

---

# Usinagem I

2016.1

Parte I – Aula 6

Processos não convencionais e MicroUsinagem

“O termo **usinagem não tradicional** refere-se a este grupo, que remove o material em excesso de uma peça bruta através de várias técnicas que envolvem energia mecânica, térmica, elétrica ou química (ou combinações destas energias). São chamados de processos de usinagem, mas não usam uma ferramenta de corte afiada como nos processos convencionais.” Groover, 2013

1. **Mecânica** - A energia mecânica utilizada é diferente daquela utilizada nos processos convencionais, sem a ação de uma ferramenta de corte. Ex: erosão da peça através de um fluxo em alta velocidade de abrasivo
2. **Elétrica** Utilizam energia eletroquímica para remover o material.
3. **Térmica**. A energia térmica é utilizada para cortar ou moldar a peça em uma área muito pequena da superfície da peça, por fusão e/ou vaporização
4. **Química**. Os produtos químicos aplicados removem de forma seletiva partes do material da peça enquanto outras são protegidas por uma máscara.

# Processos NC – Energia Mecânica

- Usinagem por ultrassom
- Corte por jato d'água
- Corte por jato d'água abrasivo
- Usinagem por jato abrasivo
- Usinagem por fluxo abrasivo (fluxo = nomenclatura semelhante ao usado em soldagem)

# Usinagem por Ultrassom

Utiliza uma **ferramenta vibratória** (em aços carbono ou aços inoxidável) em baixa amplitude e alta frequência. As amplitudes são de cerca de 0,075 mm (0,003 pol), e as frequências são de aproximadamente 20.000 Hz.

**Abrasivos** (materiais: nitreto de boro, carboneto de boro, óxido de alumínio, carboneto de silício e diamante) **contidos em uma suspensão** são movidos em **alta velocidade contra a peça**.

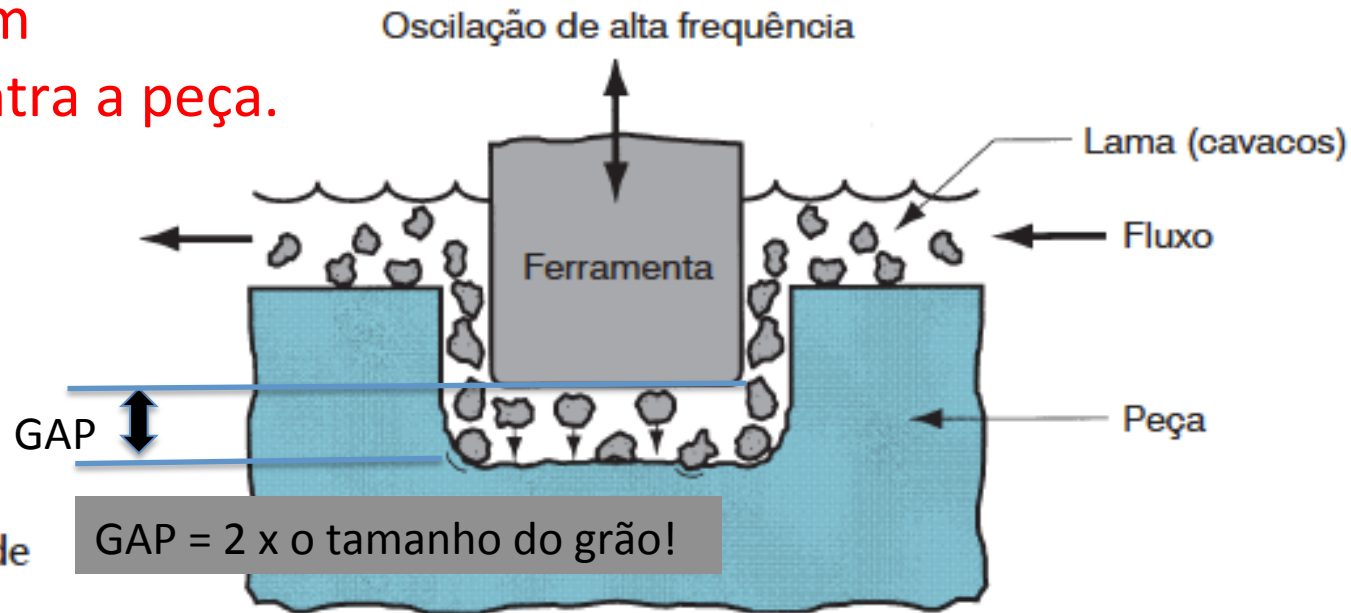


FIGURA 19.1 Usinagem por ultrassom. (Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição, por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão de John Wiley & Sons, Inc.)

# Usinagem por jato d'água ou água com abrasivo



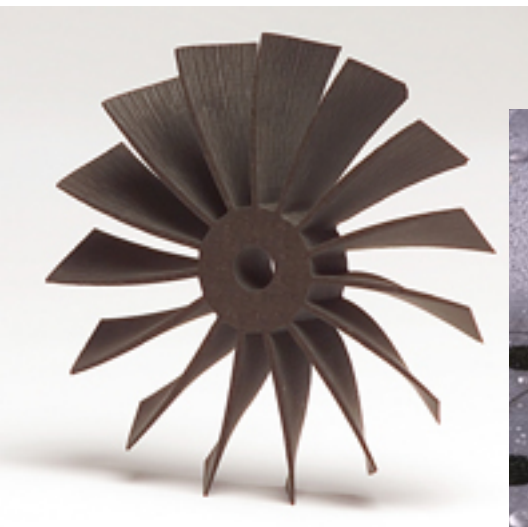
No jato de água pura, o fluxo supersônico corrói o material.

No jato de água abrasivo, o fluxo do jato acelera as partículas abrasivas e essas partículas, não a água, corroem o material.

Diâmetro do Bocal: 0,1 a 0,4 mm

Pressão: aprox. 400 MPa

Velocidade do jato: aprox 900 m/s



# Usinagem por jato d'água

Diâmetro do Bocal: 0,1 a 0,4 mm (usina contornos estreitos)

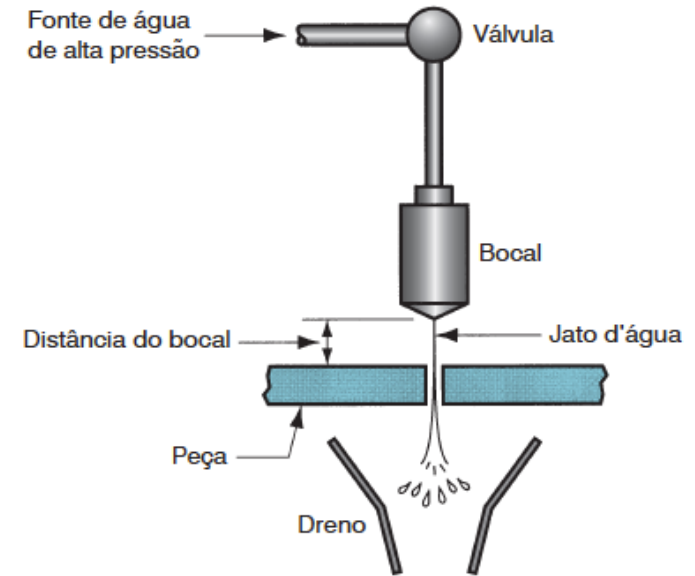
Parâmetros de Corte:

Pressão: aprox. 400 MPa

Velocidade do jato: aprox 900 m/s

Velocidade de Avanço: de 5 mm/s (12 pol/min) até mais de 500 mm/s (1200 pol/min)

Materiais de usinagem: plásticos, têxteis, materiais compósitos, pisos cerâmicos, carpetes, couro e papelão.



## Vantagens:

- (1) ausência de rebarbas ou da queima da superfície da peça
- (2) mínima perda de material devido à zona de corte estreita
- (3) nenhuma poluição ambiental
- (4) facilidade de automatização do processo.

## Limitação:

Uma limitação do corte por jato d'água é que o processo não é adequado para o corte de materiais frágeis (por exemplo, vidro) devido a sua tendência a trincar durante o corte.

# Usinagem por jato d'água com abrasivo

---

Materiais de usinagem: Peças Metálicas, Cerâmicas e Compositos.

O jato de água abrasivo é muito mais potente do que o jato de água pura.

Abrasivos: óxido de alumínio, o dióxido de silício, e a granada (um mineral de silicato) com granulometrias que variam entre 60 e 120.

Taxa de adição do abrasivo: aprox. 0,25 kg/min (0,5 lb/min)

Pressão: Mesmas do Jato d'água

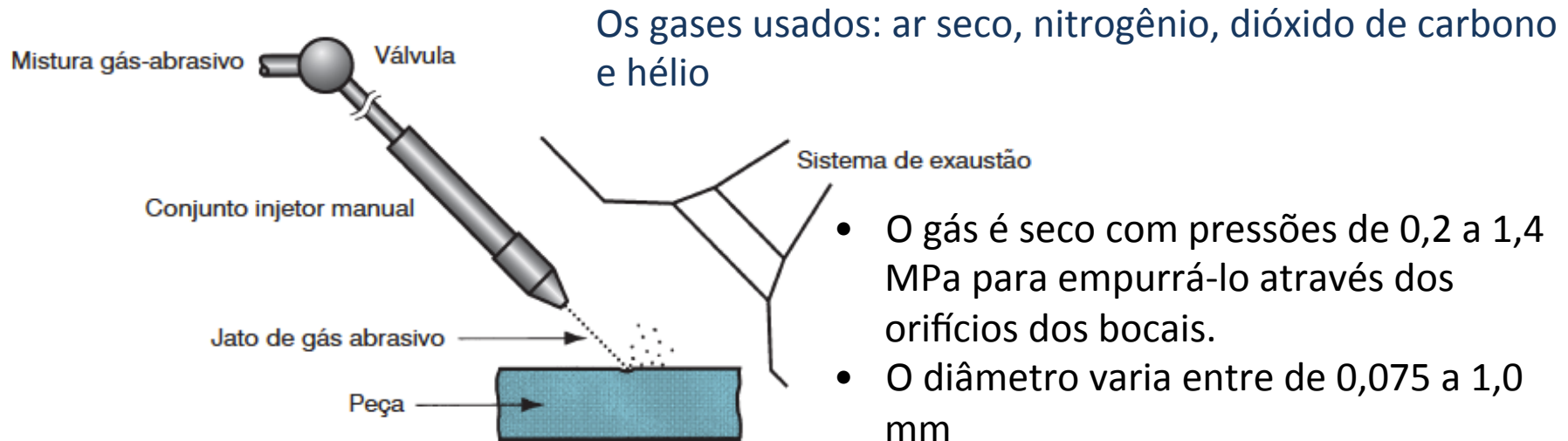
Distância do bocal: Metade ou  $\frac{1}{4}$  da sem abrasivo



“Os jatos de água abrasivo, utilizando parâmetros convencionais, podem cortar materiais com uma rigidez até e ligeiramente maior do que a do óxido de alumínio cerâmico (frequentemente denominado de alumina, AD 99,9).” Fabricante de Máquina

# Usinagem por jato abrasivo

Processo de remoção de material devido à ação de uma corrente de **gás em alta velocidade**, contendo pequenas partículas abrasivas



- O gás é seco com pressões de 0,2 a 1,4 MPa para empurrá-lo através dos orifícios dos bocais.
- O diâmetro varia entre de 0,075 a 1,0 mm
- Velocidades de 2,5 a 5,0 m/s
- Distância entre a ponta do bocal e a superfície da peça: entre 3 mm e 75 mm

**materiais  
duros e frágeis**

FIGURA 19.3 Usinagem por jato abrasivo. (Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição, por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão de John Wiley & Sons, Inc.)



