

# Operazioni di Finitura

Smerigliatura



Schema della struttura di un abrasivo rivestito per la **Smerigliatura**. Primi esempi sono la carta vetrata sviluppata nel XVI secolo e la tela abrasive. Oggi si usano **nastri, dischi e fogli**.

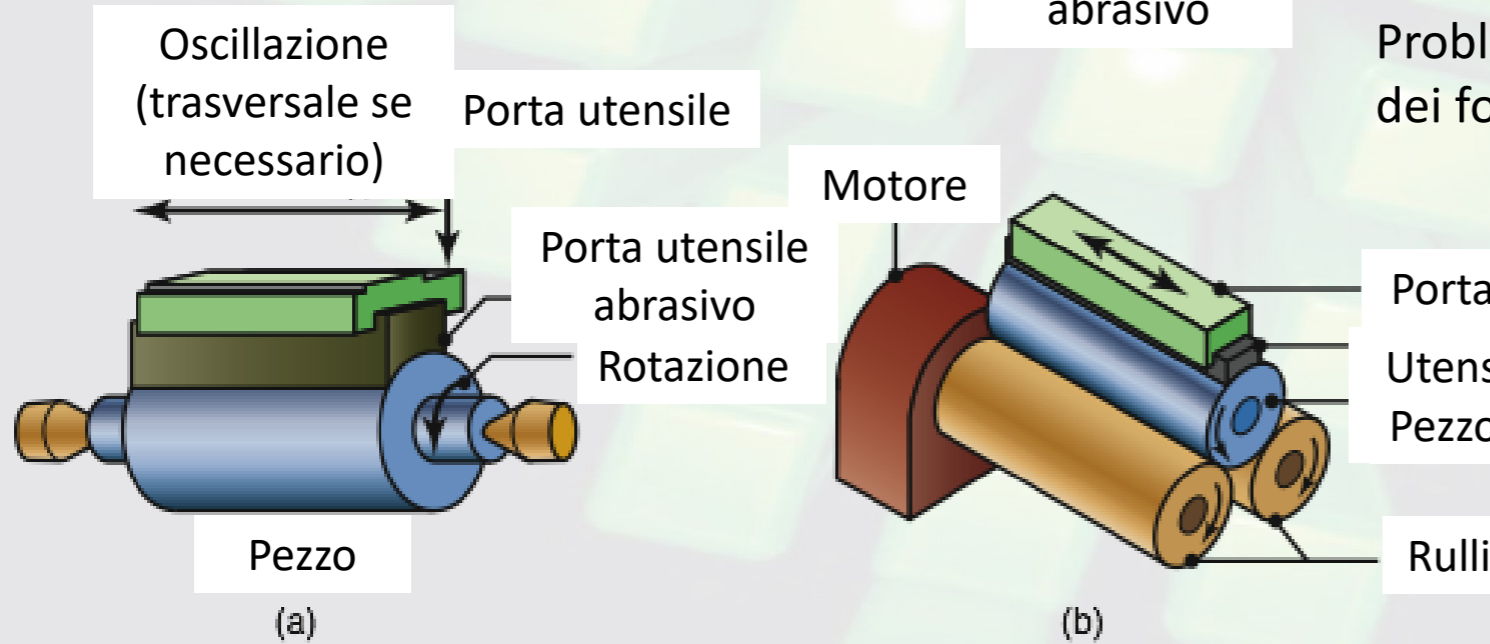
Levigatura



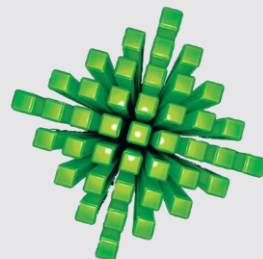
Schema di un **utensile levigatore** per migliorare la finitura superficiale di fori realizzati per asportazione di truciolo.

Utensile di abrasivo ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) montato su molle  
 Movimento rotatorio + assiale alternato  
 Problematiche: perdita della cilindricità e rettilineità dei fori

Superfinitura



Schema del processo di **superfinitura** di un pezzo cilindrico mediante:  
 (a) Micro levigatura cilindrica.  
 (b) Micro levigatura senza centri.



# Sbavatura

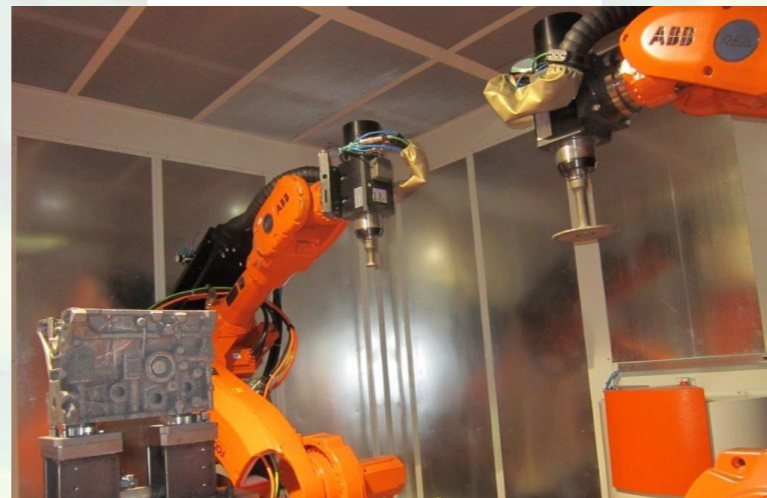
Con l'obiettivo di rimuovere le bave può essere eseguita:

- **A mano mediante lime;**
- **Robotizzata mediante dischi o nastri;**
- **Mediante vibratori** contenenti i pezzi e grani di abrasivo o sferette di acciaio;
- **Mediante sabbiatura**, polveri abrasive vengono sparate ad alta velocità contro il pezzo.

Manuale con lima



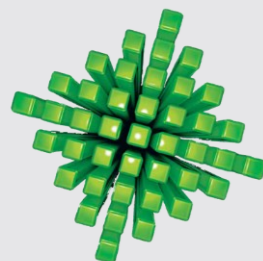
Robotizzata



Mediante sabbiatura



Mediante vibratori



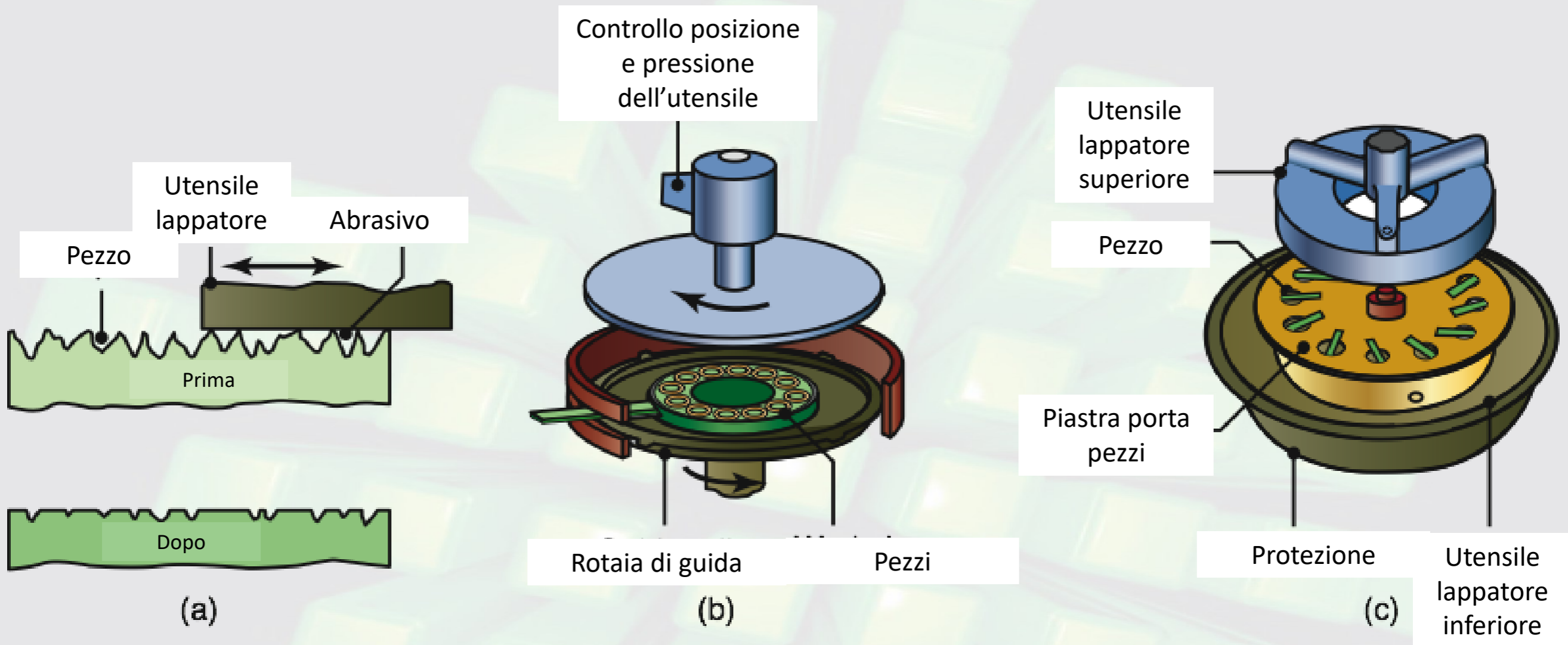
Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

Kalpakjian • Schmid

© 2008, Pearson Education

ISBN No. 0-13-227271-7

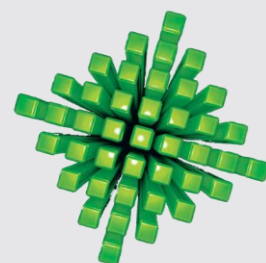
# Lappatura



(a) Schema del processo di lappatura.

