos sintéticos

2.1.2 Usinagem por jato d'água **abrasivo**

Características do processo:

- **Adição de abrasivos finos ao jato de água;**
- Usinagem de metais ferrosos e não ferrosos
- Largura do corte (Kerf) é aprox. 0,025 mm maior que o diâmetro de saída do jato.
- Parâmetros adicionais do processo: Tipo, tamanho e vazão de abrasivo, método de alimentação do abrasivo, tipos de bocais e câmaras de mistura, diâmetro do orifício de saída do abrasivo, material do tubo acelerador do abrasivo
- Condições típicas de operação:
 - Pressão da água: 30.000–50.000psi
 - Diâmetro do orifício de saída de água: 0.010–0.022in.
 - Afastamento mínimo da ferramenta: 0.020–0.060in
 - Granulometria dos abrasivos: 60, 80, 100 e 120;
 - Materiais: sílica, ou óxido de alumínio;
 - Vazão de abrasivo: 0.5–3.0 lb/min

2.1.3 Usinagem ultrassônica (retificação de impacto)

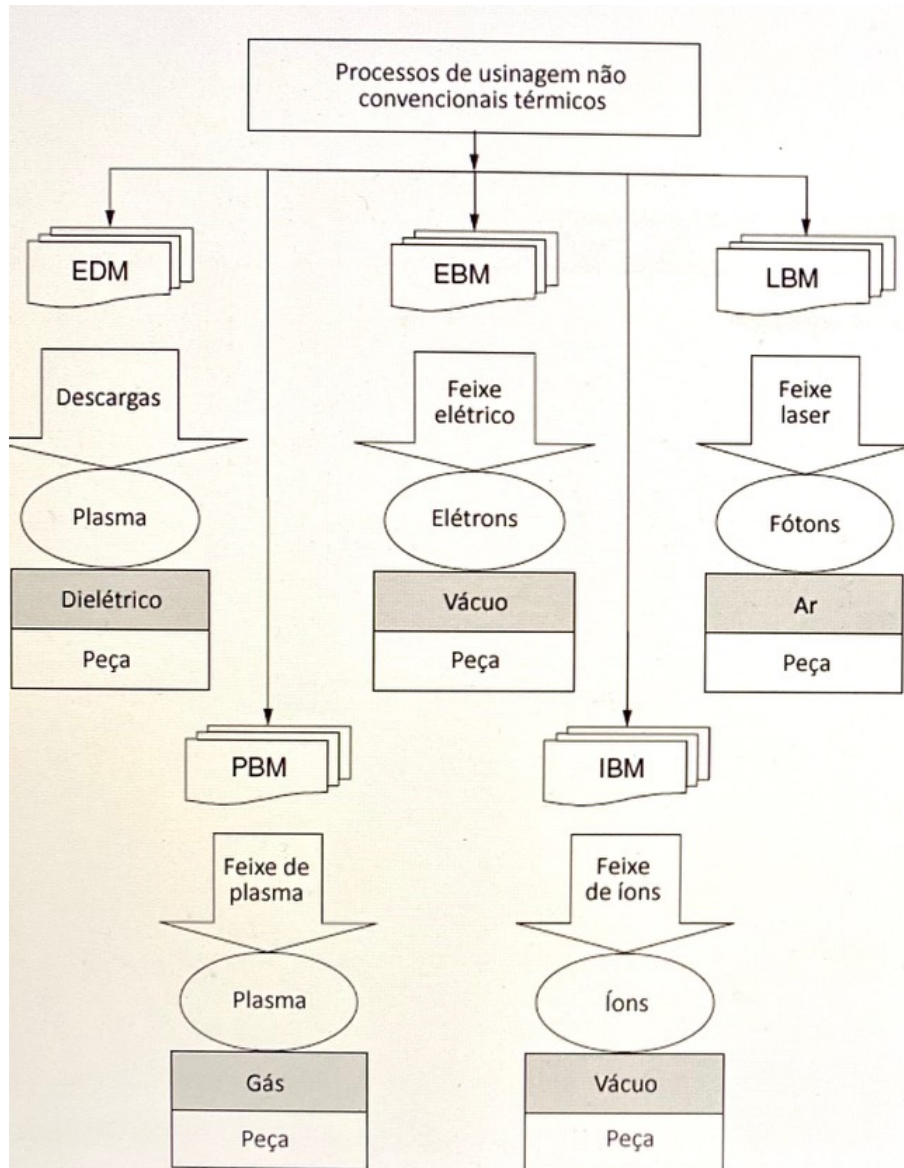


2.1.3 Usinagem ultrassônica (retificação de impacto)

Características do processo:

- Vibração ultrassônica para propulsar uma mistura abrasiva (slurry) contra a peça;
- Ferramenta forma uma imagem reversa na peça a medida que a mistura abrasiva erode a peça.
- Materiais abrasivos mais comuns: Carbeto de boro, oxido de alumínio e carbeto de silício;
- Corte de qualquer material. Mais efetivo para aqueles acima de 40 HRc
- Materiais da ferramenta: latão, carbeto, aço baixo carbono.
- Taxas de desgaste (material removido/desgaste da ferramenta) 1:1 ou 100:1 são possíveis
- Ferramenta resistente à fadiga;
- Cortes serão aumentados em duas vezes o tamanho do grão utilizado;
- Furos gerados serão cônicos – max relação prof/diam = 3:1;
- Grão controla a rugosidade;