# Usinagem por fluxo abrasivo

---

**Partículas abrasivas** misturadas com **um polímero viscoelástico** (**Mistura, Media ou mília de jateamento**) são forçadas a fluir através, ou em torno, das superfícies e bordas da peça.

Foi criado para rebarbar e polir superfícies de difícil acesso.

Também remove asperezas e arredonda cantos.

Tipicamente: Polímero + Carboneto de Silício

Pressões: 0,7 e 20 MPa

Vantagens:

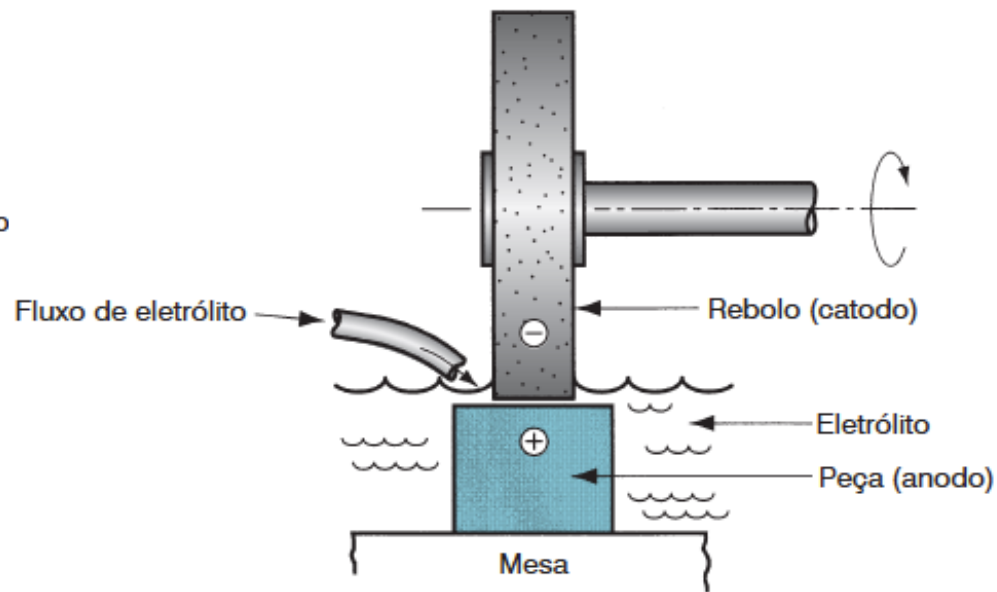
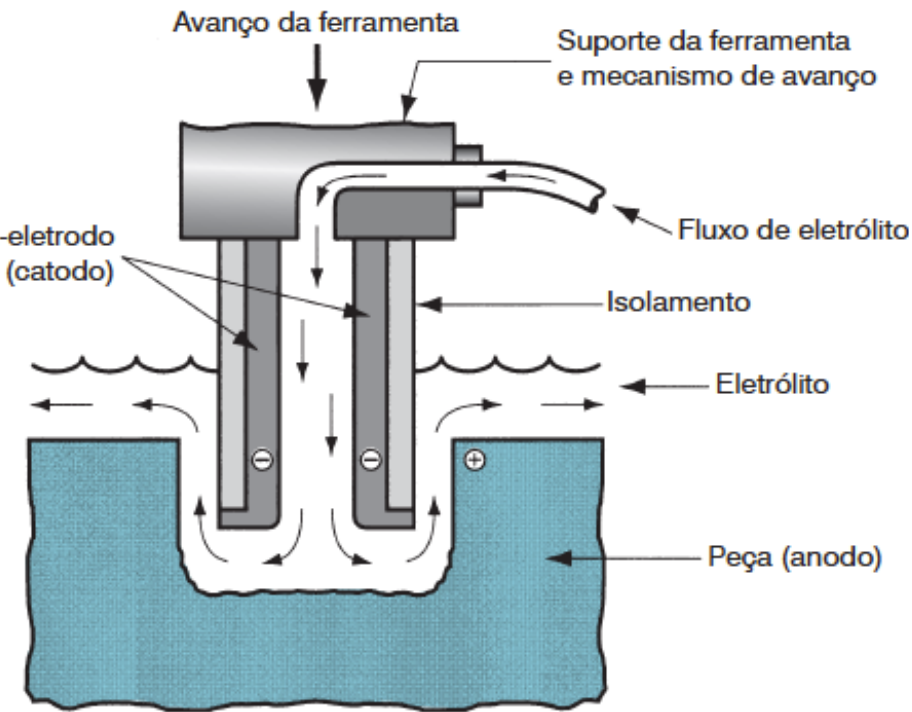
- Processo pode ser aplicado em qualquer material (titânio, superligas, materiais endurecidos e difíceis de usar).
- Desbaste e acabamento com um único passe.
- A Media (pasta) pode ser customizada para atender aos requisitos da aplicação.
- O controle do processo fornece uma qualidade consistente e a mais alta repetibilidade.

# Processos NC por Usinagem Eletro-química

---

A energia elétrica é usada em combinação com reações químicas para usinar material condutor. (inverso do que ocorre no revestimento por galvanização)

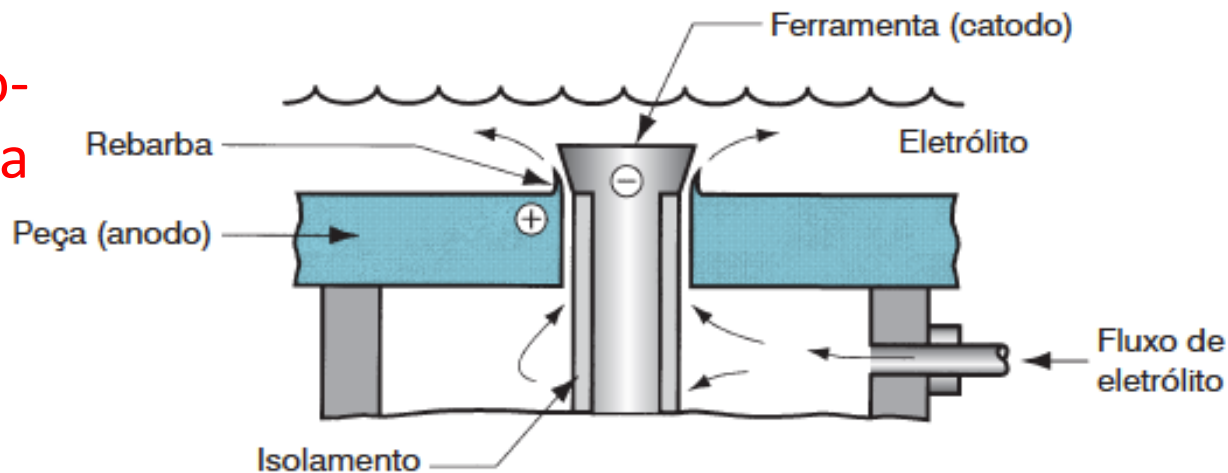
- Usinagem Eletroquímica
  - remove metal de uma peça por dissolução anódica, com uma ferramenta-eletrodo bem próxima à peça, entretanto, separada por um rápido fluxo de eletrólito.
- Rebarbação e Retificação Eletroquímica
  - adaptação da usinagem eletroquímica para remover rebarbas ou para arredondar os cantos pontiagudos de peças metálicas por dissolução anódica



## Retificação Eletro-Química

## Usinagem Eletro-Química

## Rebarbação Eletro-Química



(Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição, por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão de John Wiley & Sons, Inc.)

# Usinagem Eletro-química

---

- O material é retirado do anodo (polo positivo) e depositado sobre o catodo (polo negativo), na presença de um banho de eletrólito.
- O banho de eletrólito flui rapidamente entre os dois polos para levar o produto da reação, de modo que ele não se deposite sobre a ferramenta.
- Materiais de ferramenta: Cobre, Aço Inox e Latão.