(b) Lappatura di superfici piane.

(c) Lappatura di superfici cilindriche.



Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

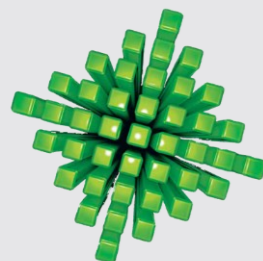
Kalpakjian • Schmid

© 2008, Pearson Education

ISBN No. 0-13-227271-7

# Lucidatura

- Può essere eseguita manualmente usando fogli, o su macchine che utilizzano dischi o nastri di cuoio, plastica o feltro rivestiti da polveri fini di abrasivo



Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

Kalpakjian • Schmid

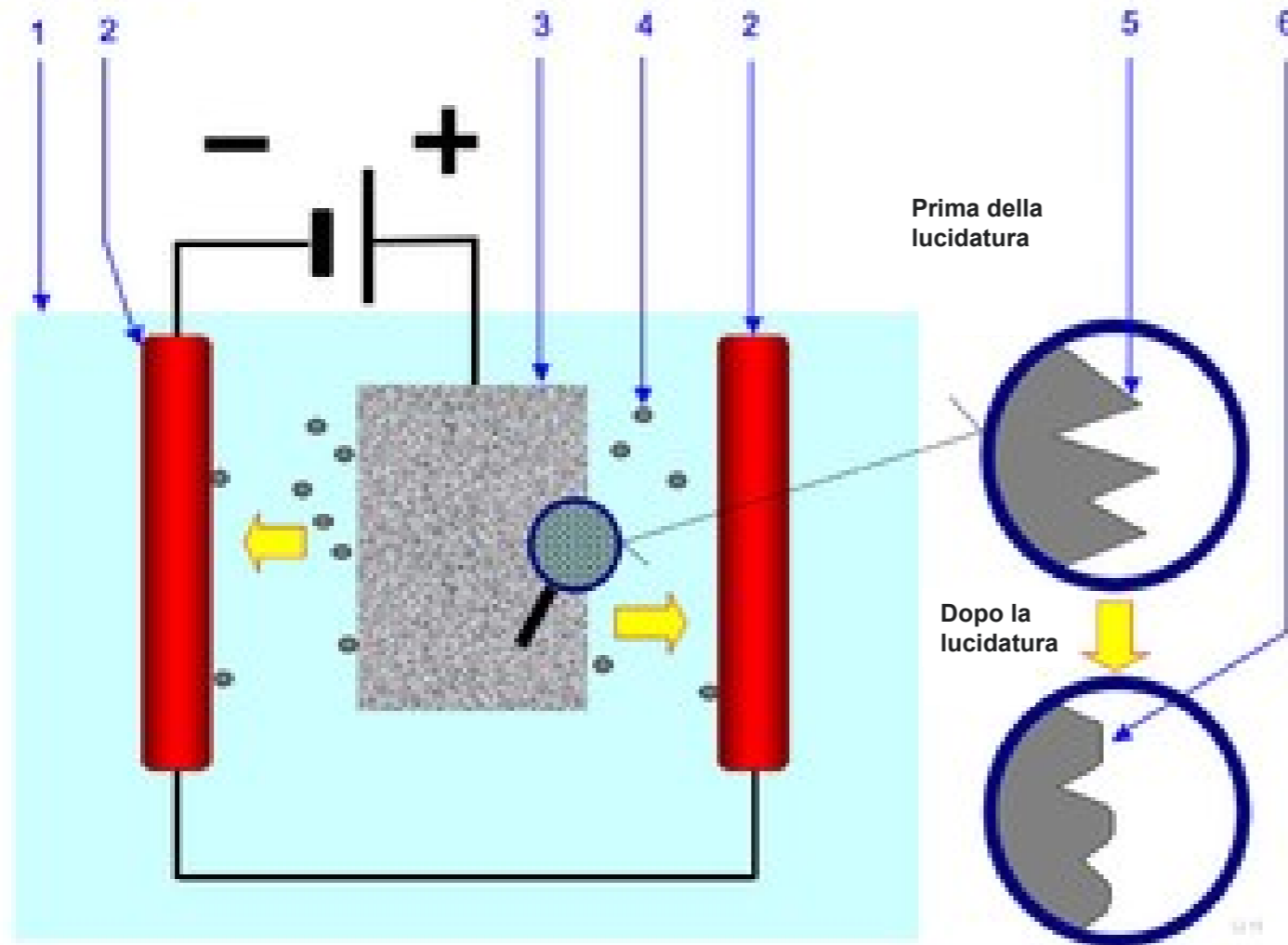
© 2008, Pearson Education

ISBN No. 0-13-227271-7

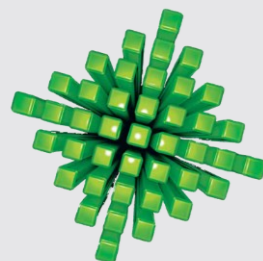
# Elettro lucidatura

1. Elettrolita
2. Catodo
3. Pezzo da lucidare (Anodo)
4. Particelle che si muovono dal pezzo al catodo
5. Superficie prima della lucidatura
6. Superficie dopo la lucidatura

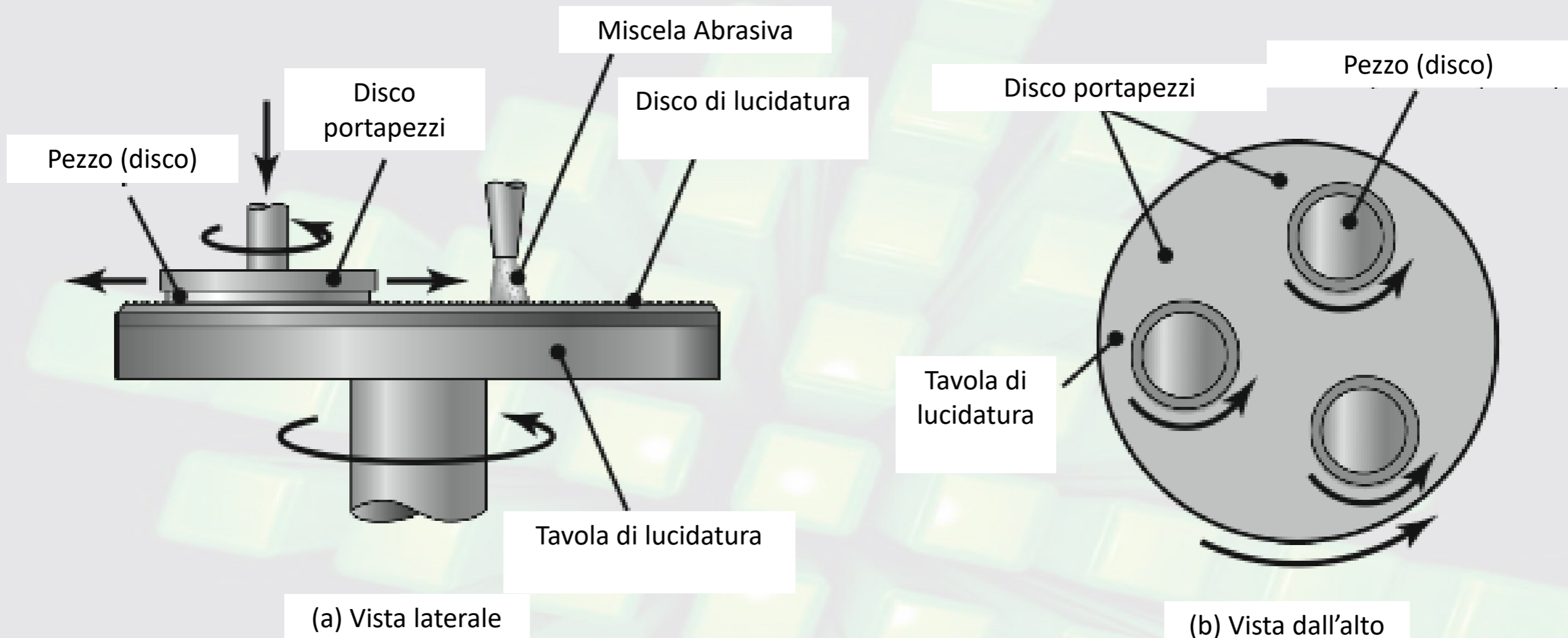
## Elettro lucidatura



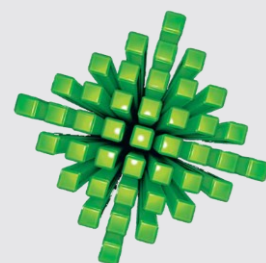
L'elettrolita attacca i rilievi rimuovendo materiale e rende la superficie più regolare.



# Lucidatura Chimico-Meccanica



Schema del processo di lucidatura chimico-meccanica, usato nella produzione di wafer al silicio e di circuiti integrati. Possono essere presenti più dischi portapezzo e più di un wafer.