2.2 Processos de energia fundamental térmica

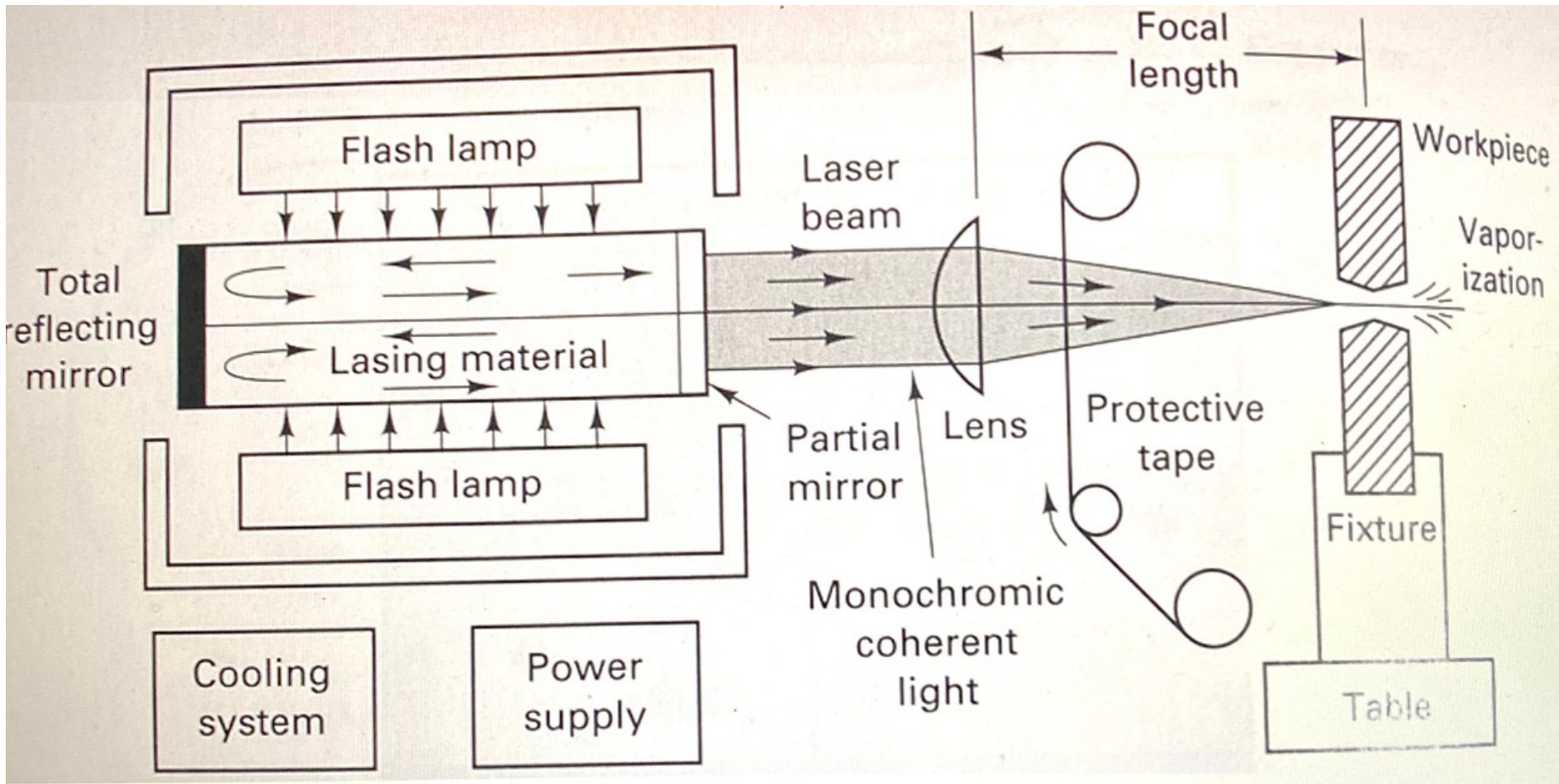


EDM=Usinagem por eletroerosão (*Electrodischarge machining*)
LBM = Usinagem a feixe-laser (*Laser-beam machining*)
PBM = Usinagem a feixe plasma (*Plasma-beam machining*)
EBM = Usinagem a feixe de elétrons (*Electrobeam machining*)
IBM – Usinagem a feixe de íons (*Ion-beam machining*)

2.2.1 Usinagem a LASER

- O LASER é gerado pela amplificação de luz emitida através de irradiação estimulada.
- Além do processo de corte, é empregado para soldagem e tratamento superficial
- Em vista das suas propriedades térmicas, o LASER é adequado para o corte dos mais diversos materiais, pois possui a maior concentração de potência, permitindo a furacao de diamantes naturais
- Embora de difícil automação, permite o ajuste do ponto focal e é utilizado na fabricação de formas complexas, sem concorrência com outros processos em muitas aplicações da indústria automobilística, aeronáutica e naval

2.2.1 Usinagem a LASE



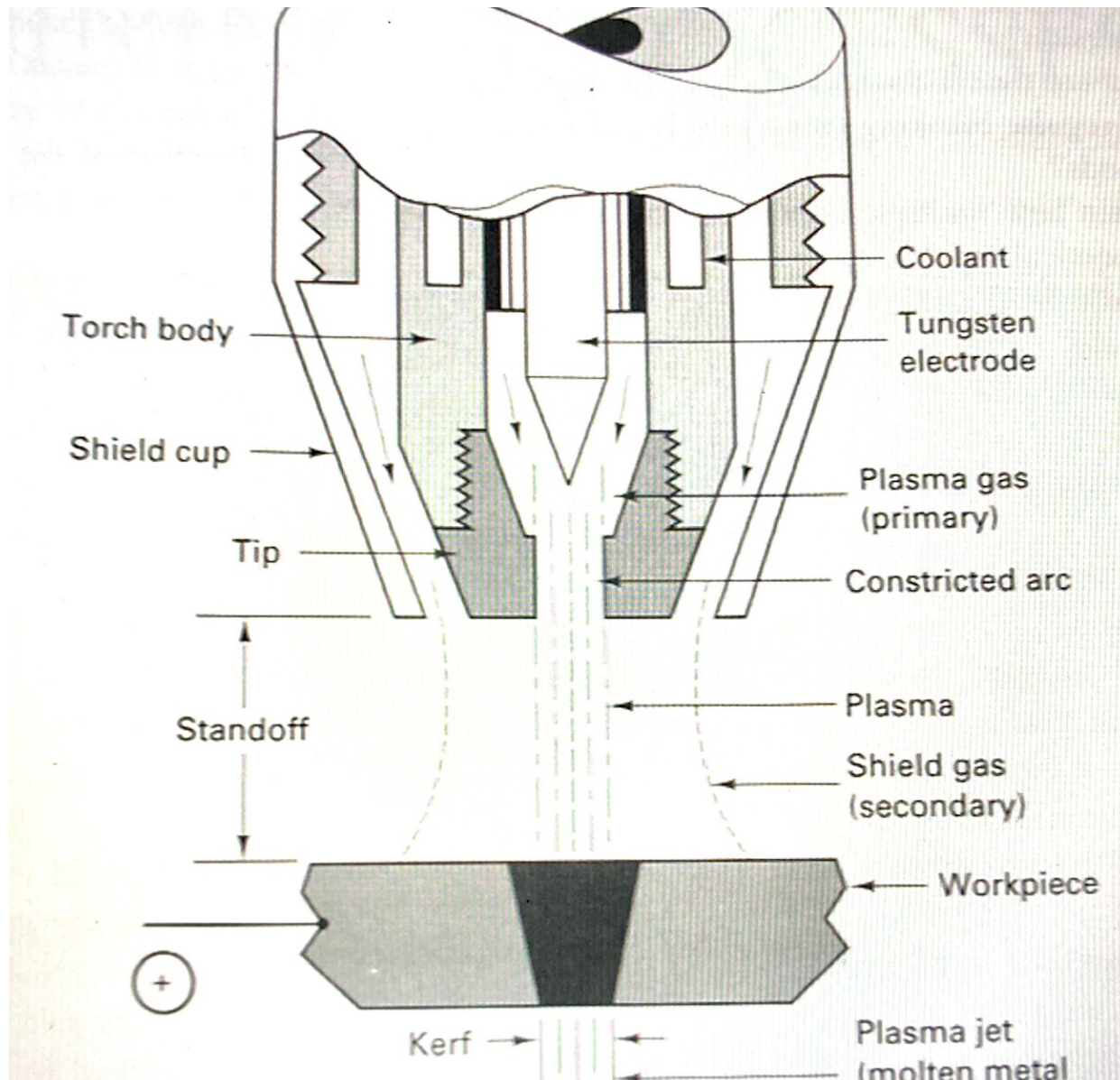
2.2.1 Tipos de LASER

- Excimer:
 - microusinagem de polímeros e materiais cerâmicos;
 - Baixa taxa de remoção de material
- ND:YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet; Nd:Y3Al5O12): Ampla aplicação, com até 500 W de potência;
 - Aplicações: Gravação/marcação de peças (metais e plásticos); Corte e solda de aços; Furação de superligas;
- CO2: Corte com Laser – várias aplicações
- http://www.synrad.com/Applications/video_clips.htm
- http://www.synrad.com/search_apps/process/cutting.htm http://www.synrad.com/search_apps/application_briefs/91-1.htm
- <https://www.youtube.com/watch?v=gyhOlvnfD5M>
- https://www.youtube.com/watch?v=bB47_QzyuxQ

2.2.1 Usinagem a laser

- Formas de remoção:
 - Fusão e expulsão do material (cobre);
 - Oxidação (formação de óxido de ferro)
(materiais ferrosos);
 - Sublimação (evaporação do material)
(plásticos)
- Velocidades de corte: proporcionais a potência e inversamente prop. a espessura cortada