# Processos NC por Energia Térmica

---

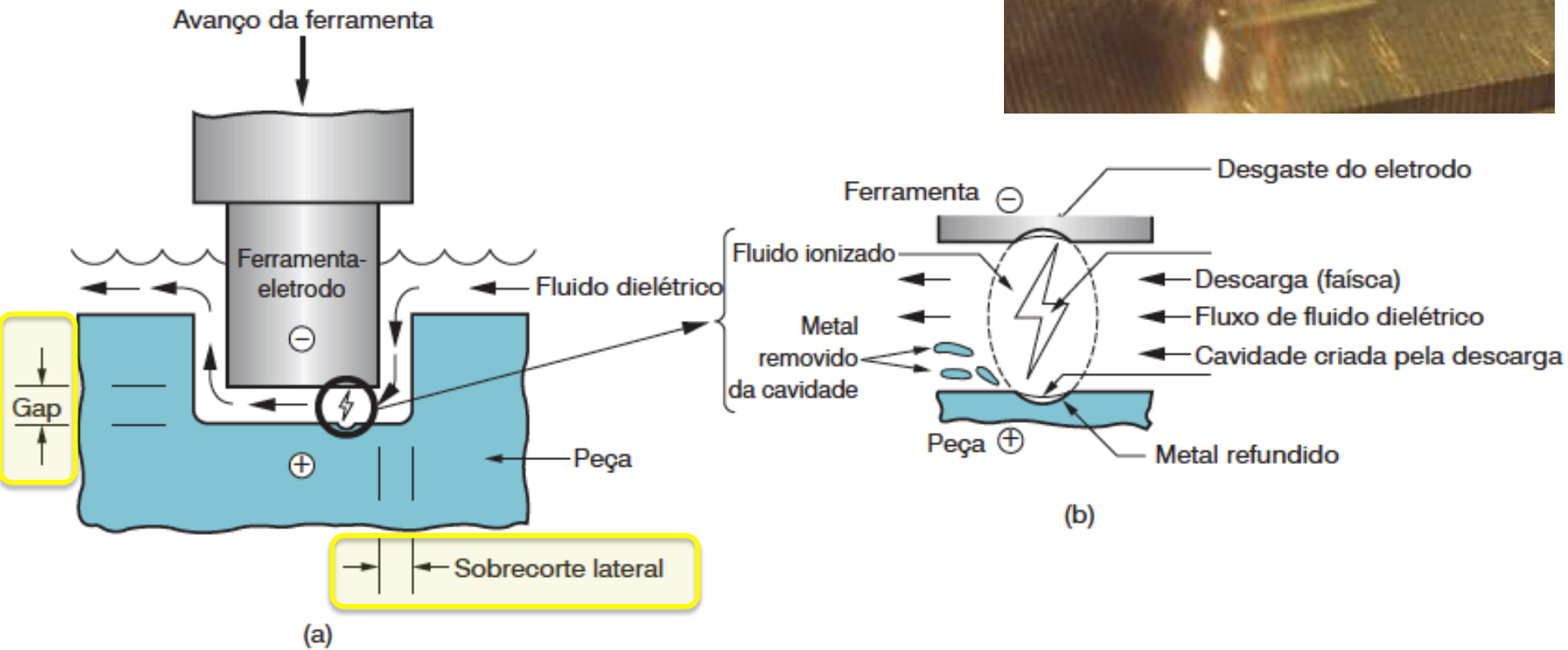
Temperaturas localizadas muito elevadas, o suficiente para remover o material por fusão ou vaporização.

Por isso, estes processos causam danos físicos e metalúrgicos para a superfície recém usinada da peça.

- Processos por Eletroerosão (EDM) e EDM a fio  
(Descargas Elétricas com fluido dielétrico)
- Usinagem por Feixe de Elétrons
- Usinagem a Laser

# Eletro-Erosão EDM

Os dois importantes parâmetros de processo na EDM são: a corrente de descarga e a frequência de ocorrência das descargas.  
À medida que a ferramenta penetra no eletrodo de trabalho, ocorre um **sobrecorte lateral** ( $<0.1$  mm)



# Eletro-Erosão EDM

---

Ferramenta:

- A dureza e resistência do material da peça não são fatores relevantes em EDM, uma vez que o processo não é uma competição de dureza entre a ferramenta e a peça.
- As altas temperaturas de descarga de que fundem a peça também fundem a ferramenta, criando uma pequena cavidade na superfície oposta à cavidade produzida na peça. O desgaste da ferramenta é normalmente medido como **a taxa de remoção de material** da peça com relação ao material retirado da ferramenta

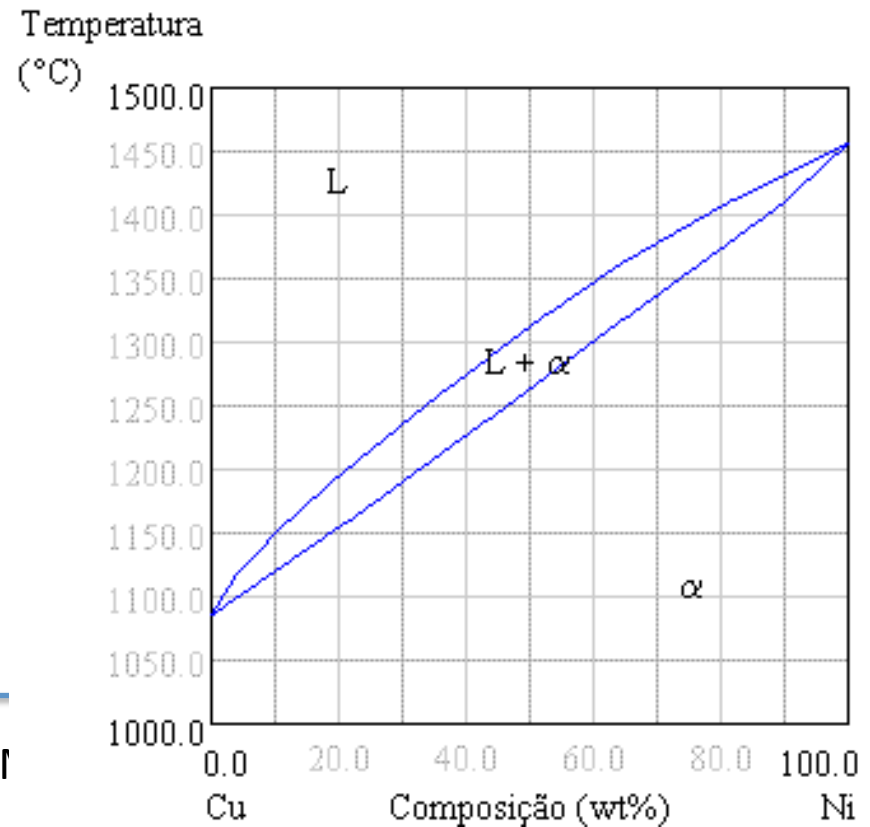
$$Q_{RM} = \frac{664 \cdot i(A)}{T_f^{1,23}}$$

$i$ : corrente de descarga  
 $T_f$ : Temperatura de Fusão

664 é uma constante com dimensões no SI igual a  $^{\circ}\text{C}^{1,23}/\text{A}$

# Exemplo

- Uma liga Cupro-niquel (20-80) será usinada em uma operação de EDM com a corrente de descarga de 20 A. Qual é a taxa de remoção de metal esperada?







ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

# International Journal of Machine Tools & Manufacture

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ijmactool](http://www.elsevier.com/locate/ijmactool)



## Developments in electrochemical discharge machining: A review on electrochemical discharge machining, process variants and their hybrid methods



Tarlochan Singh\*, Akshay Dvivedi

Mechanical and Industrial Engineering Department, Indian Institute of Technology Roorkee, Roorkee 247667, India

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695516300128>

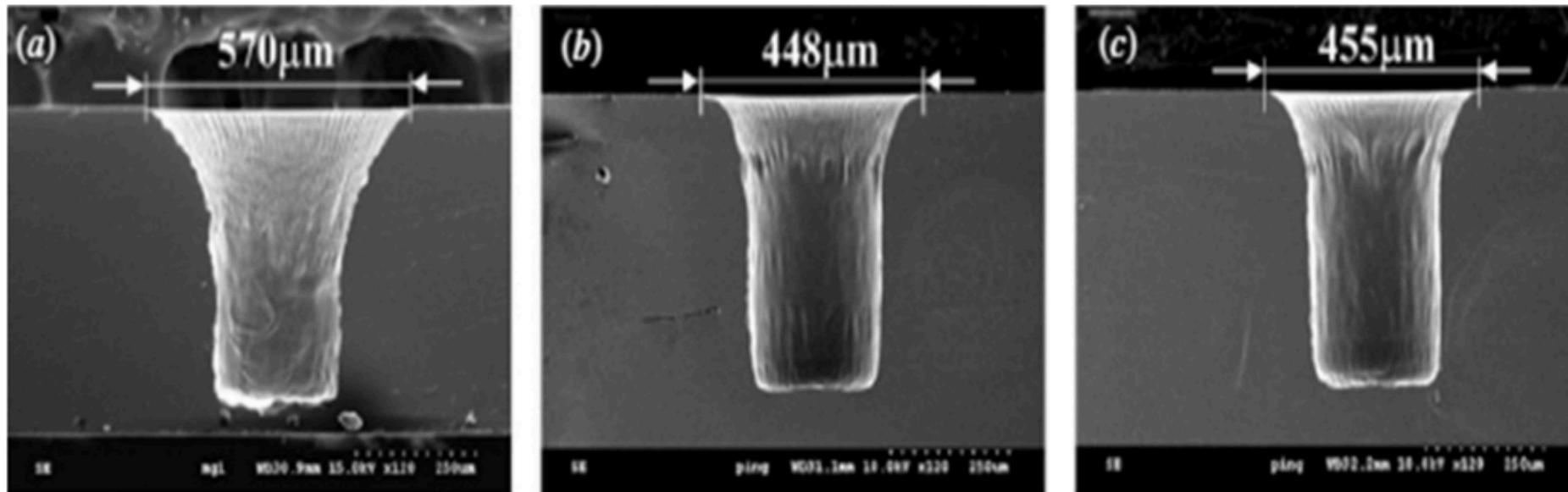
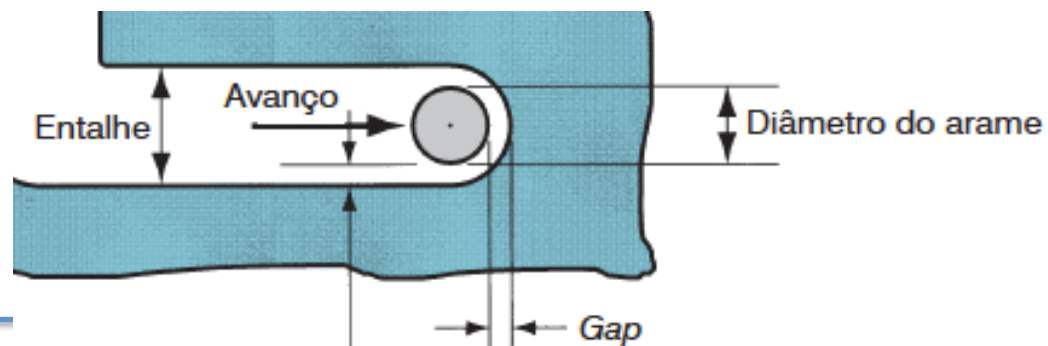
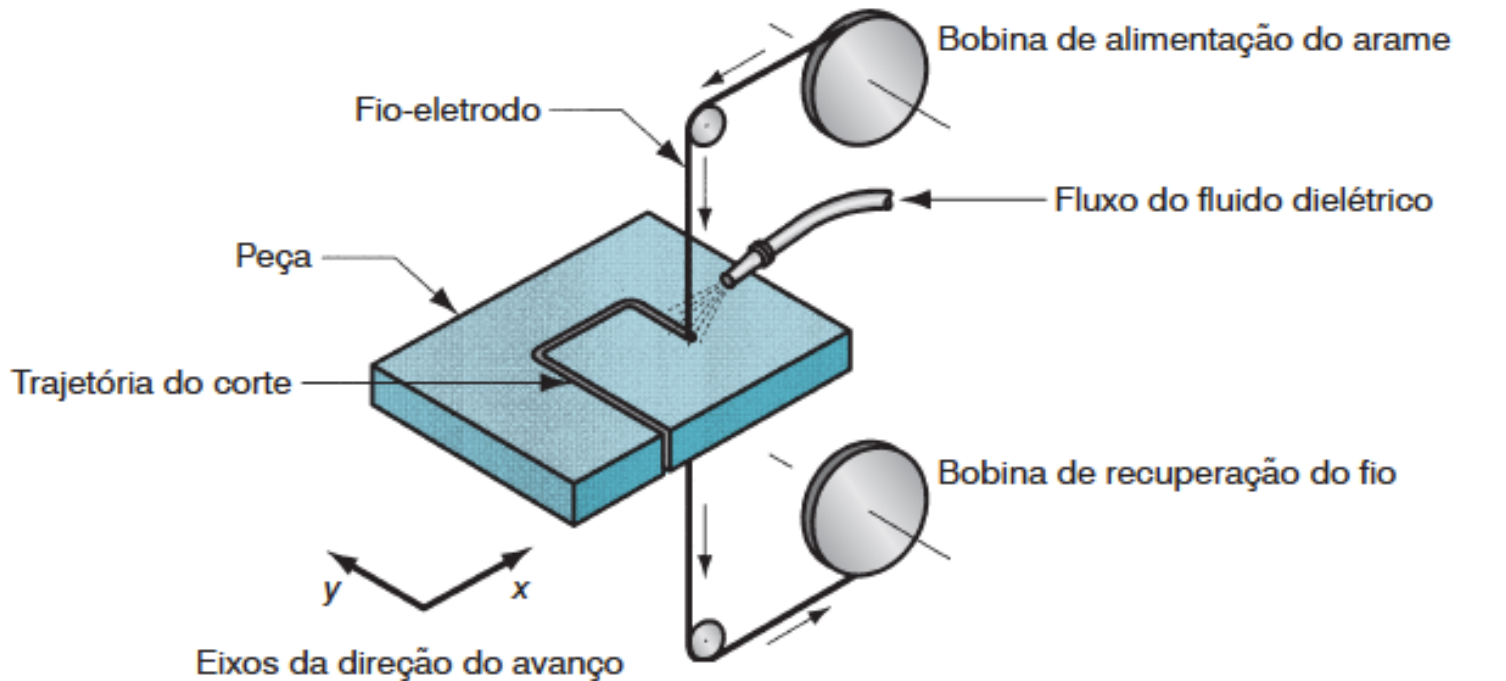