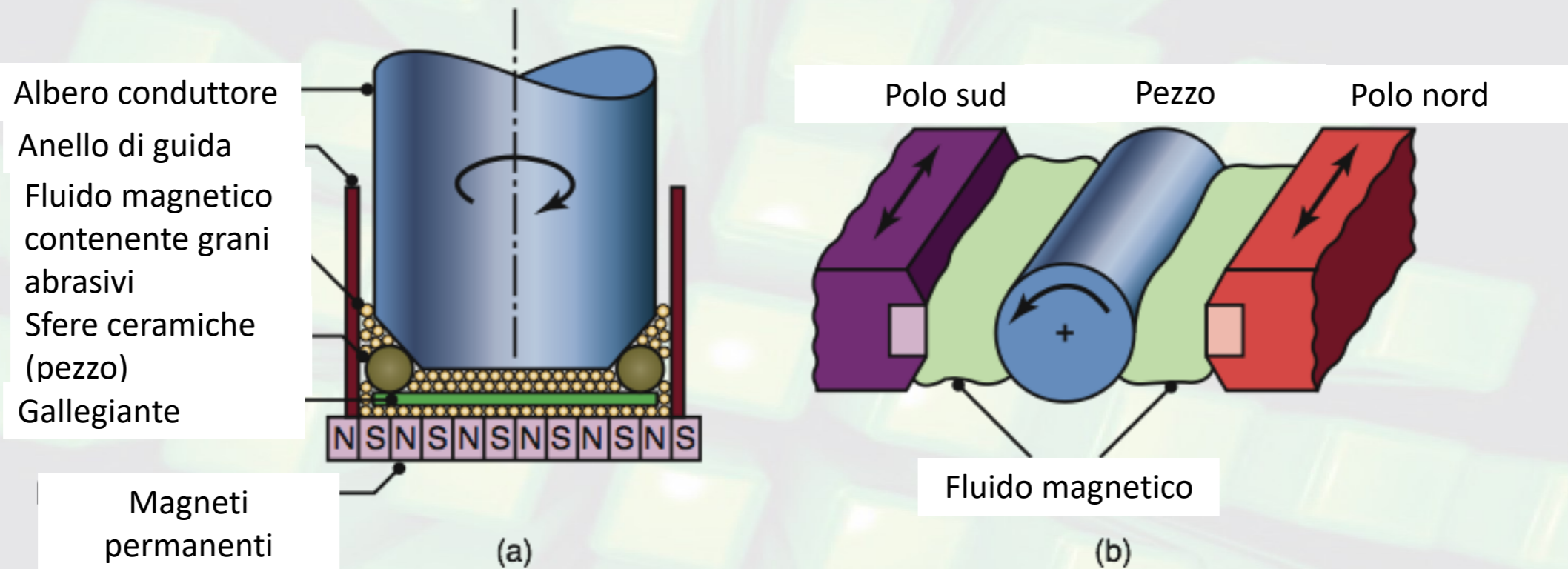
Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

Kalpakjian • Schmid

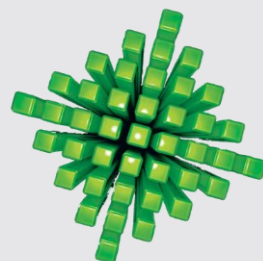
© 2008, Pearson Education

ISBN No. 0-13-227271-7

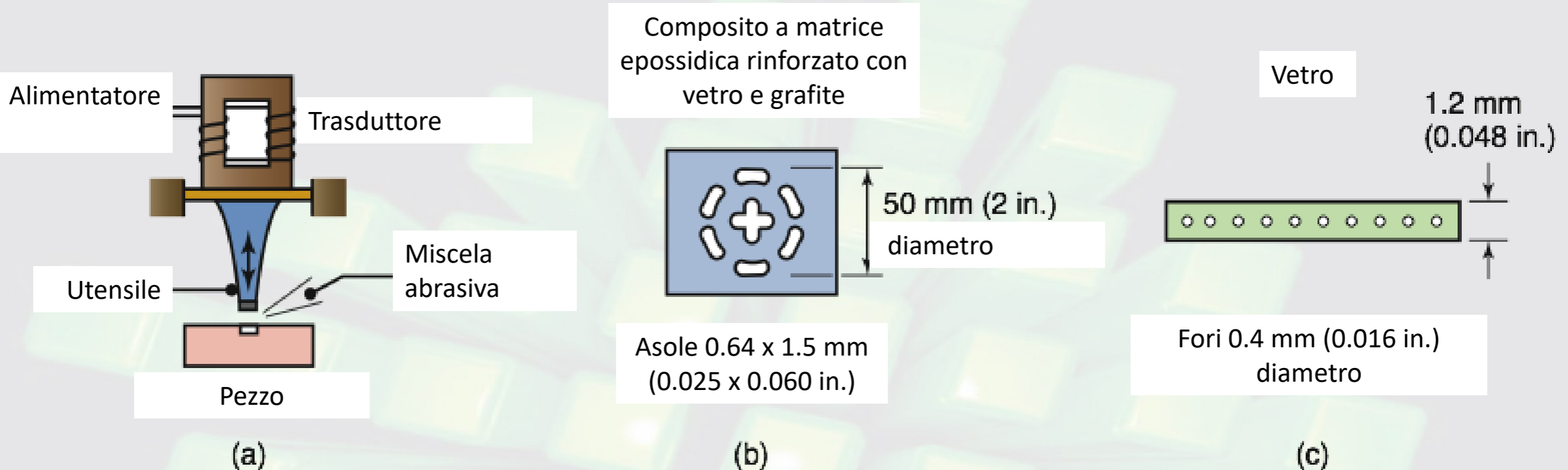
# Lucidatura con campi magnetici



Schema dell'uso di campi magnetici per lucidare sfere e rulli:  
(a) Lucidatura a sostentamento magnetico di sfere ceramiche e  
(b) Lucidatura assistita da campo magnetico.



# Lavorazioni con Ultrasuoni



- (a) Schema della lavorazione con ultrasuoni; il materiale viene asportato mediante micro scalfittura ed erosione operate dall'impatto di grani di abrasivo accelerati dall'utensile vibrante (ampiezza 0.05-0.125 mm, frequenza 20 kHz)
- (b) e (c) tipici esempi di cavità prodotte mediante lavorazioni con ultrasuoni. Notare le dimensioni e i materiali lavorati.

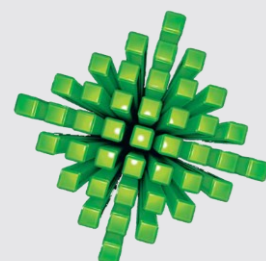
**Tempo di Contatto:**  $t_0 \cong \frac{5r}{c_0} \left( \frac{c_0}{v} \right)^{1/5}$

- $r$  è il raggio di una particella sferica di abrasivo
- $c_0$  è la velocità dell'onda elastica nel pezzo  $= \sqrt{E/\rho}$
- $v$  è la velocità con la quale la particella di abrasivo colpisce la superficie del pezzo

**Forza di Contatto media:**

$$F_{ave} = \frac{\Delta \text{quantità di moto}}{\text{Tempo di Contatto}} = \frac{2 \cdot m \cdot v}{t_0}$$

nell'ipotesi di rimbalzo perfettamente elastico cioè  $v_2 = -v_1$



Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

Kalpakjian • Schmid

© 2008, Pearson Education

ISBN No. 0-13-227271-7



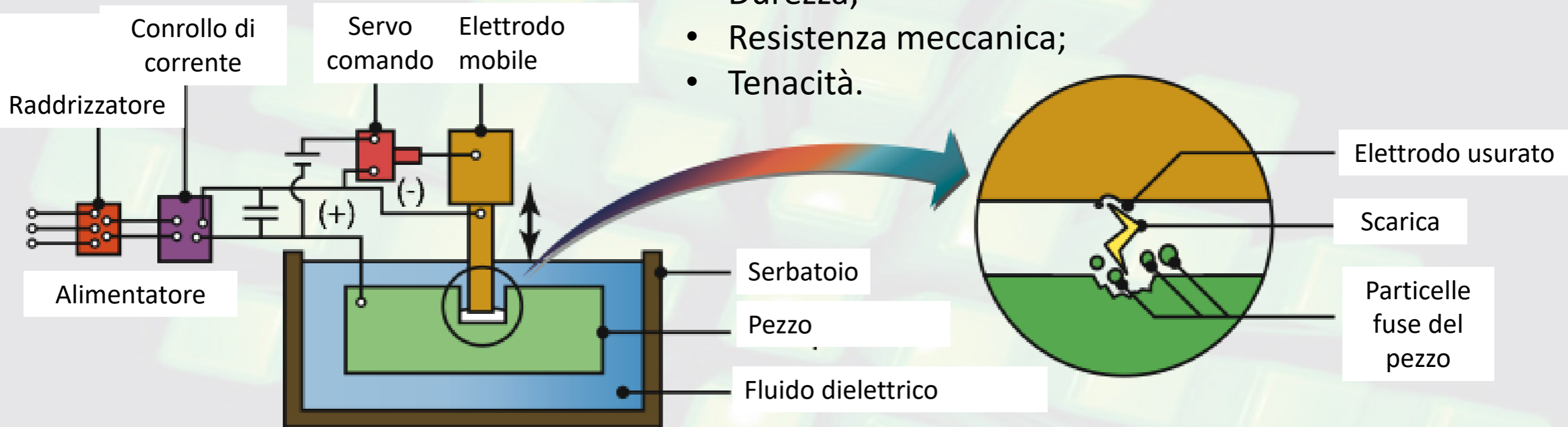
# Elettroerosione (EDM)

**Elettrodo:** grafite, rame, ottone;

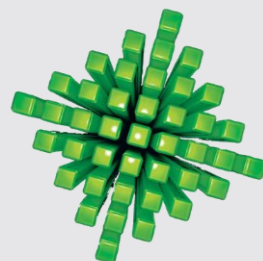
**Dielettrico:** oli minerali, acqua deionizzata.