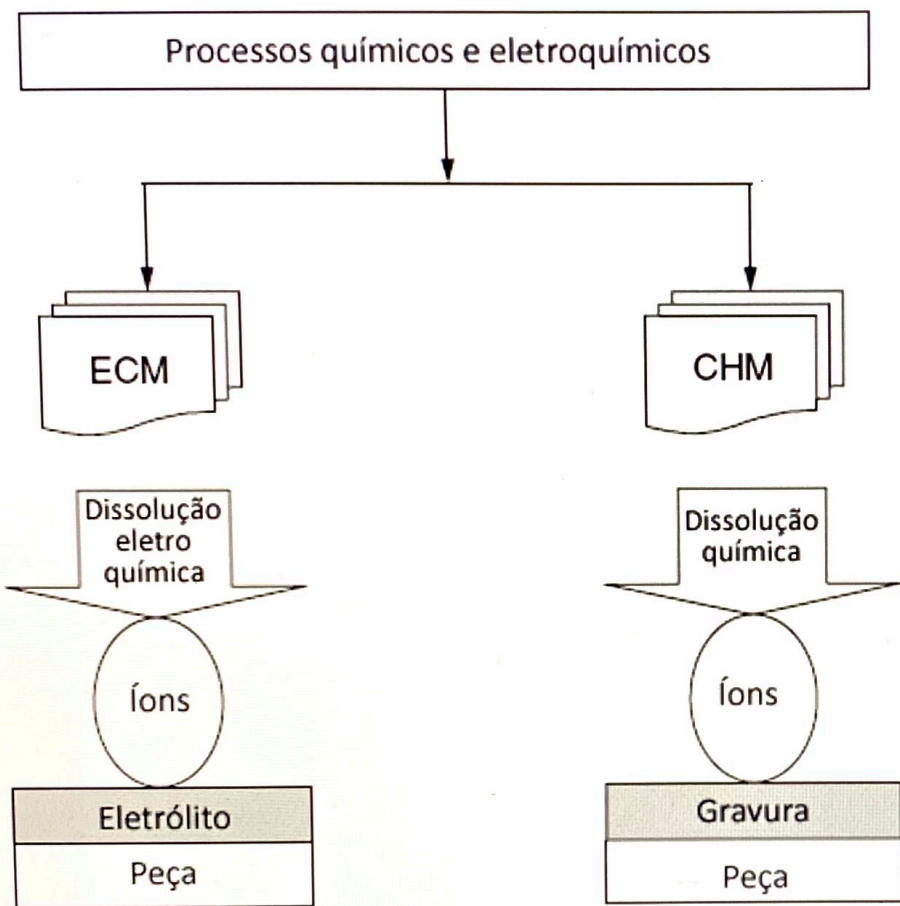
2.2.2 Usinagem a arco plasma



2.2.2 Usinagem a Arco de plasma

- Utiliza um fluxo superaquecido de gás ionizado eletricamente para fundir e remover material
- Plasma a é criado a 11100- 28000 oC dentro de um bocal resfriado à água através da ionização elétrica de um gás, tal como o nitrogênio, hidrogênio, argônio ou mistura desses gases
- Centelha de alta frequência inicia o arco na câmara interna
- Velocidade sônica de saída do jato. Gás secundário – corte limpo
- Vantagem – velocidade de corte. Chapa de aço baixo carbono de 6,35 mm – 3.2 m/min. Velocidade função da espessura
- https://www.youtube.com/watch?v=f5TwzRW_DtY

2.3 Processos de energia fundamental química e eletroquímica

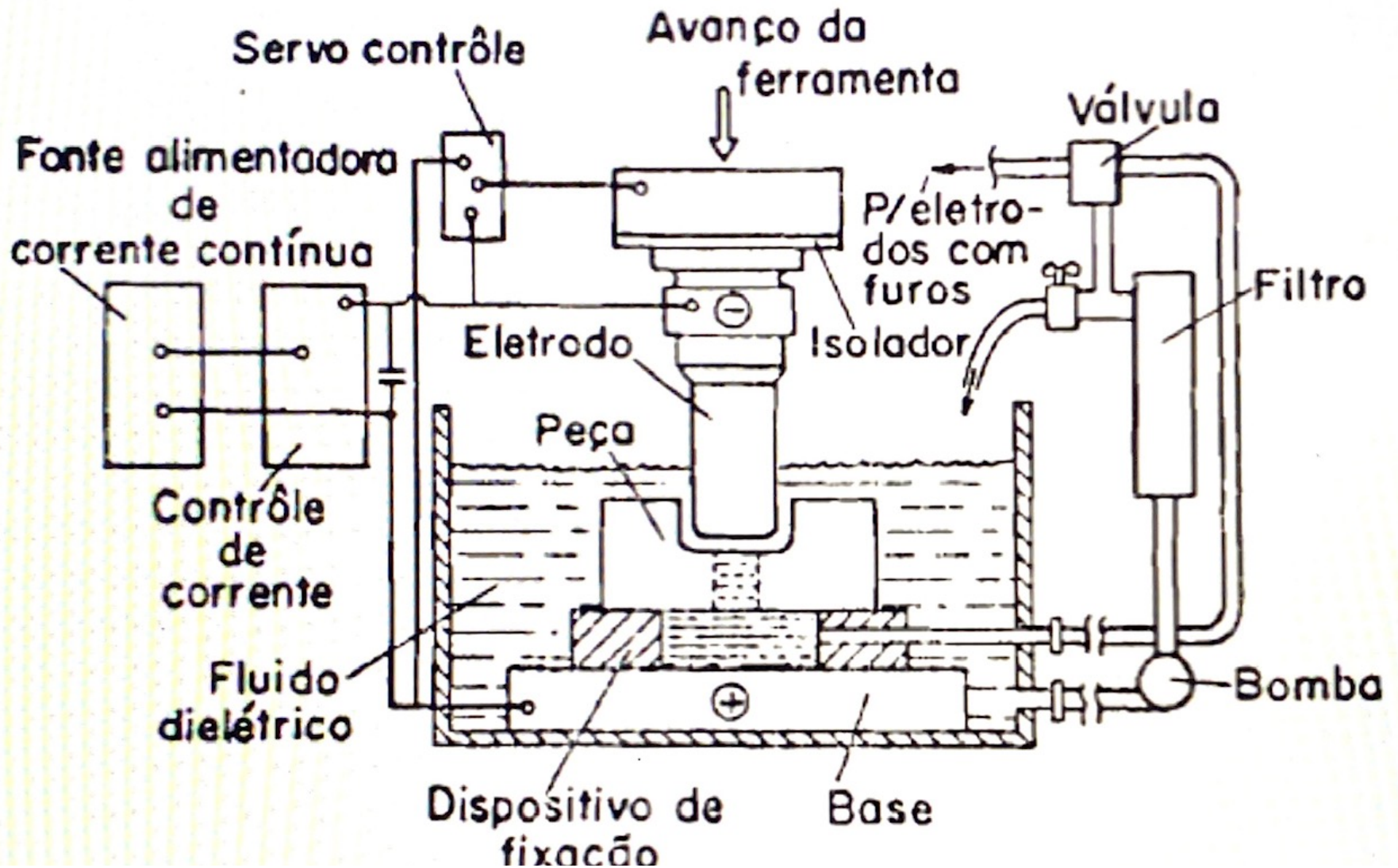


CHM= Usinagem química;
(*Chemical Machining*)
ECM= Usinagem eletroquímica
(*Electrochemical Machining*)