Fig. 7. Micro holes developed by using (a) DC voltage (b) pulse voltage, and (c) offset pulse voltage [50].

# Eletroerosão (EDM) a fio



Sobrecorte lateral

# Usinagem por Feixe de Elétrons

A **usinagem por feixe de elétrons** usa um fluxo de elétrons em alta velocidade focalizado na superfície da peça para remover o material por fusão e vaporização.

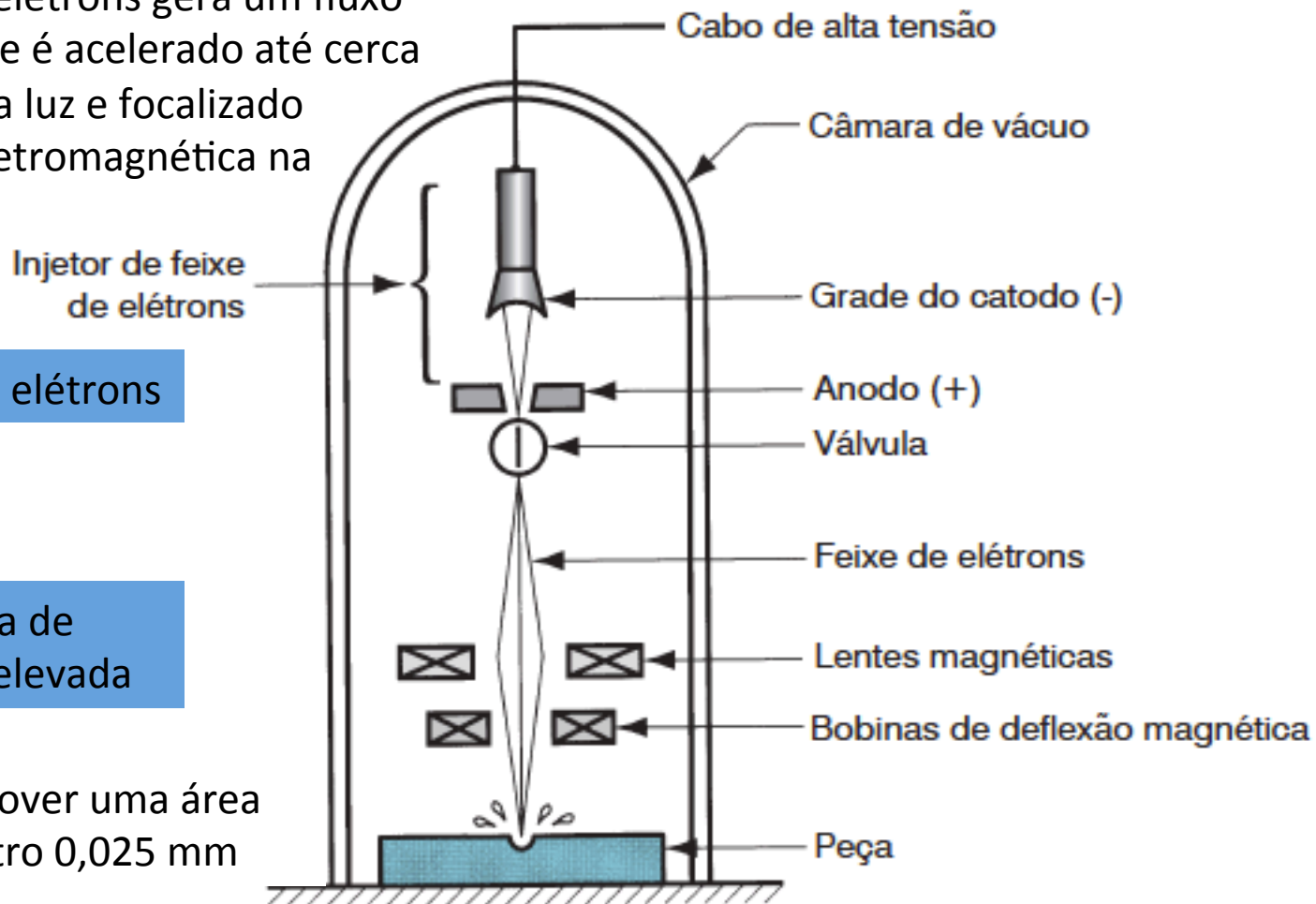
Um canhão de feixe de elétrons gera um fluxo contínuo de elétrons que é acelerado até cerca de 75% da velocidade da luz e focalizado através de uma lente eletromagnética na superfície da peça.

Energia cinética dos elétrons



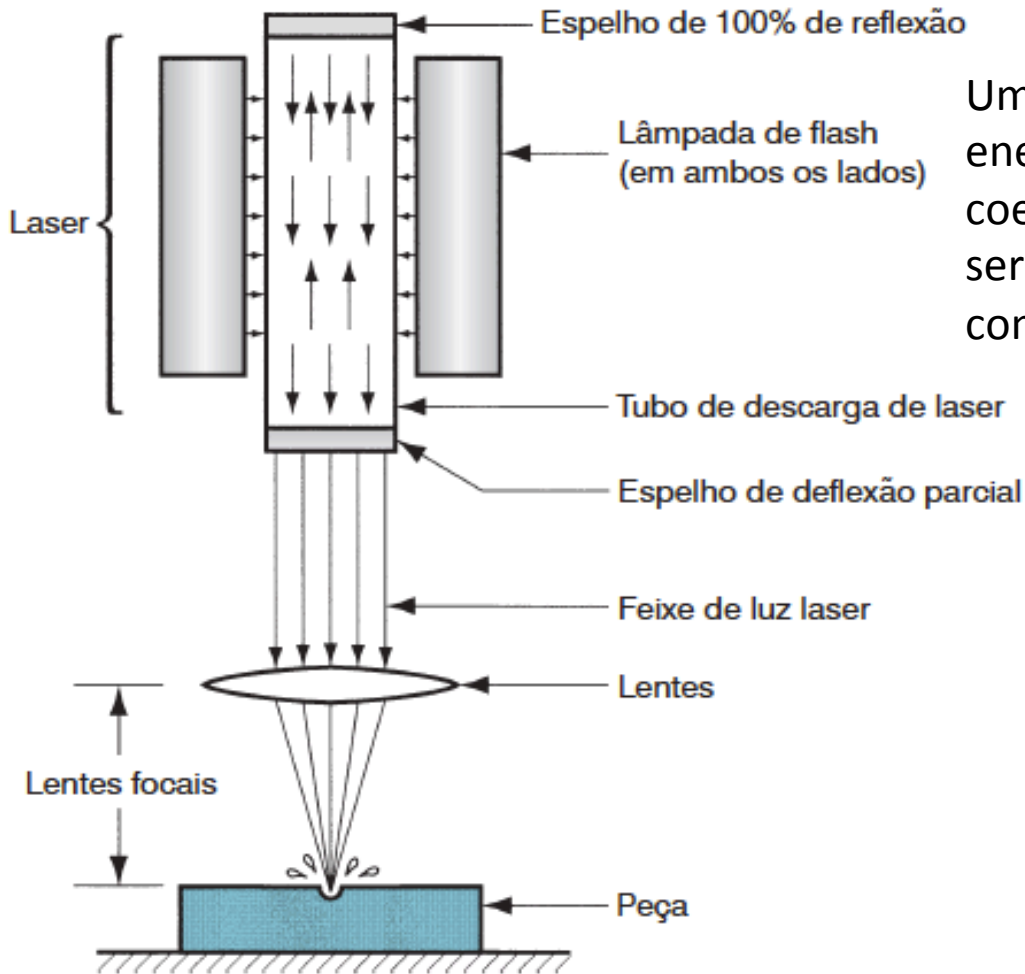
Energia térmica de densidade muito elevada