Lavorazione **indipendente da**

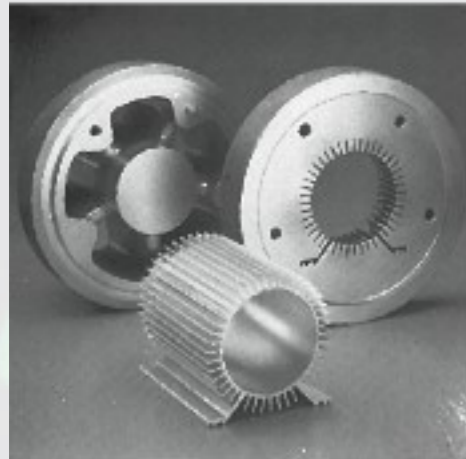
- Durezza;
- Resistenza meccanica;
- Tenacità.



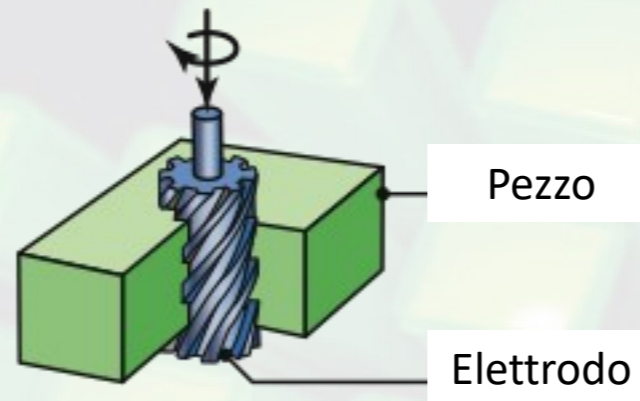
Schema del processo di elettroerosione.



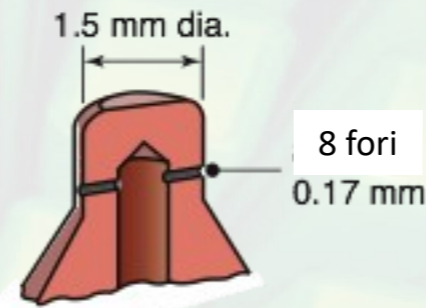
# Esempi di pezzi prodotti mediante elettroerosione (EDM)



(a)



(b)



(c)



- (a) Esempi di forme geometriche prodotte mediante elettroerosione usando elettrodi sagomati. Le due parti dietro sono le due parti dello stampo estrusore usato per produrre il pezzo davanti.
- (b) Cavità a spirale usando elettrodo sagomato rotante.
- (c) Fori nell'ugello di iniezione del combustibile realizzati mediante elettroerosione.

Cavità a gradini realizzate con elettrodo quadrato usando l'elettroerosione. In tale lavorazione il pezzo si muove nelle direzioni x ed y ed è sincronizzato con il movimento verticale (z) dell'elettrodo. Si vede anche un elettrodo cilindrico per produrre parti rotonde o ellittiche.

$$MRR = 4 \cdot 10^4 \cdot I \cdot T_w^{-1.23}$$

dove

$T_w$  è la temperatura di fusione del materiale in lavorazione ( $^{\circ}\text{C}$ );

$I$  è l'intensità di corrente alternata (A).

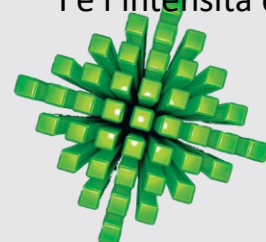
$$\text{velocità usura elettrodo} = 11 \cdot 10^3 \cdot I \cdot T_t^{-2.38}$$

dove

$T_t$  è la temperatura di fusione del materiale dell'elettrodo ( $^{\circ}\text{C}$ );

$I$  è l'intensità di corrente alternata (A).

$$\text{Rapporto d'usura} = R = \frac{\text{usura pezzo}}{\text{usura elettrodo}} = 2.25 \left( \frac{T_w}{T_t} \right)^{-2.3}$$



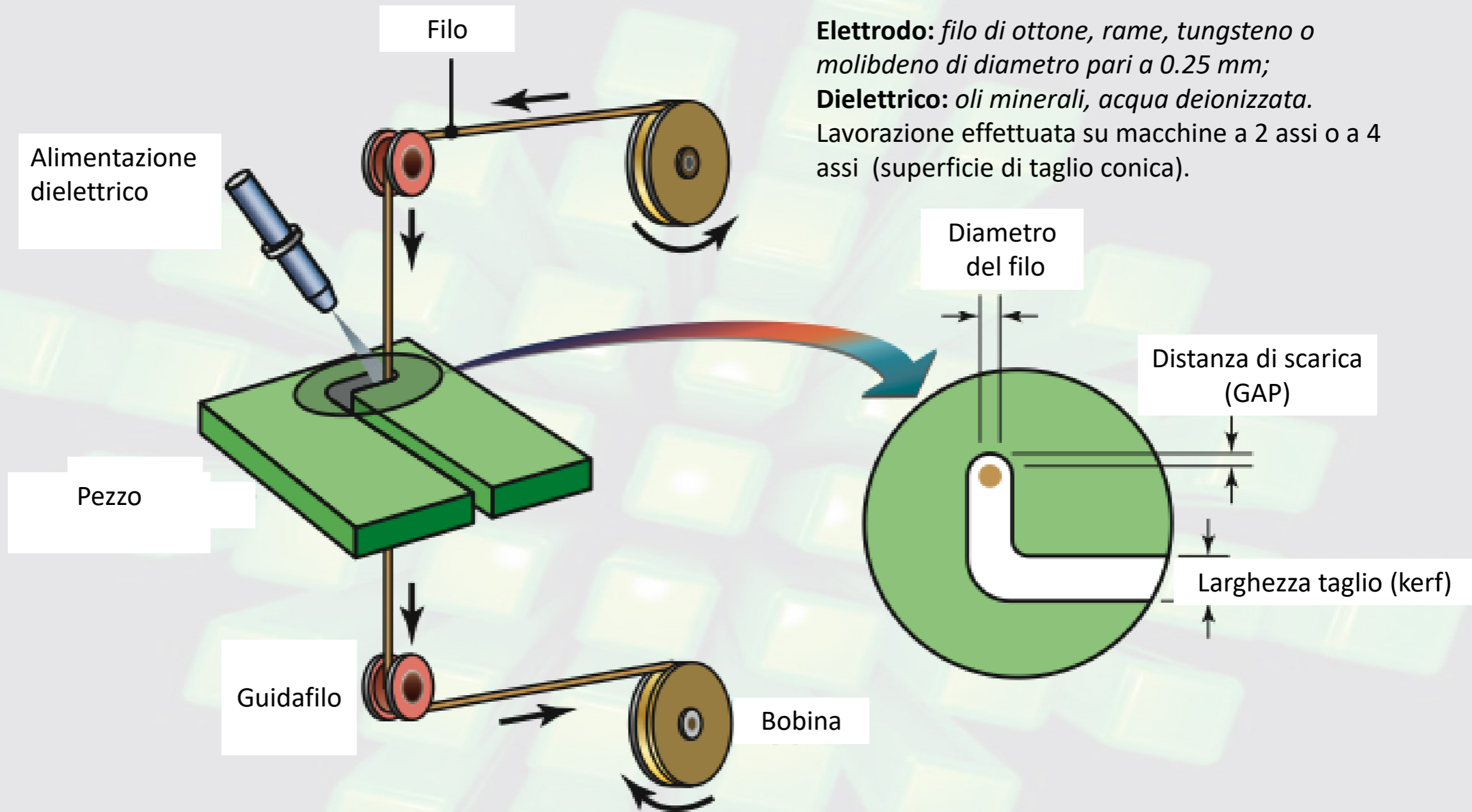
Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

Kalpakjian • Schmid

© 2008, Pearson Education

ISBN No. 0-13-227271-7

# Elettroerosione a Filo (Wire EDM)



Schema dell'elettroerosione a filo. Si può usare una bobina di filo fino a 50 ore prima che sia necessario sostituirla.

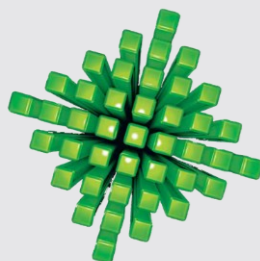
$$MRR = V_f \cdot h \cdot b$$

dove

$V_f$  è la velocità di avanzamento del filo nel pezzo (mm/min);

$h$  è lo spessore del pezzo da tagliare;

$b$  è la larghezza di taglio pari al diametro del filo più due volte il gap.



Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

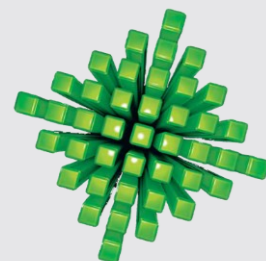
Kalpakjian • Schmid

© 2008, Pearson Education

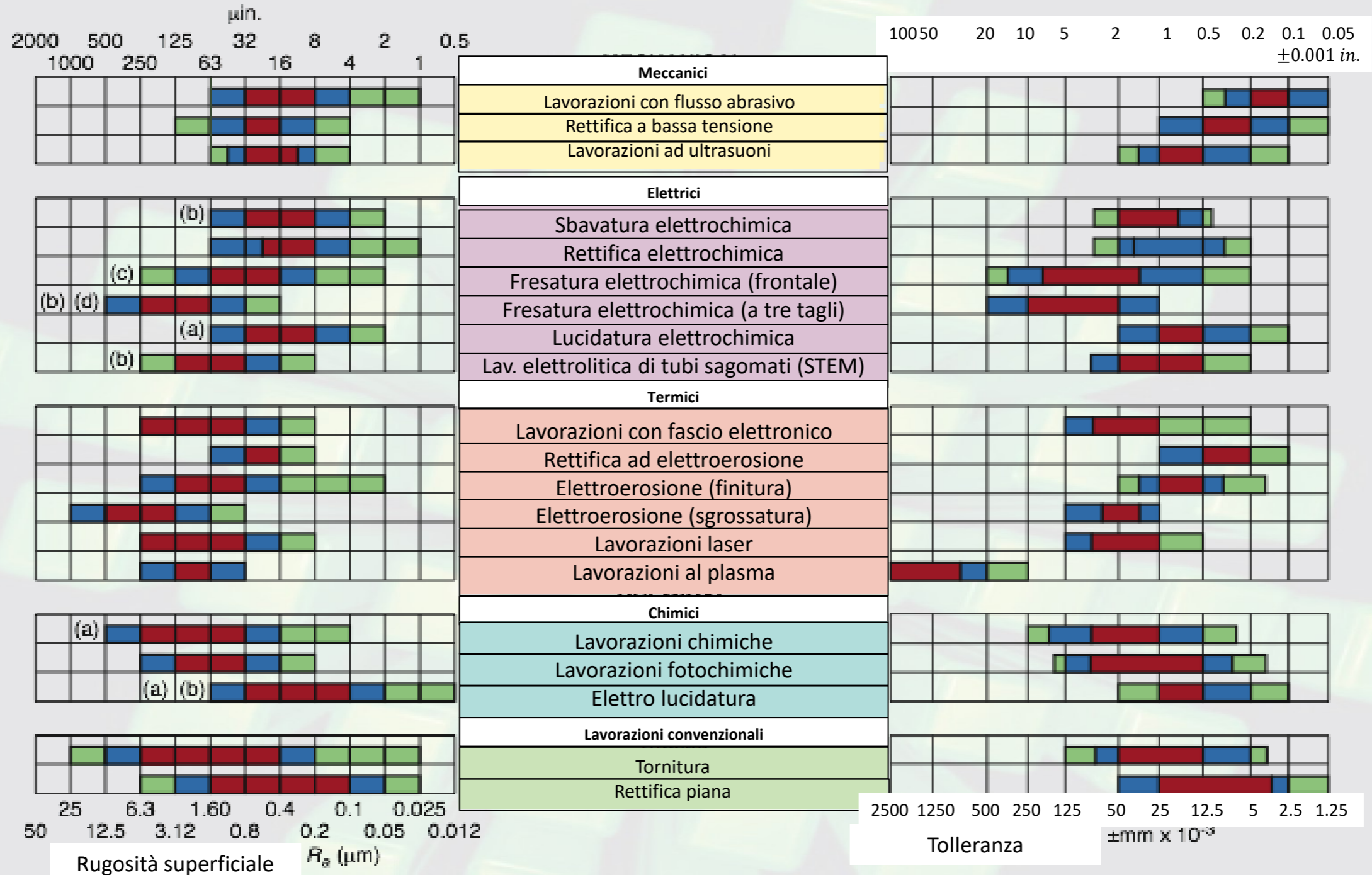
ISBN No. 0-13-227271-7

# Processi Non Convenzionali

Processo	Caratteristiche	Parametri di processo e velocità di asportazione o di taglio tipica
<b>Lavorazioni chimiche (CM)</b>	asportazione poco profonda (fino a 12 mm) su ampie superfici piane o curve; tranciatura di fogli sottili; attrezzature e macchine di costo limitato; volumi di produzione bassi.	0.025-0.1 mm/min
<b>Lavorazioni Elettro-Chimiche (ECM)</b>	forme complesse con cavità profonde; la più alta velocità di rimozione del materiale; attrezzature e macchine costose; elevato consumo energetico; volumi di produzione da medi ad elevati.	5-25 V c.c. ; 1.5-8 A/mm <sup>2</sup> 2.5-12 mm/min a seconda della densità di corrente
<b>Rettifica Elettro-Chimica (ECG)</b>	Taglio ed affilatura di materiali duri, come utensili al carburo di tungsteno; usato anche come processo di levigatura; velocità di rimozione del materiale maggiore rispetto alla rettifica tradizionale	1-3 A/mm <sup>2</sup> ; tipicamente 1500 mm <sup>3</sup> /min a 1000 A
<b>Elettroerosione a tuffo (EDM)</b>	lavorazione e taglio di pezzi complessi fatti con materiali duri; può provocare danni superficiali; usata anche per rettificare e tagliare; versatile; attrezzature e macchine costose.	50-380 V; 0.1-500 A; tipicamente 300 mm/min
<b>Elettroerosione a filo (Wire EDM)</b>	taglio a contornatura di curve e superfici; apparecchiatura costosa.	dipende da materiale e spessore
<b>Lavorazione laser (LBM)</b>	taglio e foratura su materiali sottili; fori e asole molto piccoli; genera una zona termicamente alterata ; apparecchiatura costosa; elevato consumo energetico; estrema cautela nel suo utilizzo.	0.50-7.5 m/min
<b>Lavorazioni a fascio elettronico (EBM)</b>	taglio e foratura su materiali sottili; fori e asole molto piccoli; genera una zona termicamente alterata ; apparecchiatura costosa; richiede il vuoto.	1-2 mm <sup>3</sup> /min
<b>Lavorazioni a getto di acqua (WJM)</b>	taglio di tutti i tipi di materiali non metallici fino a 25 mm di spessore e anche oltre; adatto per eseguire contornature su materiali flessibili; non crea zone termicamente alterate; processo sicuro per l'ambiente.	dipende molto dal materiale
<b>Lavorazioni a getto di acqua abrasivo (AWJM)</b>	taglio di uno o più strati di materiali metallici e non.	fino a 7.5 m/min
<b>Lavorazioni a getto abrasivo (AJM)</b>	taglio, creazione di scanalature, sbavatura, eliminazione della bava, incisione e pulizia di materiali metallici e non metallici; tende ad arrotondare gli spigoli vivi; può causare problemi alla salute delle persone a causa de polveri sottili sospese in aria.	dipende molto dal materiale