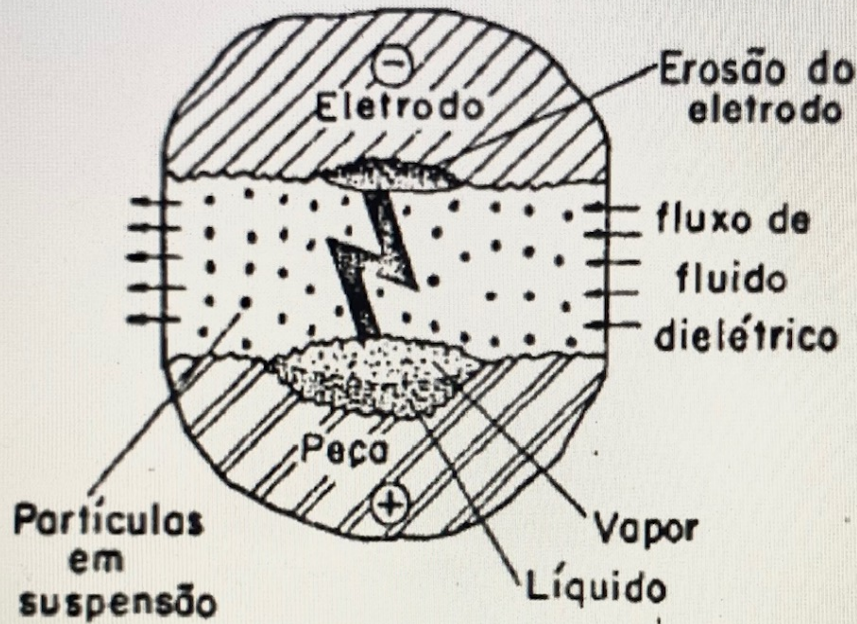
2.3.1 Usinagem Química

- Material é removido de áreas selecionadas pela imersão do mesmo em reagentes químicos;
- Dissolução química do metal;
- Sem corrente elétrica externa;
- Variantes do processo:
 - Fresagem química (pockets, contornos, etc.);
 - Usinagem fotoquímica (usinagem de microeletronicos);

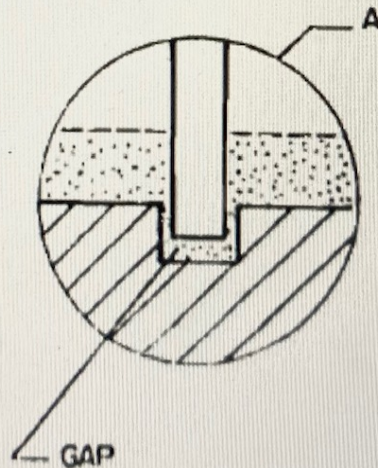
2.4.1 Usinagem por descarga elétrica (EDM)– eletroerosão



Usinagem por descarga elétrica (EDM) – eletroerosão



Calor da faísca – funde o material, o seu impacto ejeta o metal, sendo possivelmente vaporizado e refundido no dielétrico como esferas

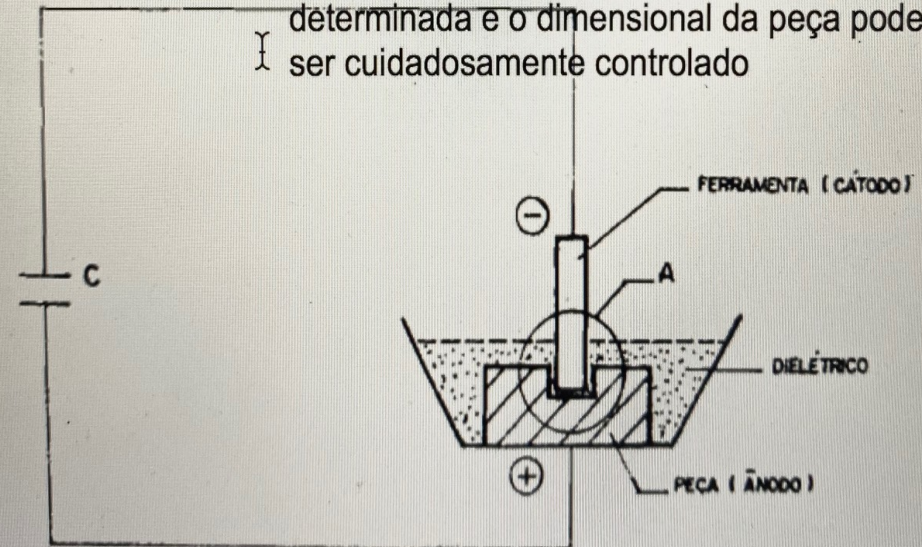


Milhares de faíscas por segundo – cada faísca provoca uma fina cratera através de fusão e vaporização – erodindo o formato da ferramenta na peça

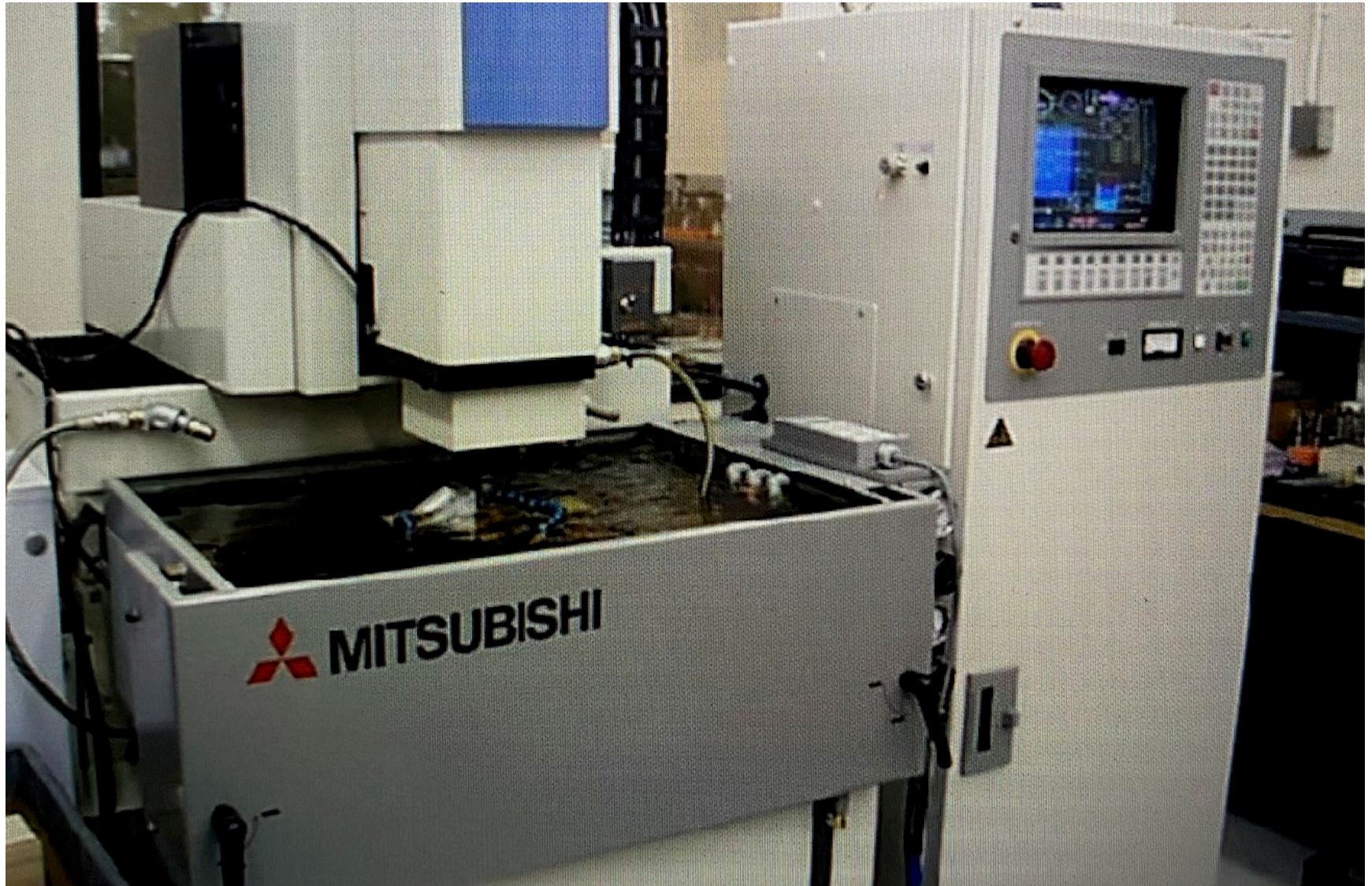
Fluido dielétrico: remove as partículas e confina as faíscas