— Pode remover uma área de diâmetro 0,025 mm



# Usinagem a Laser

LASER: amplificação de luz por emissão estimulada de radiação



Um laser é um transdutor óptico, que converte energia elétrica em um feixe de luz altamente coerente (Monocromático e Colimado) e pode ser focalizado para um ponto muito pequeno, com alta densidade de energia resultante.

energia da luz de um laser

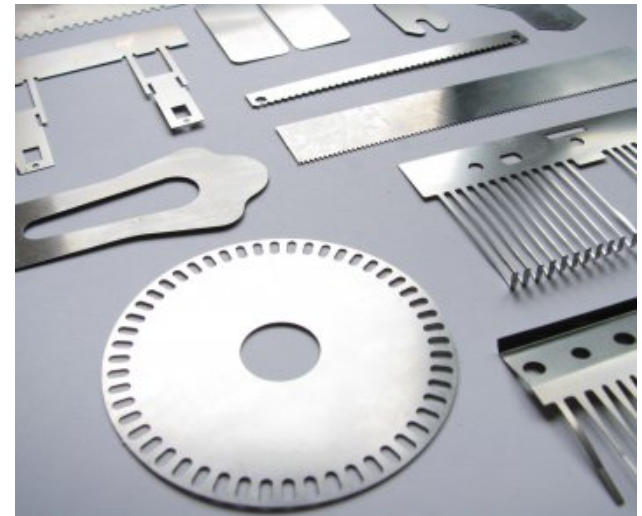


Remover o material por ablação e evaporação

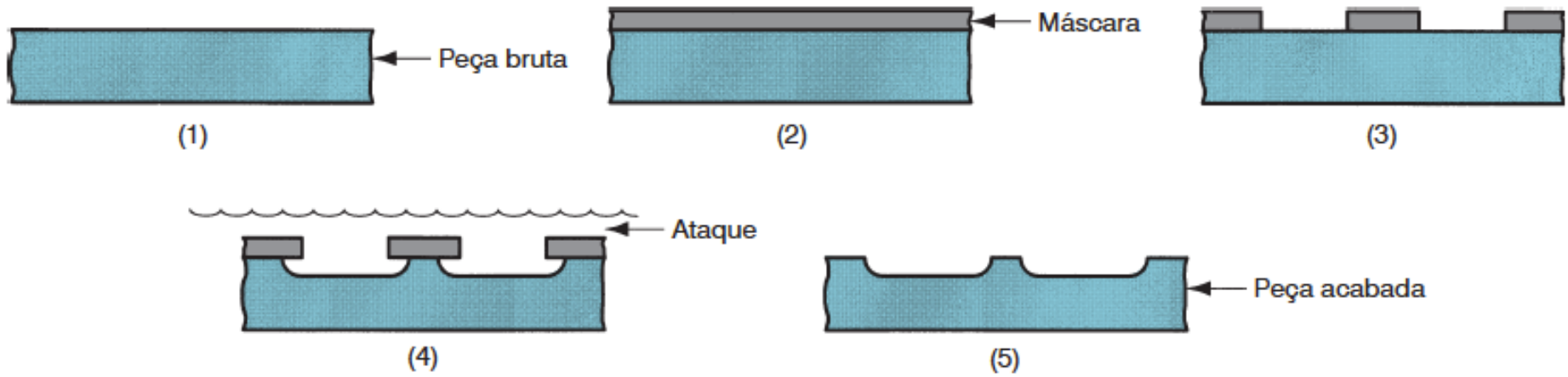
# Processos NC por Usinagem Química

Na usinagem química o material é removido por meio de um forte ataque químico. (Processos químicos: fresamento químico, estampagem química, gravação química e usinagem por fotocorrosão)

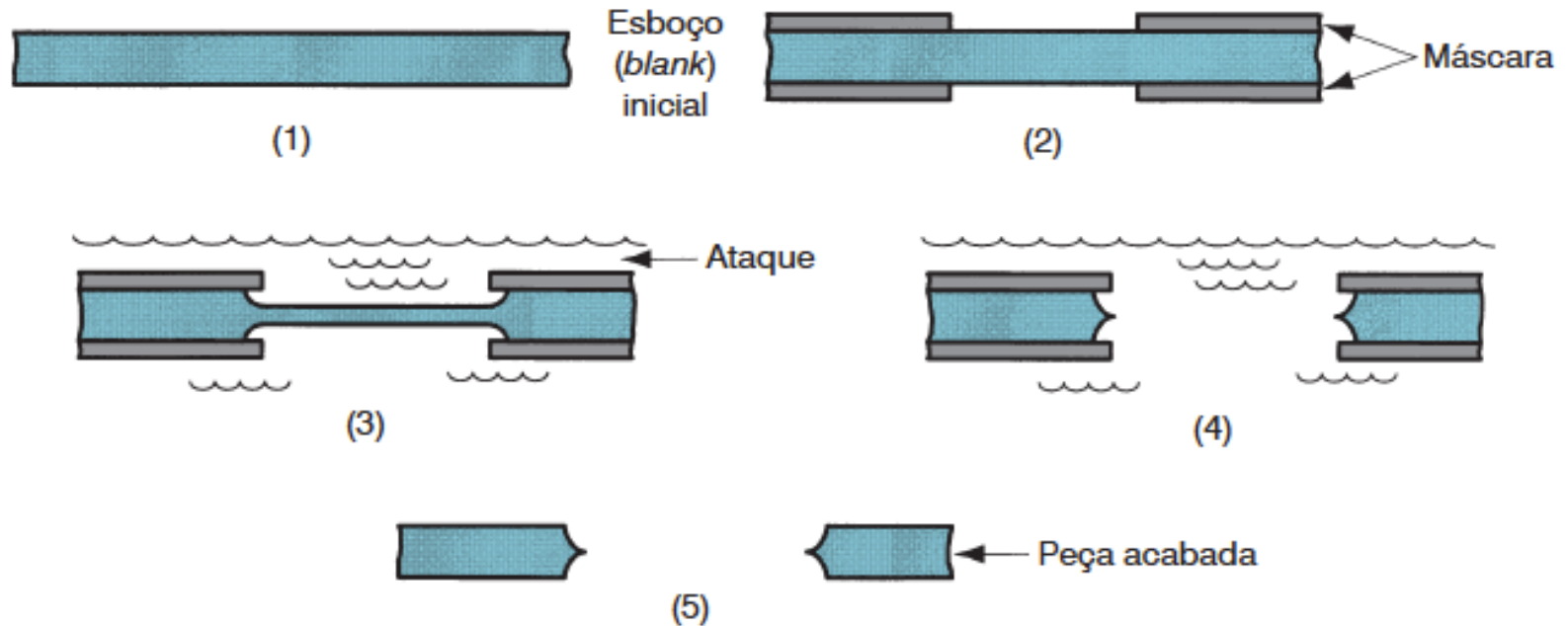
- **Limpeza** - Para remover uniformemente o material
- **Máscara** – Aplicação de um revestimento protetor resistente ao ataque químico (máscara) em certas partes da superfície da peça
- **Ataque** - Remoção do material, a peça é imersa em um reagente que quimicamente ataca as partes da superfície da peça que não estão protegidas pela máscara
- **Retirada da máscara**



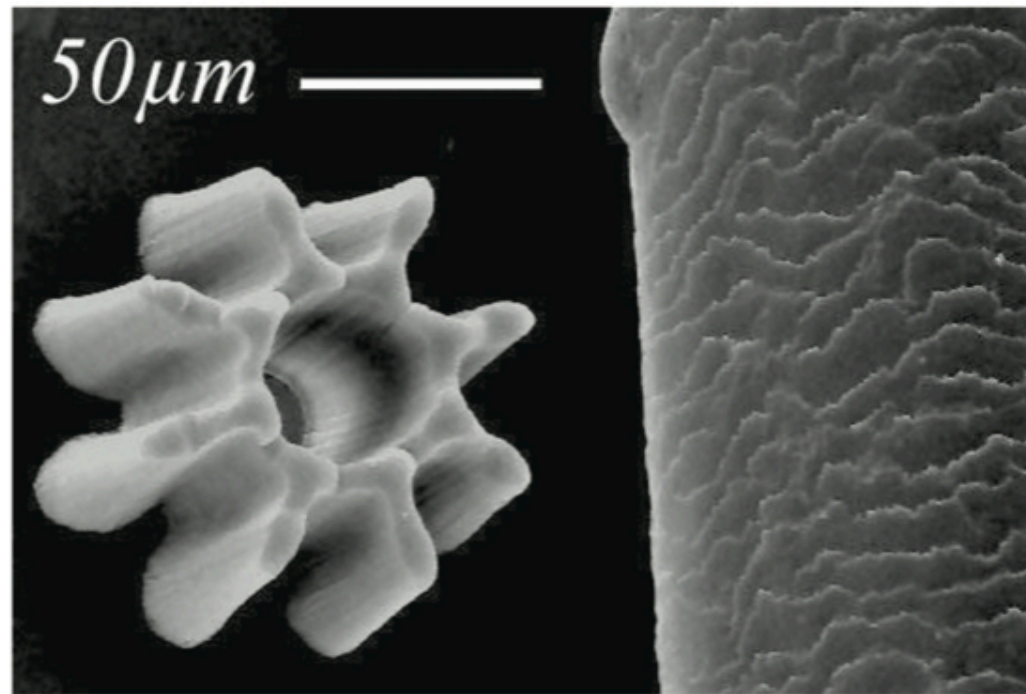
## Fresamento Químico



## Estampagem Química



# Microfabricação



**A 27.3** Engrenagem microscópica e um humano dispostos lado a lado. A imagem luzida usando microscópio eletrônico de ra. A engrenagem é feita de polietileno de isidade produzido por processo similar ao o LIGA (Seção 27.2.2), com diferença que ide do molde é fabricada usando feixes ons em vez de raios X. Esta foto é uma de M. Ali (*International Islamic University* i).