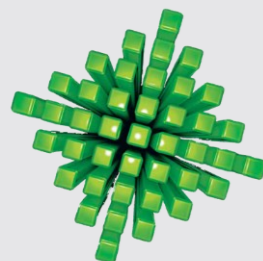


# Rugosità e Tolleranze dei vari processi

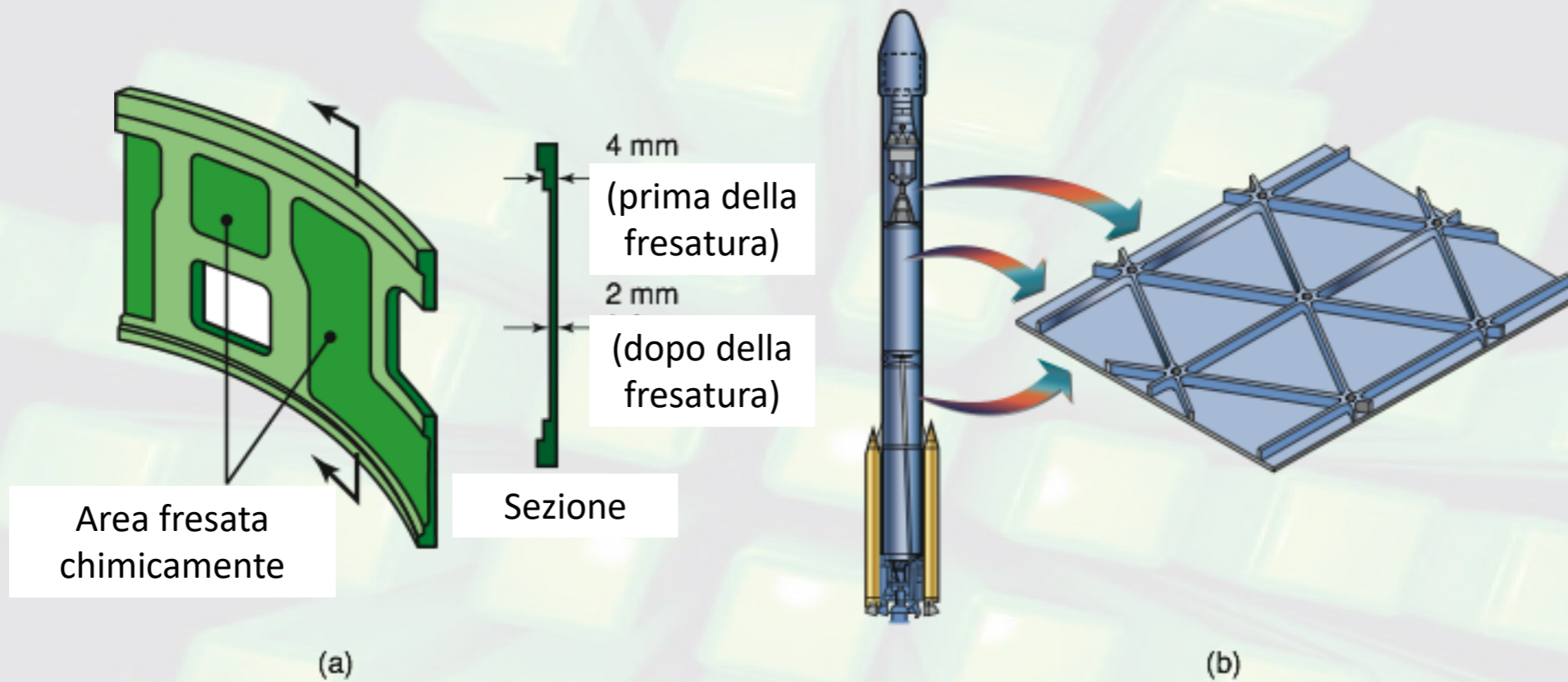


- a) Dipende dallo stato iniziale della superficie.
- b) Le leghe di titanio sono più rugose di quelle di nichel.
- c) Zone a maggior densità di corrente.
- d) Zone a minor densità di corrente.

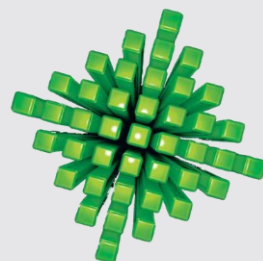
	<b>Situazione tipica (valori di solito attesi)</b>
	<b>Situazione meno frequente (condizioni particolari o di precisione)</b>
	<b>Situazione rara (condizioni operative speciali)</b>



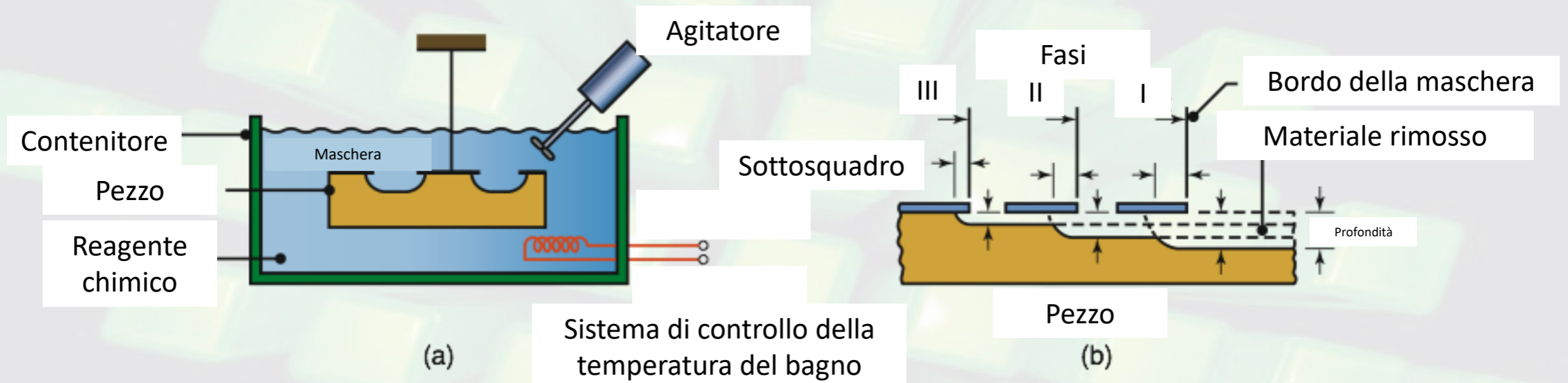
# Fresatura chimica



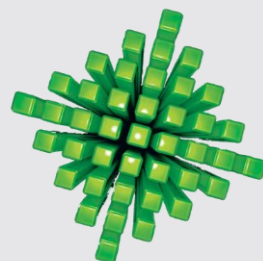
- (a) Pannello esterno di un missile fresato chimicamente per aumentare il rapporto tra rigidità e peso del pezzo stesso.
- (b) Riduzione del peso di missile spaziale mediante fresatura chimica su pannelli di leghe di alluminio precedentemente formati mediante rullatura o stiratura.



# Fresatura Chimica



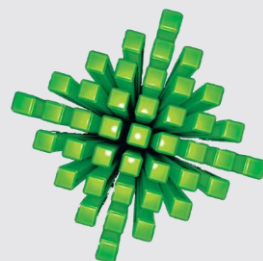
- (a) Schema del processo di fresatura chimica. In questo processo non agiscono forze.
- (b) Fasi della produzione di una cavità profilata ottenuta mediante fresatura chimica. **I reagenti chimici attaccano le zone non mascherate protette con uno strato protettivo**



# Tranciatura Chimica

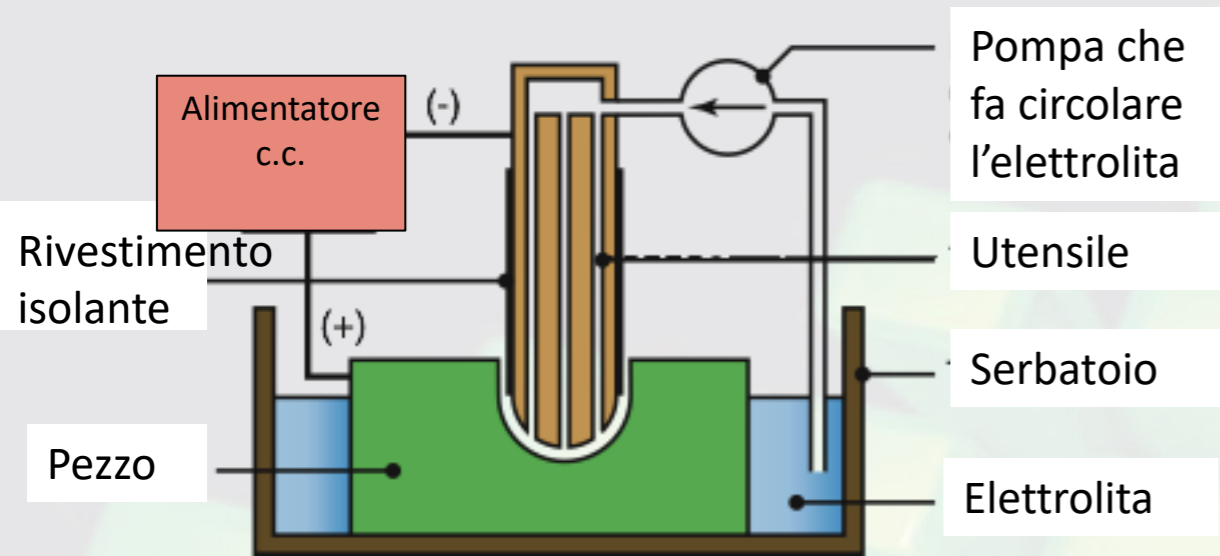


Tipici pezzi prodotti mediante tranciatura chimica.





# Lavorazioni Electrochimiche



Schema del processo di lavorazione elettrochimico. Tale processo è il contrario della elettro deposizione. Notare che l'utensile è posto a una ben definita distanza dal pezzo (=GAP).

**Materiale utensile:** bronzo, ottone, rame, acciaio inox.

**Elettrolita:** sale inorganico conduttore.

**Corrente:** continua.

$$MRR = C \cdot I \cdot \eta$$

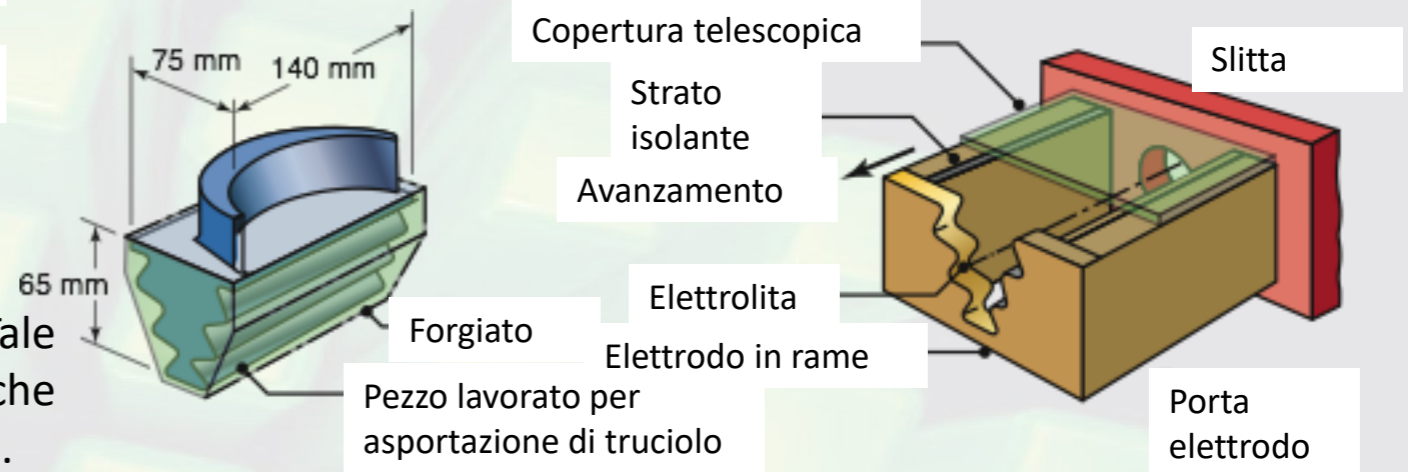
Dove

- C è una costante del **materiale** da lavorare che deve essere **conduttore** (non dipende da durezza, resistenza meccanica e tenacità);
- I è l'intensità di corrente continua (A);
- $\eta$  è il rendimento (90-100%).