Cada faísca contém uma quantidade discreta, mensurável e controlável de energia

Taxa de remoção de material pode ser pré-determinada e o dimensional da peça pode ser cuidadosamente controlado

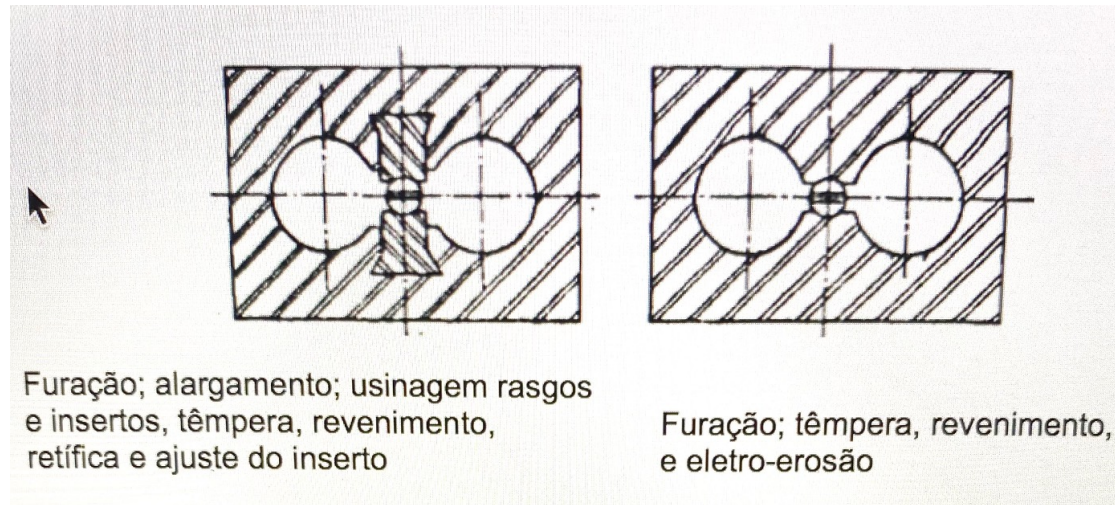


equipamento



Principais aplicações e exemplos

- 80-90% - Produção de moldes e matrizes para fundição, forjamento, estampagem e extrusão
- Materiais de qualquer dureza podem ser cortados, **desde que condutores elétricos**
- Qualquer formato que possa ser conferido ao eletrodo pode ser reproduzido na peça
- Ausências de forças mecânicas – usinagem de peças frágeis sem distorção;



Eletoerosão: características do processo

- Processo mais lento quando comparado com métodos convencionais;
- Rugosidade da superfície obtida é função da frequência de faiscamento, voltagem e corrente, as quais controlam a taxa de remoção de material
- Na maioria dos materiais, produz-se uma fina camada re-fundida de elevada dureza.
- Materiais de alta temperabilidade, finas trincas podem aparecer em decorrência das tensões termicamente induzidas
- Cavidade obtida será maior que a dimensão da ferramenta utilizada;
- Overcut (0.013 – 0.51 mm)

Eletoerosão: características do processo

- **Tipos de eletrodos:** grafite é o mais utilizado. (cobre, latão, cobre-tungstênio, alumínio, etc.)
- **• Critérios de seleção:**
 - Facilidade de usinagem do eletrodo;
 - Qualidade superficial da peça obtida com o eletrodo; – Tipo de fonte utilizada;
 - Custo do material

- **Intensidade de corrente**

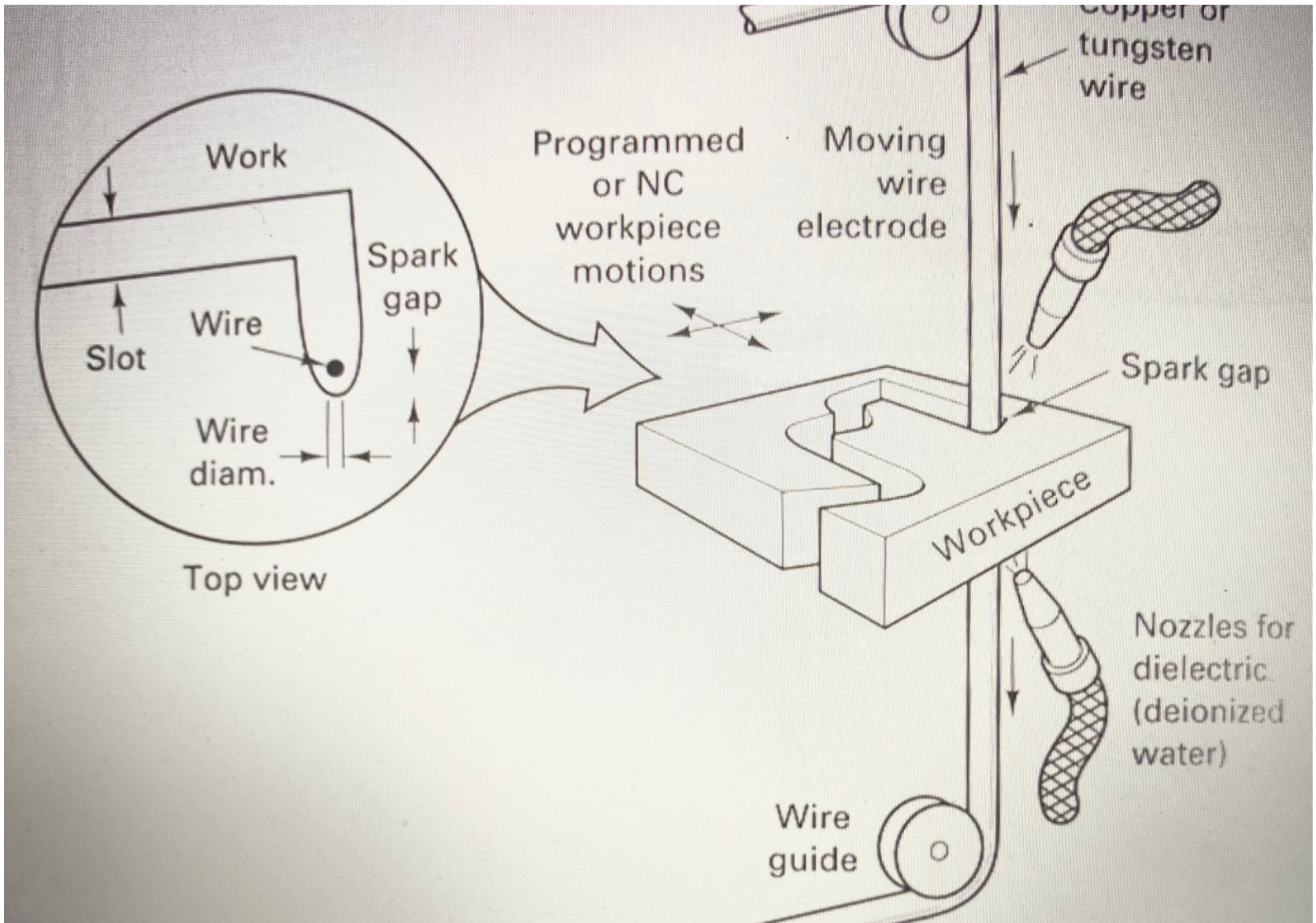
COEFICIENTES PARA CÁLCULO DE AMPERAGEM

ELETRODO	MATERIAL A SER USINADO	COEFICIENTE PARA AMPERAGEM
Cobre Eletrolítico	Aço	0,07 A /mm ²
Grafite	Aço	0,01 A / mm ²
Cobre e Tungstênio	Aço	0,14 A / mm ²
Cobre	Cobre	0,07 A /mm ²
Cobre e Tungstênio	Pastilha de metal duro	0,05 A / mm ²