# Microfabricação e Microusinagem

---

## Processos de Microfabricação

- Processos com Camadas de Silício
- Processos LIGA
- Microusinagem mecânica

Microfresamento, Microfuração e Microtorneamento



## Produtos de Microssistemas

- Microssensores
- Microatuadores
- Microestruturas e microcomponentes
- Microssistemas e microinstrumentos



# Typical branches –

MST are found in different branches with the tendency for mass production

## Automotive industry

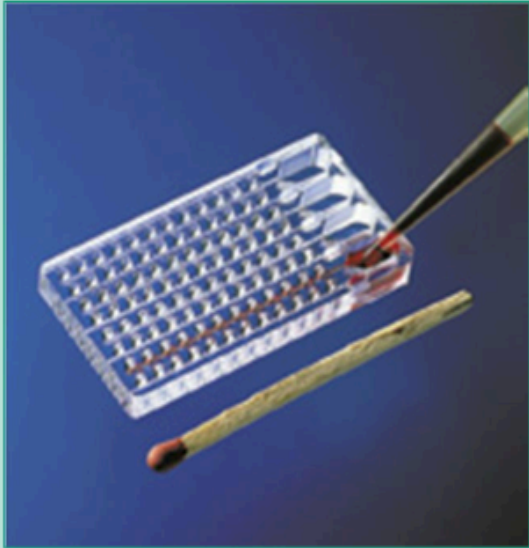
- Sensor technology
- Optical elements for interior and exterior
- Micro mechanical devices
- ...



Source: Cooke Corp., microparts, Euronano

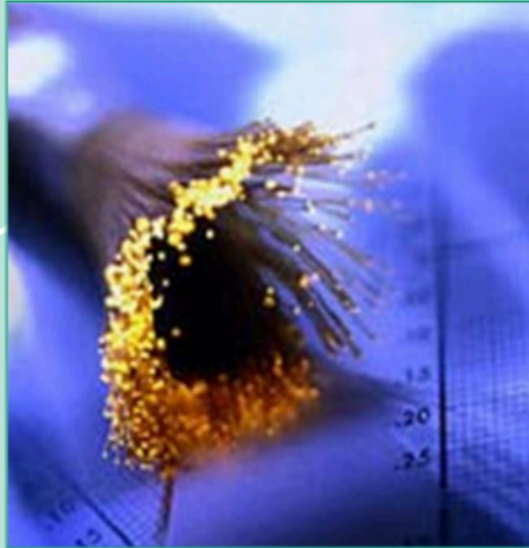
## Life sciences

- Medical technology
- Biotechnology
- Techniques for analysis
- ...

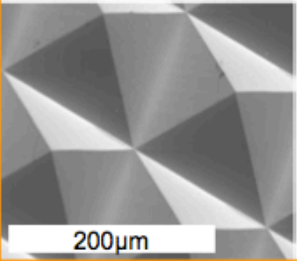
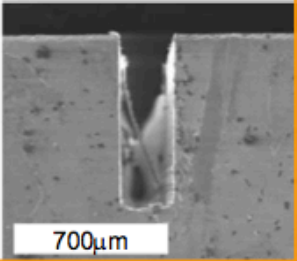
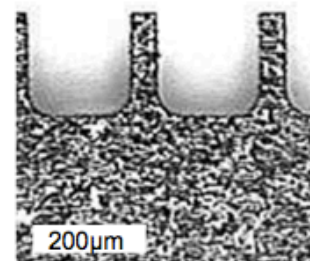
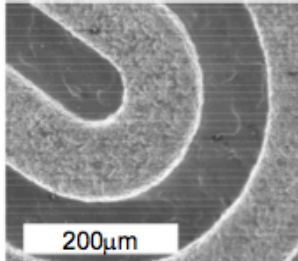
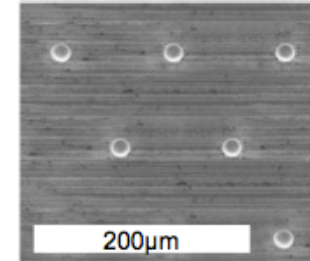


## Telecommunication

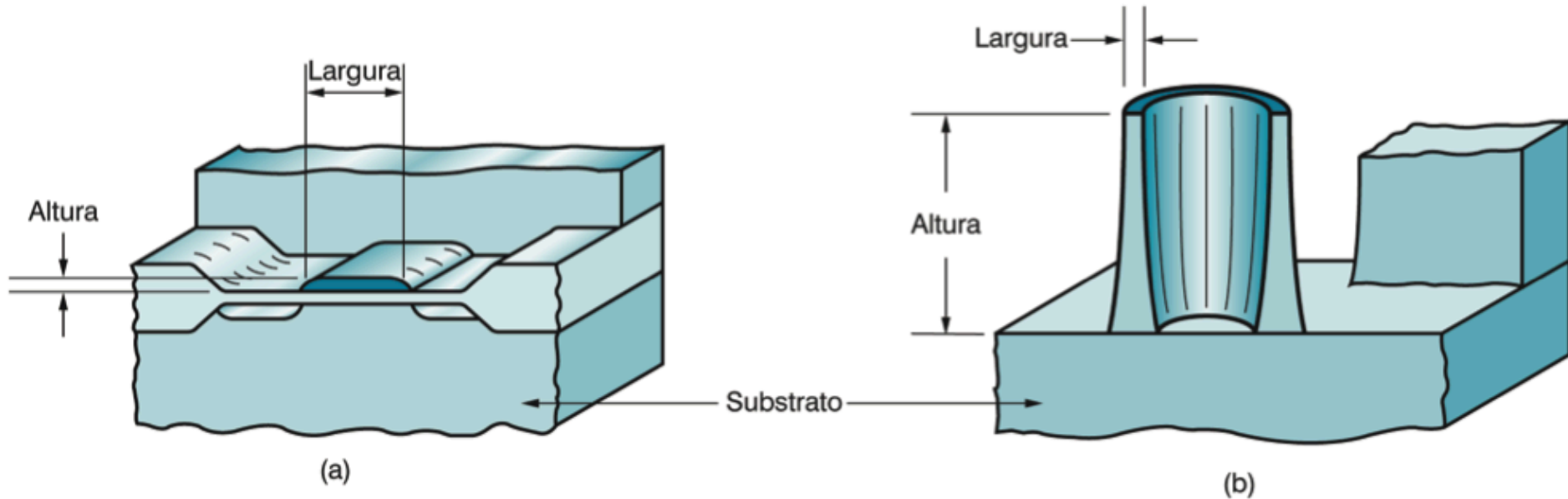
- Optical data transfer and coupling
- Display technology
- ...



## Conventional Technologies in MST

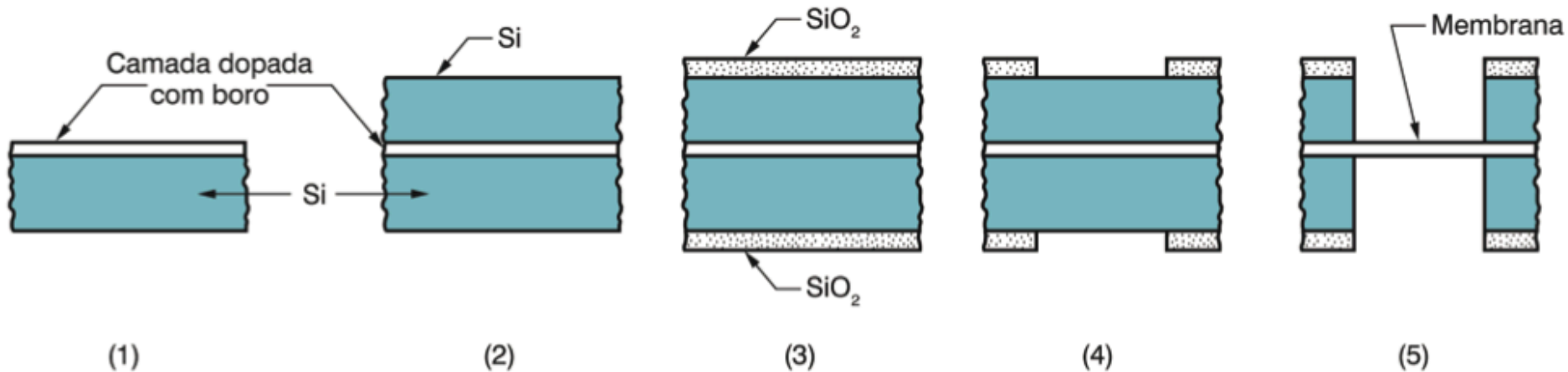
	Chip removal		EDM		Lasering
	Diamond	Carbide	Wire-EDM	Sink-EDM	Nd:YAG
Workpiece material	Nickel Brass Aluminium Plastics	Steel Ceramics Graphite	Metals (Ceramics)	Metals (Ceramics)	Metals Graphite Ceramics
Lateral structures	10 - 1000 $\mu\text{m}$	10 - 1000 $\mu\text{m}$	20 - 50 $\mu\text{m}$	20 - 40 $\mu\text{m}$	5 - 1000 $\mu\text{m}$
Aspect ratio	10 - 50	2 - 10	25 - 80	10 - 25	10 - 100
Geometric freedom	++	++	+	+	++
Surface quality $R_a$	0.01 $\mu\text{m}$	0.3 $\mu\text{m}$	0.04 - 0.06 $\mu\text{m}$	0.2 - 0.4 $\mu\text{m}$	0.1 - 1.3 $\mu\text{m}$
					

# Razão de Aspecto



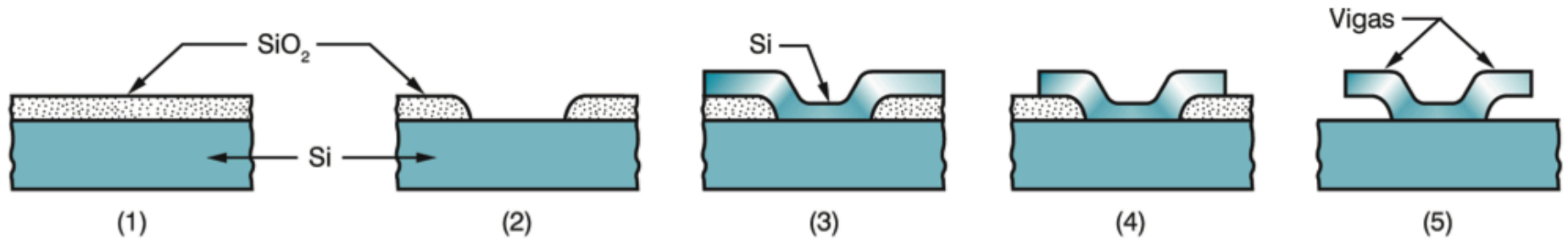
**FIGURA 27.4** Razão de aspecto (relação altura-largura) típica (a) da fabricação de circuitos integrados e (b) de microdispositivos. (Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com a permissão de John Wiley & Sons, Inc.)