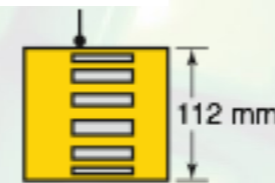
Gli ioni metallici si staccano dal pezzo e il flusso di elettrolita li porta via prima che si depositino sull'utensile (catodo)

**Vantaggi:**

- Non si ha danneggiamento termico del pezzo;
- Non si ha usura dell'utensile.



14 fori



(b)

(c)

Parti prodotte mediante lavorazioni elettrochimiche.

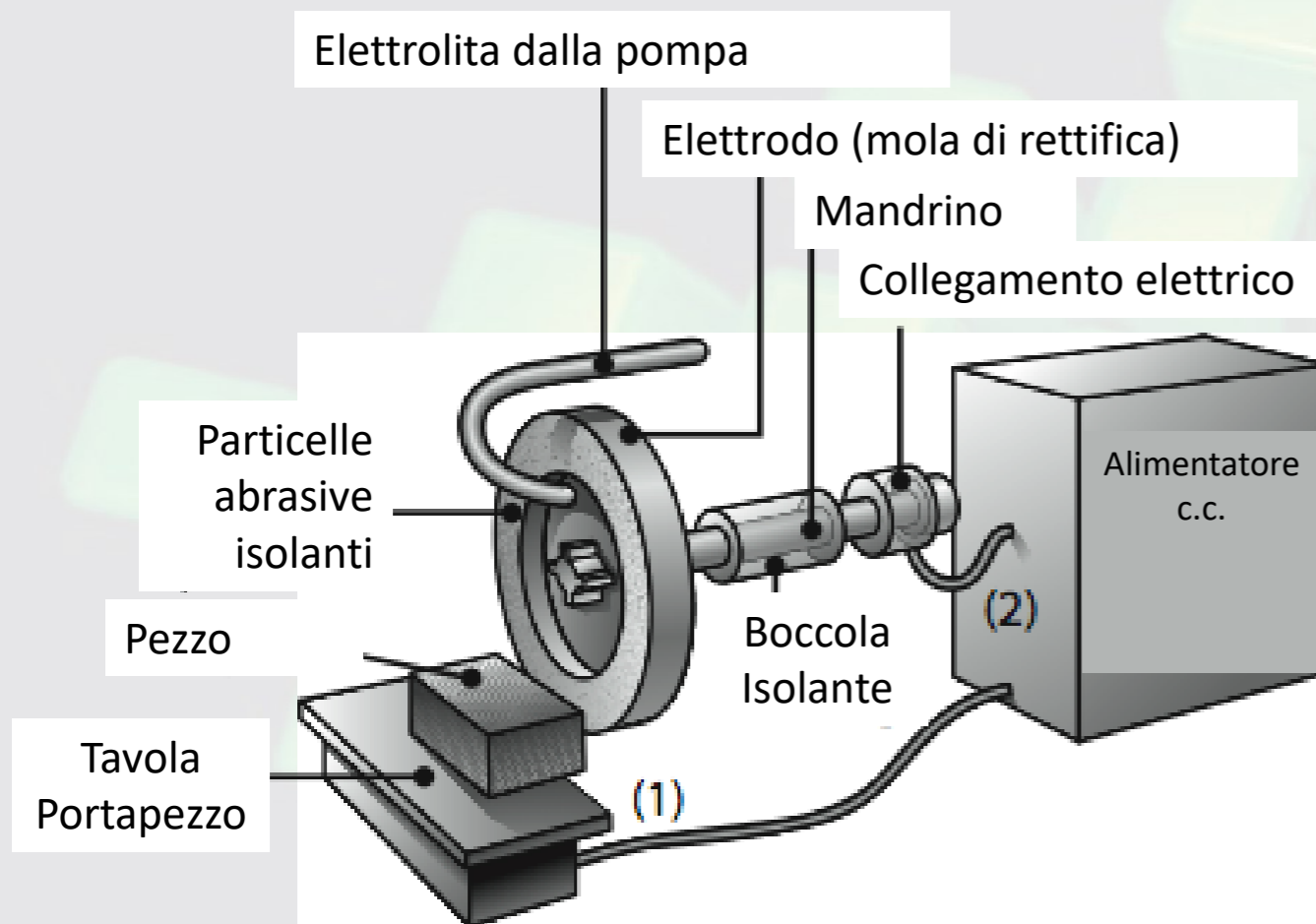
(a) Pala di turbina fatta di lega di nickel con durezza 360 HB. Il pezzo a destra è l'elettrodo sagomato.

(b) Asole sottili su una gabbia di cuscinetto a rulli di acciaio 4340.

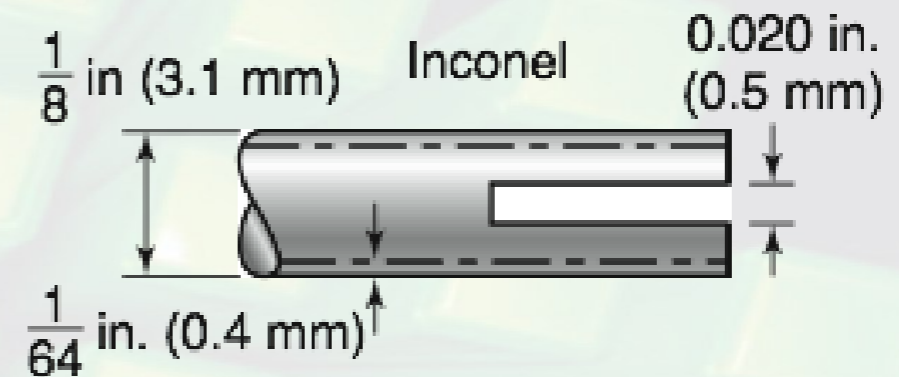
(c) Girante di compressore con palettatura integrate.



# Rettificata Elettrochimica



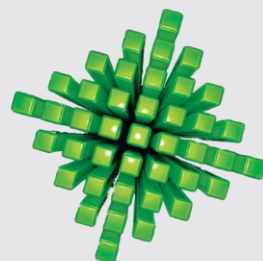
(a)



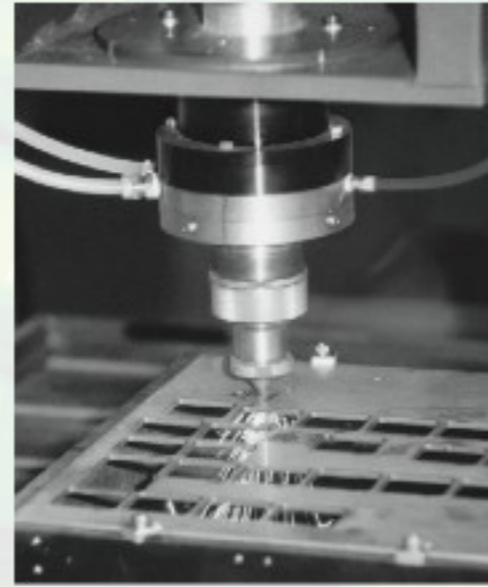
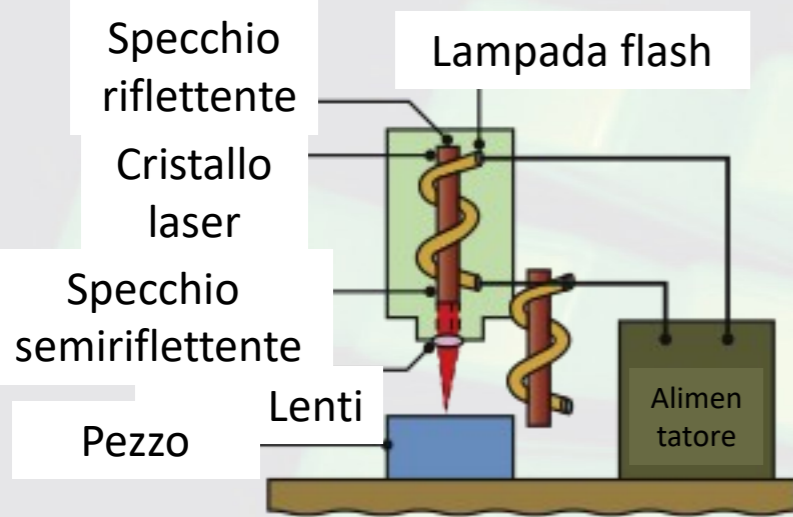
(b)

(a) Schema del processo di rettifica elettrochimica.