Eletroerosão: características do processo

- Fluido dielétrico: – Funções:
- – Propiciar isolamento entre eletrodo e peça;
- – Condutor da faísca;
- – Refrigerante;
- – Agente lavador
- – Deve ionizar-se para produzir um canal de formação da faísca e deionizar-se rapidamente para tornar-se isolante
- – Compostos poliméricos (água glicerinada 90:10) apresentam melhor taxa de remoção de material e redução do desgaste da ferramenta quando comparada com a querosene.

2.4.1.2 Usinagem por descarga elétrica – a fio

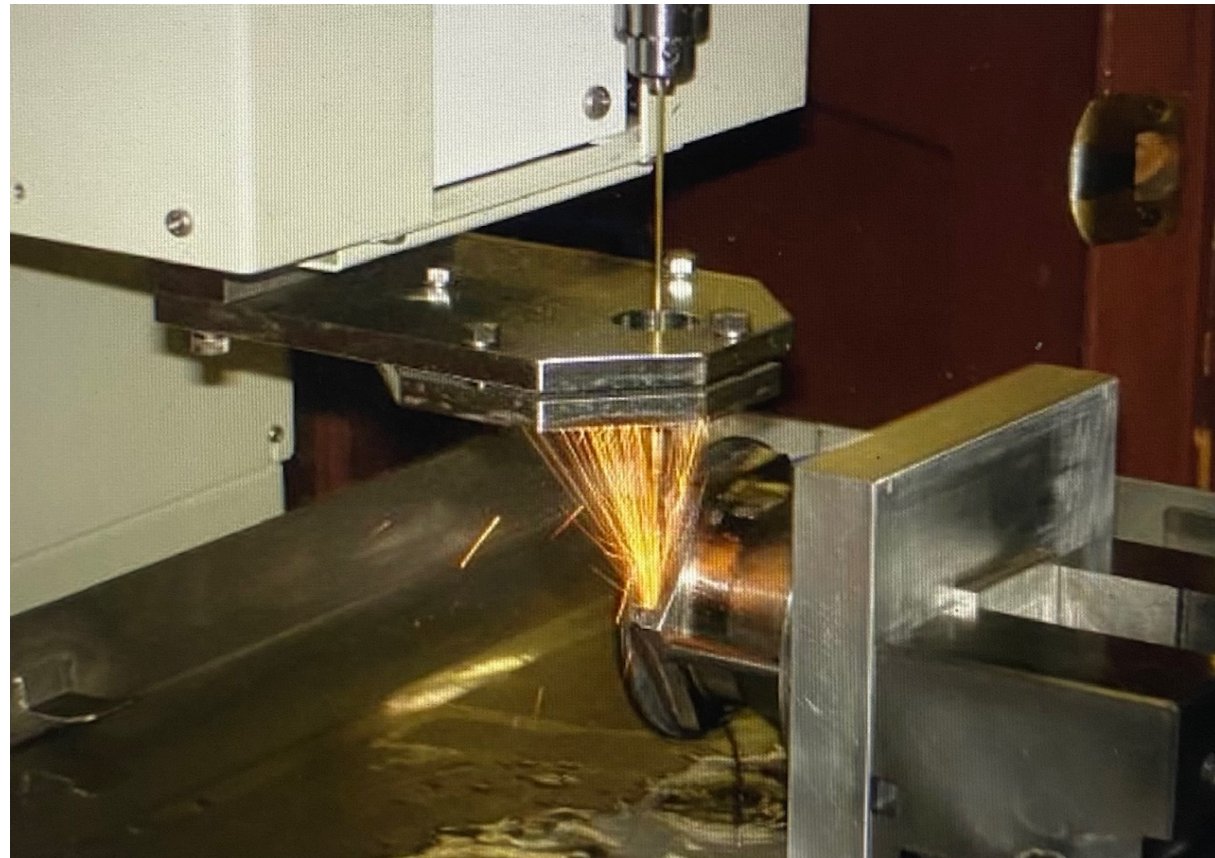


2.4.1.3. Furação de pequenos orifícios:

Eletrodo em formato de tubo com diâmetros variando entre 0.1 – 6.35 mm utilizado para gerar furos passantes na peça.

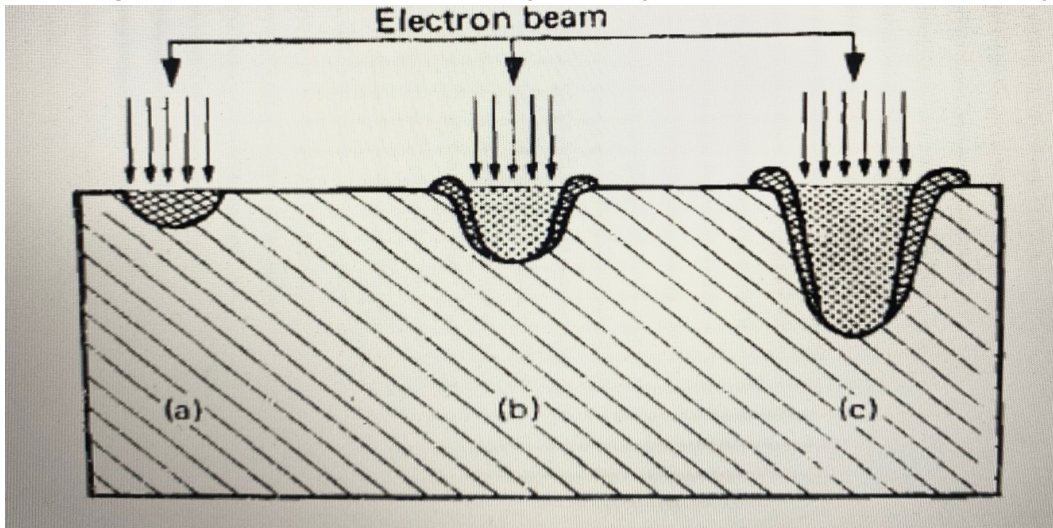
Pode-se usar eletrodos maciços de grafite 0,3 a 1,0mm com inversão de polaridade.