# Processos Com Camadas de Silício



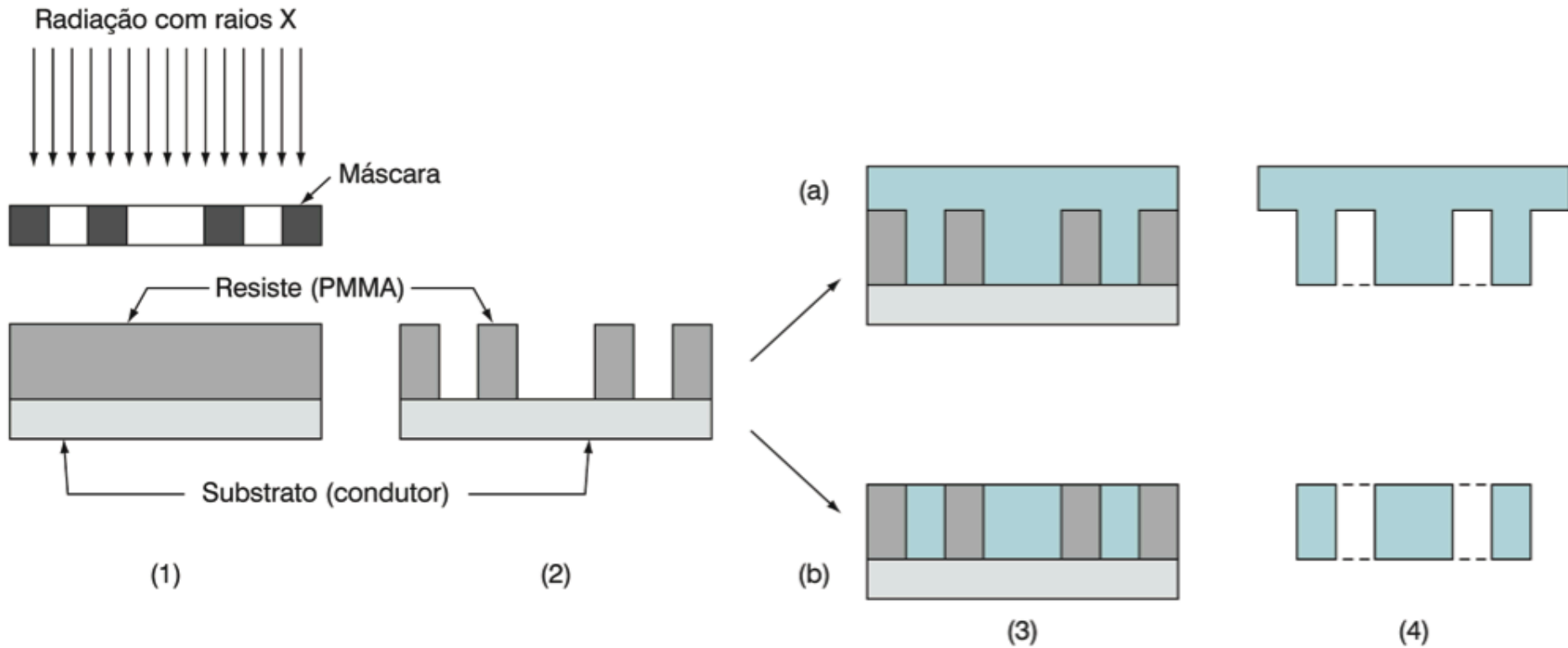
**FIGURA 27.7** Formação de fina membrana sobre um substrato de silício: (1) o substrato de silício é dopado com boro, (2) uma espessa camada de silício é aplicada no topo da camada dopada por deposição epitaxial, (3) os dois lados são termicamente oxidados para formar um resiste de  $\text{SiO}_2$  nas superfícies, (4) parte do resiste é retirado por litografia e (5) corrosão anisotrópica é usada para remover o excesso de silício na camada dopada com boro. (Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão de John Wiley & Sons, Inc.)

# Processos Com Camadas de Silício



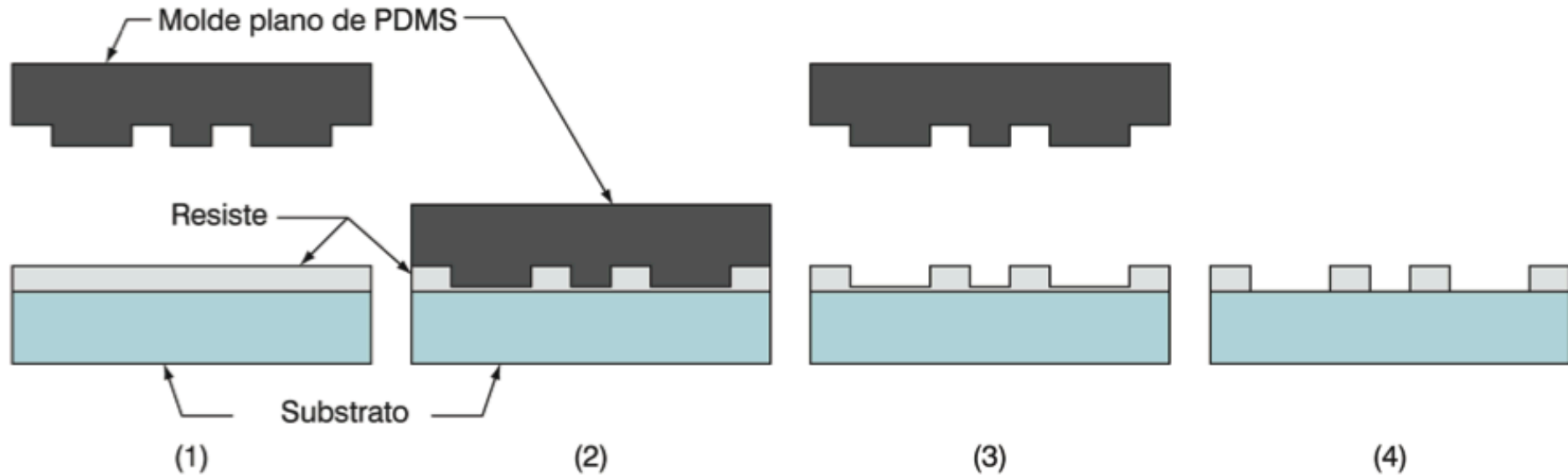
**FIGURA 27.8** Microcorrosão de superfície para fabricar vigas: (1) sobre o substrato de silício cria-se uma camada de dióxido de silício, cuja espessura determina o espaçamento da viga com a superfície; (2) partes da camada de  $\text{SiO}_2$  são corroídas usando litografia; (3) uma camada de polissilício é aplicada; (4) partes da camada de polissilício são corroídas usando litografia; e (5) a camada de  $\text{SiO}_2$  abaixo das vigas sofre corrosão seletiva. (Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão de John Wiley & Sons, Inc.)

# Processos LIGA



**FIGURA 27.10** Processo LIGA e suas etapas: (1) espessa camada de resiste é aplicada, e algumas seções são expostas a raios X por meio de uma máscara, (2) as áreas expostas do resiste são removidas, (3) a eletroformação é utilizada para completar os espaços deixados no resiste, e (4) o resiste é retirado para formar (a) um molde ou (b) uma peça metálica. (Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão de John Wiley & Sons, Inc.)

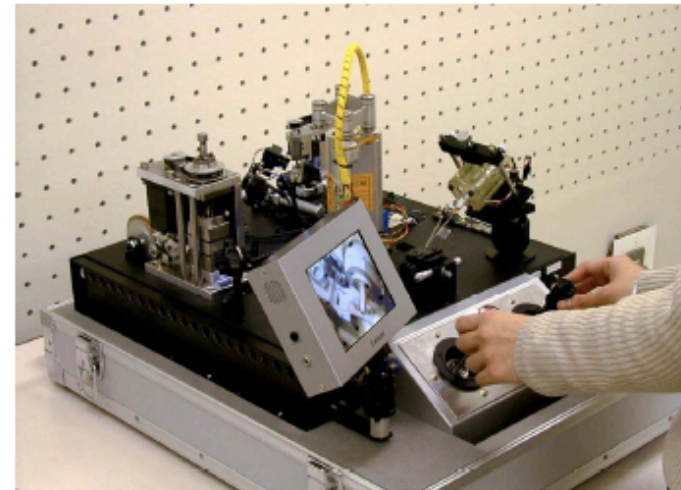
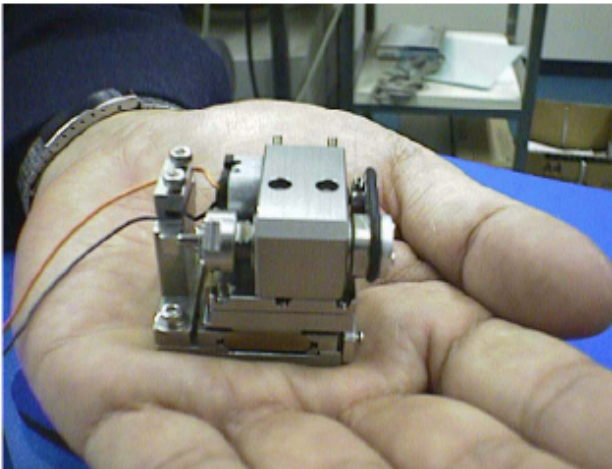
# Micro litografia



**FIGURA 27.12** Etapas da microimpressão litográfica: (1) o molde é posicionado acima do resiste e (2) pressionado contra o resiste, (3) em seguida, o molde é retirado, e (4) o resiste remanescente é removido de regiões específicas da superfície do substrato. (Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão de John Wiley & Sons, Inc.)

Pode-se usinar na escala micro e sub-micron usando:

- Máquina-ferramenta de Ultra-precisão (posicionamento com resolução nanométrica) - especialmente tornos com ferramentas de diamante
- Máquina-ferramenta em miniatura (Microtorno, microfresa, micro-edm, etc)



... ..



# Microferramentas

Desafios das Micro-ferramentas:

- ◆ A fabricação das ferramentas;
- ◆ Raio de arredondamento;
- ◆ Metrologia das suas características.

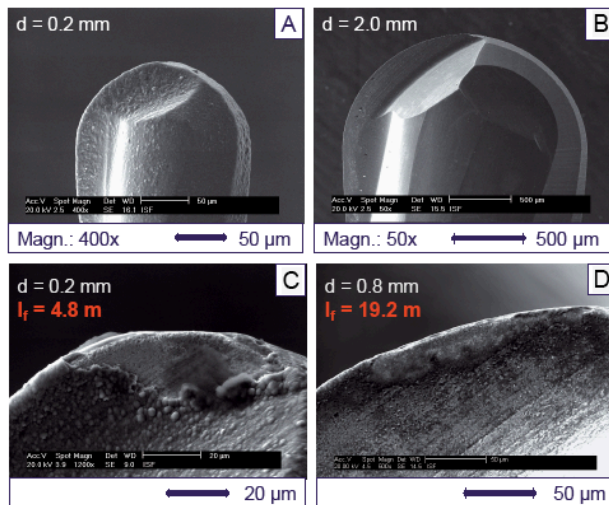
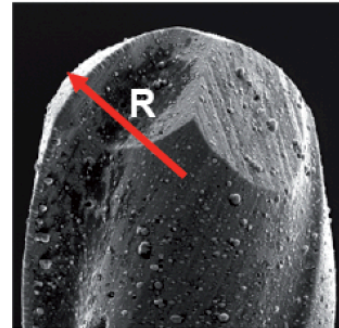
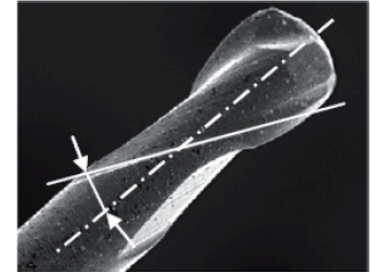


Figure 29: Scaling effect on tool geometry and wear (work material: 40CrMnMo7, 50 HRC, cutting speed:  $V_c = 200/100$  m/min, depth / width of cut:  $a_p = a_e = 0.04 \times d$ , feed:  $f_z = 0.01 \times d$ , number of teeth: 2, down milling, tool material: cemented carbide with TiAlN coating) [47].

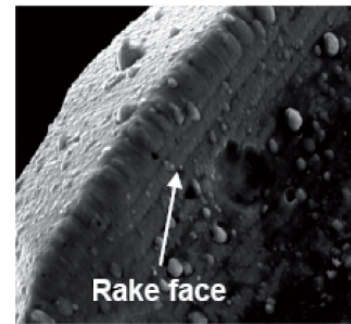
Tool radius on spherical end



Helix angle



Rake face roughness



Cutting edge radius

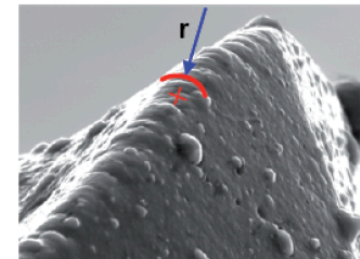


Figure 5: Tool radius, helix angle, rake face roughness and cutting edge radius on a 200 μm ball nose end mill [45].

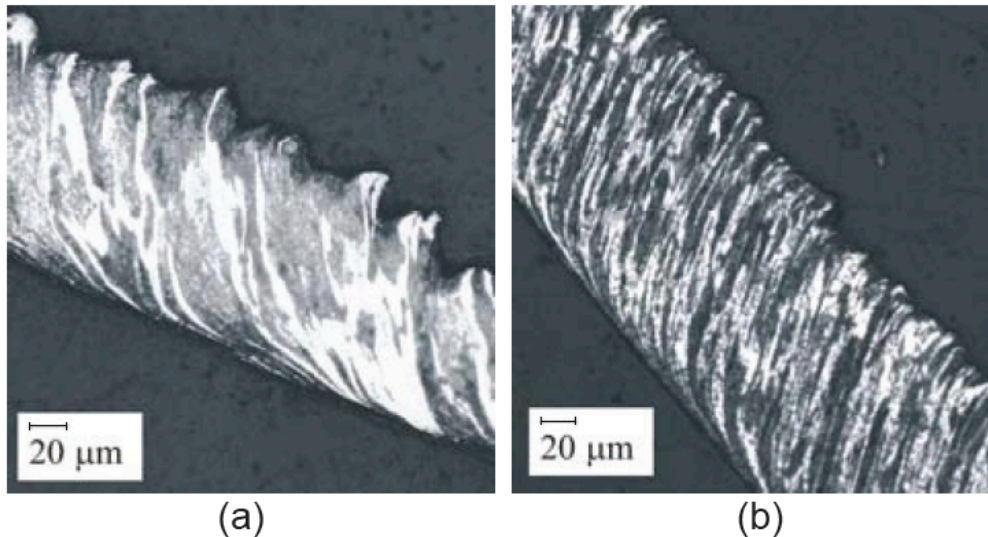


Figure 3: Chip formation when cutting (a) normalized and (b) refined 1045 steel microstructure. Uncut chip thickness was 50  $\mu\text{m}$  in both cases.

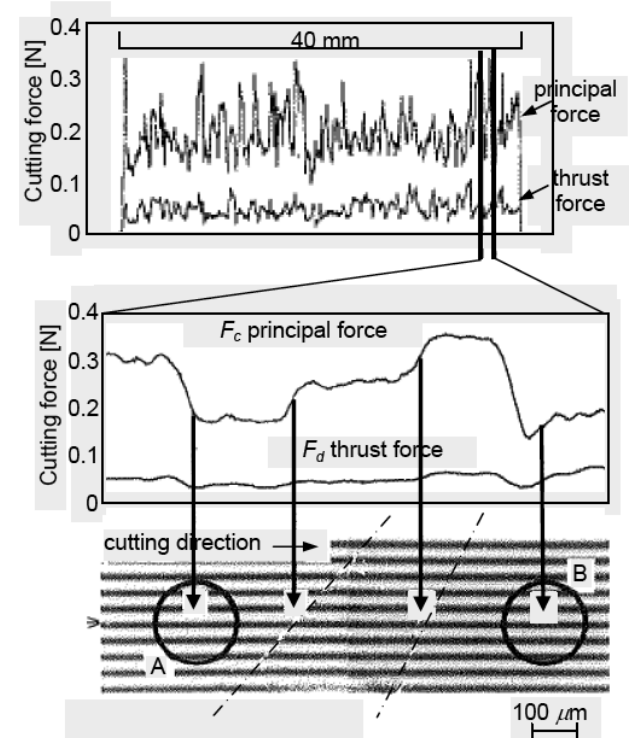
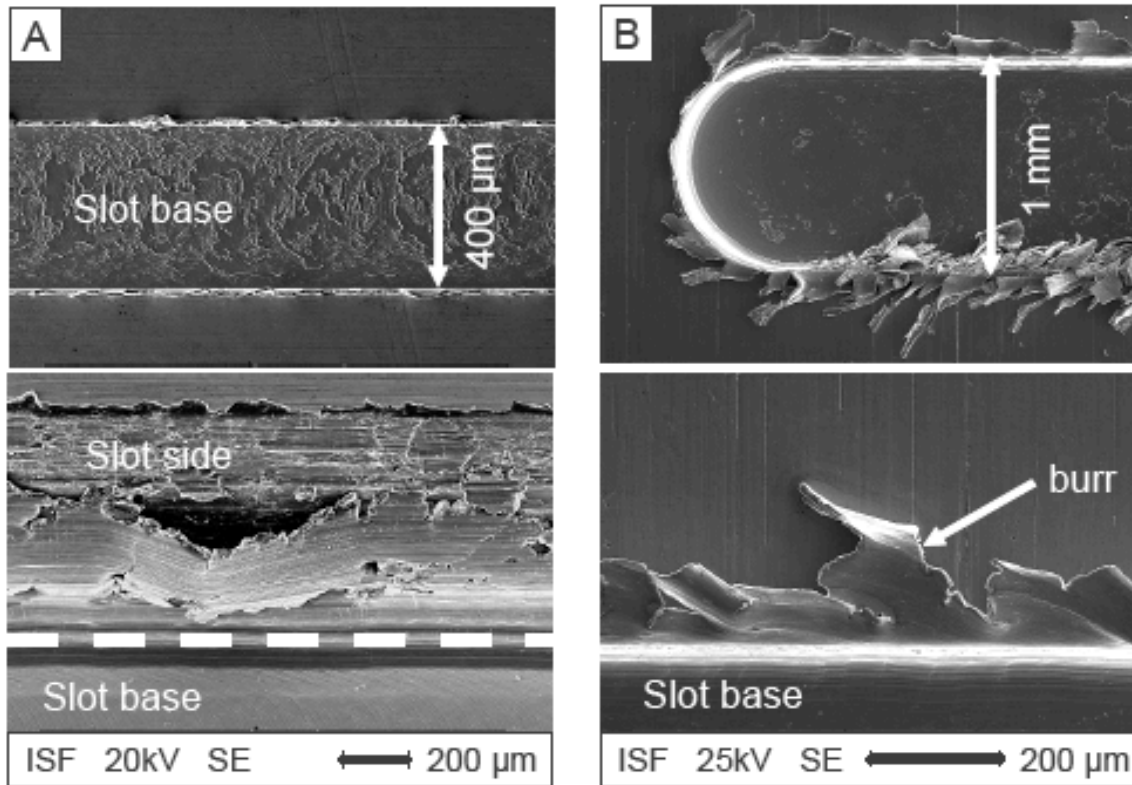


Figure 4: Cutting force variation corresponding with the grain boundary of Al alloy (grain boundaries can be seen in magnified image in A and B) [21].



(a) Adhesion

(b) Burr formation

Figure 9: Typical surface defects in micromilling (work material: NiTi shape memory alloy) [47].