Processo similar ao EDM de penetração, destinado a criação de furos guias para início do processo de eletro-erosão a fio em materiais endurecidos



2.4.2 Usinagem por feixe de elétrons

- Processo de remoção ocorre através do impacto de um feixe concentrado de elétrons sobre a superfície da peça. Fusão e vaporização do material no ponto de incidência (ponto focal)
- Interação do feixe com a peça produz raios-X, requerendo proteção adequada

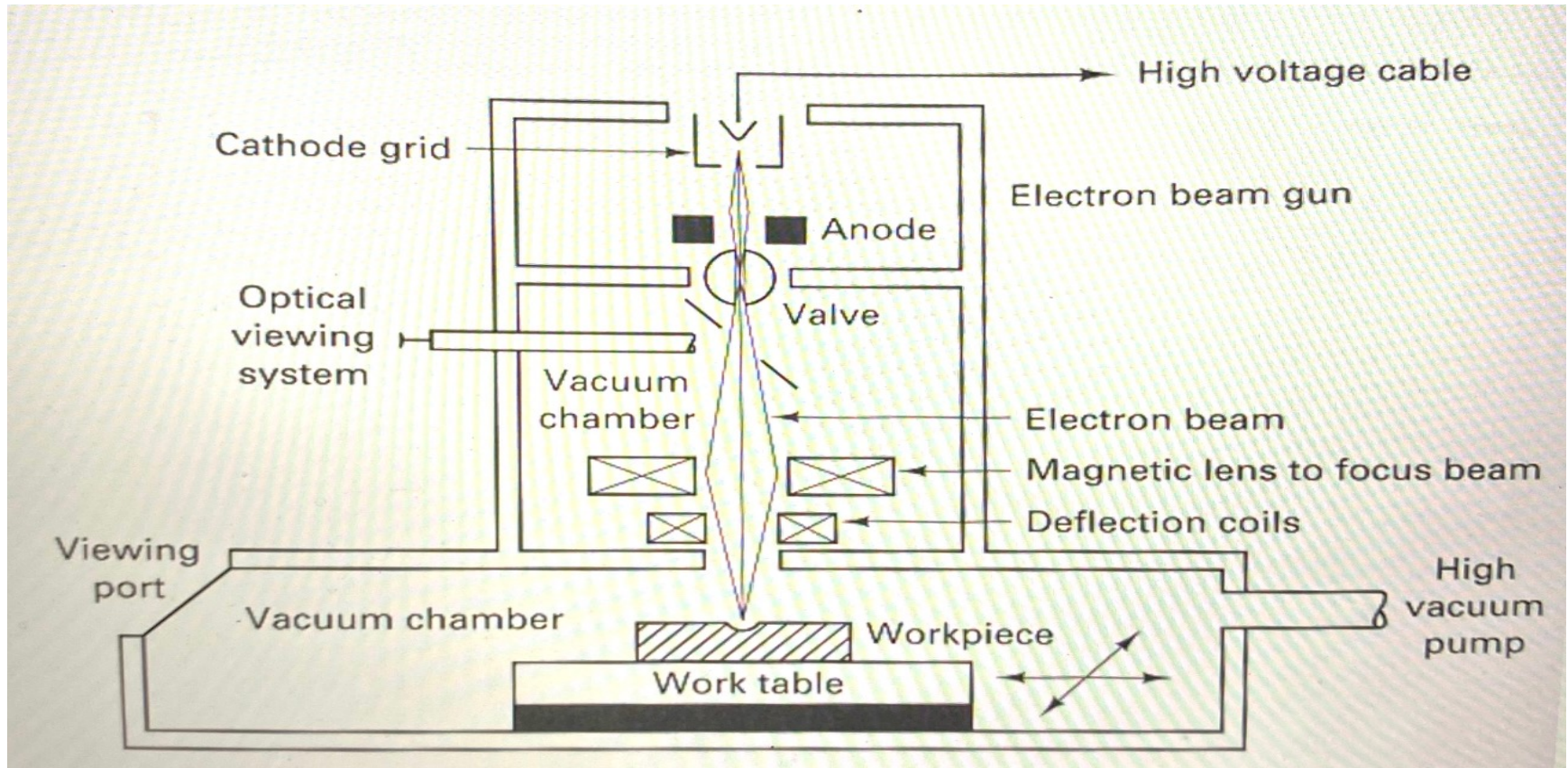


Modelo de formação de cavidade

UTILIZACOES:

- Soldagem (principal), endurecimento superficial e ocasionalmente para corte (furação por geracao de circulo)

2.4.2 Usinagem por feixe de elétrons



Diâmetro do ponto: 0.013 – 0.025 mm

Furos ou rasgos na proporção profundidade largura (100:1)

Tolerância dos furos 10 % D.

Requer alta voltagem (50 a 200 KV)

Elétrons acelerados entre 0.5 a 0.8 velocidade da luz

Requer vácuo – produz as soldas mais puras e contínuas

2.4.2 Usinagem por feixe de elétrons

- Soldagem:
 - Alto vácuo (0,1 mmHg) (maior rendimento e maior pureza da solda)
 - Médio vácuo (100 – 500 mmHg): perde penetração
 - Pressão atmosférica (gases inertes de proteção)

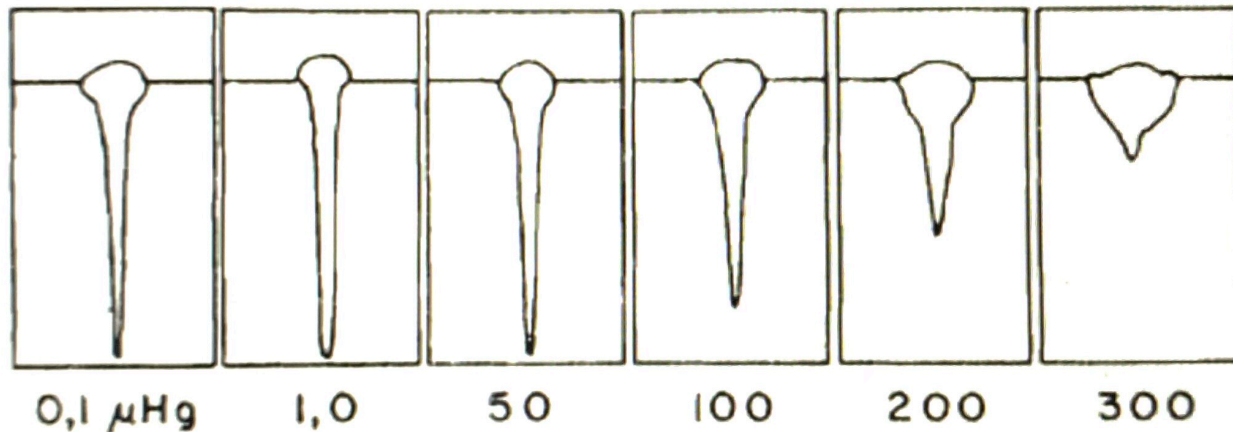


Figura 3.3 - Profundidade de penetração versus densidade de vácuo.

3. Aplicações e características gerais

informações comparativas

Process	Surface Finish AA ($\mu\text{in.}$)	Typical Metal Removal Rate (in^3/min)	Typical Specific Horsepower ($\text{HP}/\text{in}^3\text{-min}$)	Typical Penetration Rate (ipm) or Cutting Speed (sfpm)	Typical Accuracy (in.)	Comments
Electron beam machining (EBM)	32-250	0.005 maximum; extremely low	10,000	200 sfpm; 6 ipm	0.001-0.0002	Micromachining of thin materials and hole-drilling minute holes with 100:1 depth/diameter ratios; work must be placed in vacuum but suitable for automatic control; beam can be used for processing and inspection; used widely in microelectronics
Laser beam machining (LBM)	32-250	0.0003; extremely low	60,000	0.1-4 ipm hole drilling	0.005-0.0005	Can drill 0.005- to 0.050-in.-diameter holes in materials 0.100 in. thick in seconds; same equipment can weld, surface heat-treat, engrave, trim, blank, etc.; has heat-affected zone and recast layers which may need to be removed
Electrical discharge machining (EDM)	32-105	0.3	40	0.5 ipm	0.002-0.00015	Oldest of NTM processes; widely used and automated; tools and dies expensive; cuts any conductive material regardless of hardness; delicate burr-free parts possible; always forms recast layer
Electrical discharge wire cutting	32-64	0.10-0.3	40	4-10 ipm using molybdenum wire	≈ 0.0002 - ± 0.0001	Special form of EDM using traveling wire; cuts straight narrow kerfs in metals 0.001 to 3 in. thick; wire diameters of 0.002 to 0.010 in. used; NC machines allow for complex shapes
Plasma arc machining (PBM)	25-500	10	20	50 sfpm; 10 ipm; 120 ipm in steel	± 0.02 to ± 0.125	Clean rapid cuts and profiles in almost all plate to 8 in. thick with 5 to 10° taper; other names: plasma beam cutting

Aplicações e características gerais

TABLE 26.4 Applicability of selected nontraditional machining processes to various work materials. For comparison, conventional milling and grinding are included in the compilation.

Work Material	Nontraditional Processes								Conventional Processes	
	Mech		Elec		Thermal			Chem	Milling	Grinding
	USM	WJC	ECM	EDM	EBM	LBM	PAC	CHM		
Aluminum	C	C	B	B	B	B	A	A	A	A
Steel	B	D	A	A	B	B	A	A	A	A
Super alloys	C	D	A	A	B	B	A	B	B	B
Ceramic	A	D	D	D	A	A	D	C	D	C
Glass	A	D	D	D	B	B	D	B	D	C
Silicon ^a			D	D	B	B	D	B	D	B
Plastics	B	B	D	D	B	B	D	C	B	C
Cardboard ^b	D	A	D	D			D	D	D	D
Textiles ^c	D	A	D	D			D	D	D	D

Compiled from [13] and other sources.

Key: A = good application, B = fair application, C = poor application, D = not applicable, and blank entries indicate no data available during compilation.

^a Refers to silicon used in fabricating integrated circuit chips.

^b Includes other paper products.

^c Includes felt, leather, and similar materials.

USM = Ultrasonic machining
WJC= Water jet cutting;
ECM= Electrochemical machining;
EDM=Electrodischarge machining
EBM = Electrobeam machining
LBM = laser-beam machining
PAC = Plasma arc cutting;
CHM= Chemical machining;

Aplicações e características gerais

TABLE 26.5 Machining characteristics of the nontraditional machining processes.

Characteristic	Nontraditional Processes								Conventional Processes	
	Mech		Elec		Thermal		Chem		Milling	Grinding
	USM	WJC	ECM	EDM	EBM	LBM	PAC	CHM		
Material removal rates	C	C	B	C	D	D	A	B-D ^a	A	B
Dimensional control	A	B	B	A-D ^b	A	A	D	A-B ^b	B	A
Surface finish	A	A	B	B-D ^b	B	B	D	B	B-C ^b	A
Surface damage ^c	B	B	A	D	D	D	D	A	B	B-C ^b

Compiled from [13].

Key: A = excellent, B = good, C = fair, and D = poor.

^aRating depends on size of work and masking method.

^bRating depends on cutting conditions.

^cIn surface damage a good rating means low surface damage and poor rating means deep penetration of surface damage; thermal processes can cause damage up to 0.020 in. (0.50 mm) below the new work surface.

USM = Ultrasonic machining

WJC= Water jet cutting;

ECM= Electrochemical machining;

EDM=Electrodischarge machining

EBM = Electrobeam machining

LBM = laser-beam machining

PAC = Plasma arc cutting;

CHM= Chemical machining;

Comparativo laser x plasma

subject

CO2 Laser

Plasma Cutting

subject	CO2 Laser	Plasma Cutting
Method of imparting energy	Light 10.6 μm (far infrared range)	Gas transmitter
Source of energy	Gas laser	DC power supply
How energy is transmitted	Beam guided by mirrors (flying optics); fiber-transmission not feasible for CO ₂ laser	Electrically charged gas
How cut material is expelled	Gas jet, plus additional gas expels material	Gas jet
Distance between nozzle and material and maximum permissible tolerance	Approximately 0.2" \pm 0.004", distance sensor, regulation and Z-axis necessary	0.010" to 0.02"
Physical machine set-up	Laser source always located inside machine	Working area, shop air and plasma torch
Range of table sizes	8' x 4' to 20' x 6.5'	8' x 4' to 20' x 6.5'
Typical beam output at the workpiece	1500 to 2600 Watts	Not applicable to this process

Usinagem a laser – comparativo

Laser Type	Wave Length (μm)	Mode of Operation	Power (W)	Pulses per Second	Length of Time	Application	Comments
Argon	0.4880 0.5145	Repetitively pulsed	20 peak; 0.005 average	60	50 μs	Scribing thin films	Power low
Ruby	0.6943	Normal pulse	2×10^5 peak	Low (5-10)	0.2-7 ms	Large material removal in one pulse, drilling diamonds dies, spot welding	Often uneconomical
Nd-glass	1.06	Normal pulse	2×10^6 peak	Low (0.2)	0.5-10 ms	Large material removal in one pulse	Often uneconomical
Nd-YAG ^a	1.06	Continuous	1000	—	—	Welding	Compact: economical at low powers
	1.06	Repetitively Q-switched	3×10^5 peak; 30 average	1-24,000 300	50-250 ns 50 ns	Resistor trimming, electronic circuit fabrication	Compact and economical
CO ₂ ^b	1.06	Normal pulsed	400	300	0.5 to 7 ms	Spot weld, drill	
	10.6	Continuous	15,000	—	—	Cutting organic materials, oxygen-assisted metal cutting	Very bulky at high power
	10.6	Repetitively Q-switched	75,000 peak; 1.5 average	400	50-200 ns	Resistor trimming	Bulky but economical
	10.6	Superpulsed	100 average	100	100 μs and up	Welding, hole production, cutting	Bulky but economical

Source: Modified from J. F. Ready, "Selecting a laser for material working," *Laser Focus*, Mar. 1970, p. 40.

^a Neodymium-yttrium aluminum garnet.

^b CO₂ plus He plus N₂ mixture.

Comparação entre processos NC de energia mecânica

Process	Surface Finish AA ($\mu\text{in.}$)	Typical Metal Removal Rate (in^3/min)	Typical Specific Horsepower ($\text{HP}/\text{in}^3\text{-min}$)	Typical Penetration Rate (ipm) or Cutting Speed (sfpm)	Typical Accuracy (in.)	Comments
Abrasive flow machining	30–300; can go as low as 2	Low	NA ^a	Low	0.001–0.002	Typically used to finish inaccessible internal passages; often used to remove recast layer produced by EDM; used burr removal (cannot do blind holes)
Fluid or water jet machining	50–100	Very low	NA ^a	Depends on materials	± 0.010 at 3 to 4 in. standoff	Used on wood, nonmetals; pressures of 55,000 psi and jet velocity of 1700 to 3000 ft/sec
Abrasive waterjet machining	50–75 for 0.003 to 0.020 in. diameter stream	Very low; fine finishing process, 0.001	NA ^a	Very low, 0.6–100 ipm	≈ 0.005 typical 0.020 in. cut-line tolerance	Use in heat-sensitive or brittle materials, glass, titanium, and composites and nonmetals; produces tapered walls in deep cuts; burrless
Hydrodynamic machining	Generally 30–100	Depends on material	NA ^a	Depends on material	0.001 possible	Used for soft nonmetallic slitting; no heat-affected zone; produces narrow kerfs (0.001–0.020 in.); high noise levels
Ultrasonic machining (impact grinding)	16–63; as low as 6 to 10 with 9 μm abrasive	Slow, 0.05 typical	200	0.020–0.150 ipm	0.001–0.0005	Most effective in hard materials, $R_C > 40$; tool wear and taper limit hole depth to width at 2.5 to 1; tool also wears

- **Continue seus estudos...**

Consulte o material adicional disponível no e-disciplinas sobre a aula de Processos não-convencionais