(b) Scanalatura sottile prodotta su un tubo di lega di nickel (Inconel).



# Lavorazioni Laser



(a) Schema della lavorazione laser.

(b) Taglio di una lamiera metallica mediante il laser.

## Continui o pulsanti;

### Influenzati da:

- Riflettività;
- Conducibilità termica.

### Vantaggi:

- Possibilità di guidare il raggio con fibre ottiche;
- Non richiede il vuoto.

### Svantaggi:

- Superficie lavorata grezza;
- Zone termicamente alterate;
- Pericolosi per la retina umana.

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

Kalpakjian • Schmid

© 2008, Pearson Education

ISBN No. 0-13-227271-7

## (b) Applicazione Taglio

Metalli  
Plastiche  
Ceramici

## Foratura

Metalli  
Plastiche

## Marcatura

Metalli  
Plastiche  
Ceramici

## Trattamenti superficiali su metalli Saldatura di metalli

## Tipo di laser

PCO<sub>2</sub>; CWCO<sub>2</sub>; Nd-YAG; rubino  
CWCO<sub>2</sub>  
PCO<sub>2</sub>

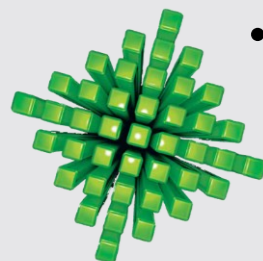
PCO<sub>2</sub>; Nd-YAG; Nd-vetro; rubino  
eccimeri

PCO<sub>2</sub>; Nd-YAG  
eccimeri  
eccimeri

CWCO<sub>2</sub>

PCO<sub>2</sub>; CWCO<sub>2</sub>; Nd-YAG; Nd-vetro; rubino

P= ad impulso; CW= ad onda continua



# Lavorazioni con Fascio di Elettroni

Elettroni accelerati a velocità vicine a quella della luce (0-80%) nel vuoto

## Vantaggi

- Migliore qualità superficiale rispetto al laser;
- Minori dimensioni del fascio rispetto al laser;

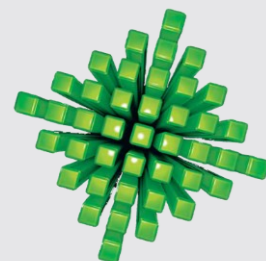
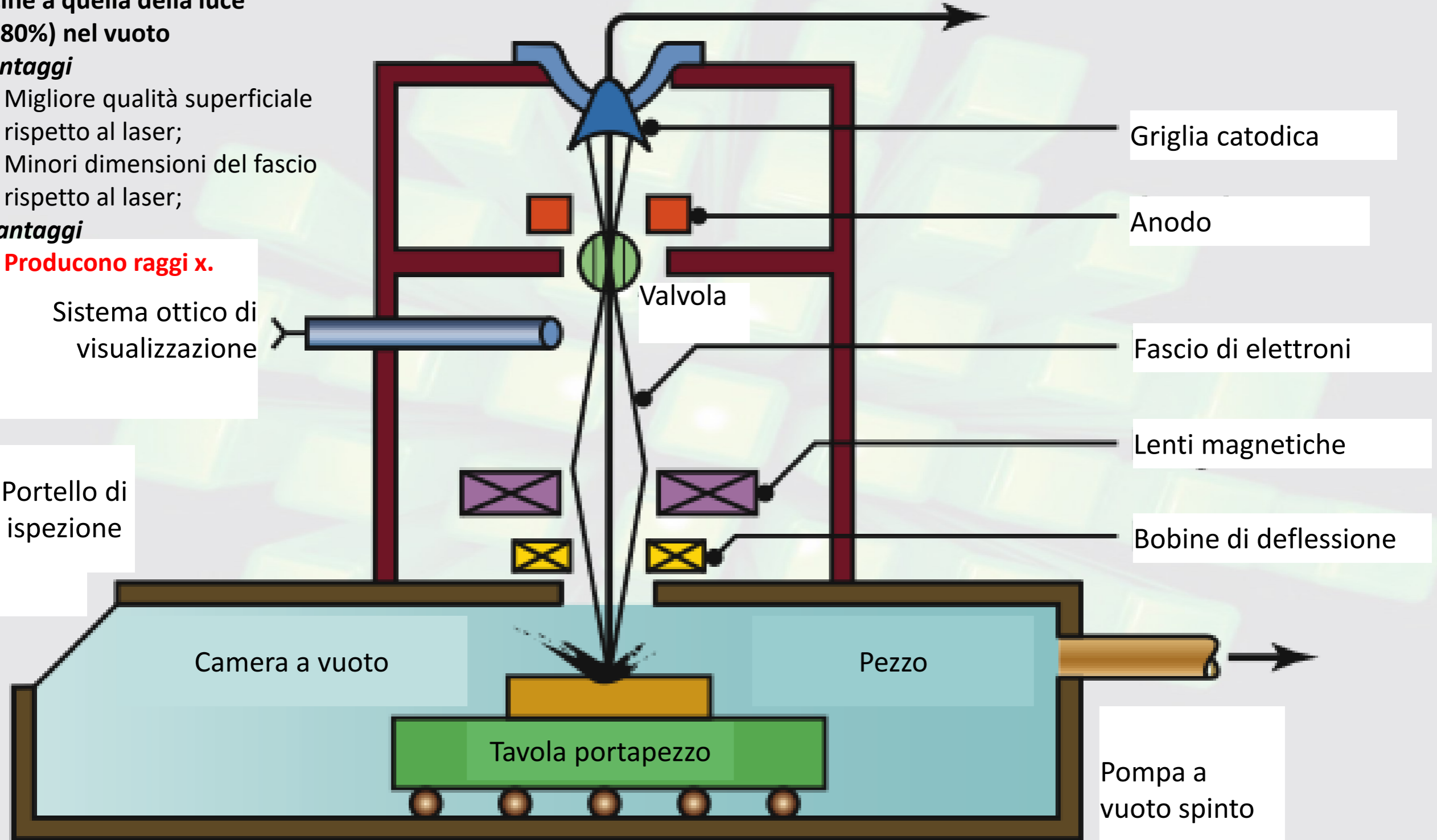
## Svantaggi

- **Producono raggi x.**

Sistema ottico di visualizzazione

Portello di ispezione

Cavo ad alta tensione (30 kV c.c.)



Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

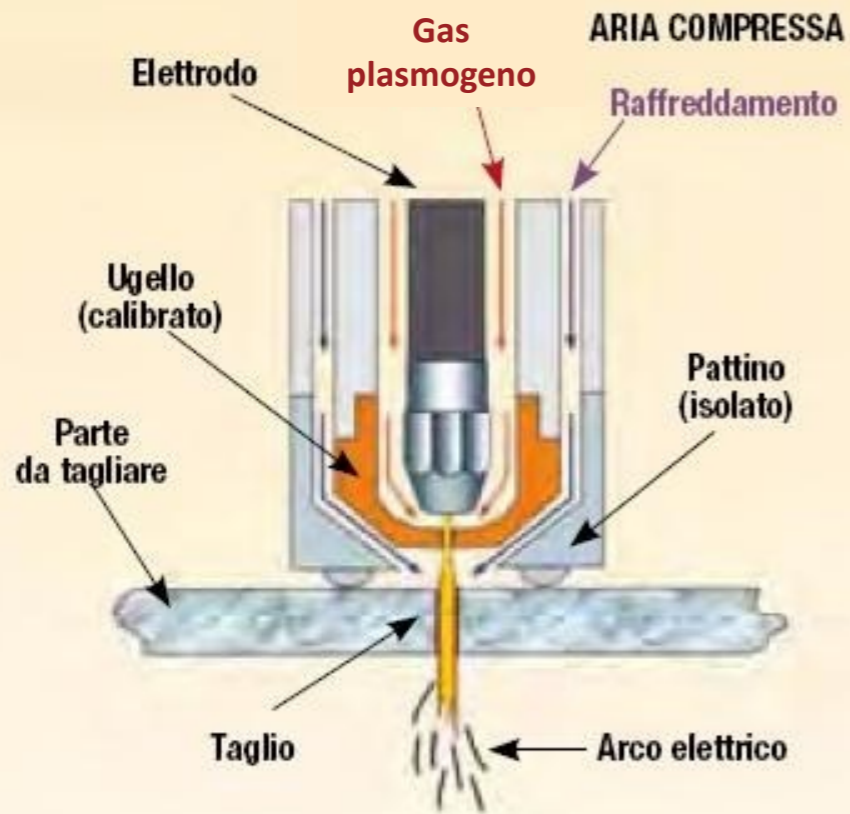
Kalpakjian • Schmid

© 2008, Pearson Education

ISBN No. 0-13-227271-7

# Taglio al Plasma

## PROCEDIMENTO DI TAGLIO PLASMA

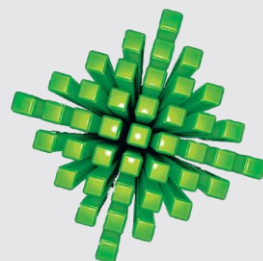


Plasma = gas ionizzato ad altissima temperatura (9600°C)

### Vantaggi

- Migliore qualità superficiale;
- Dimensioni del fascio inferiori rispetto al laser e al fascio di elettroni;
- MRR migliore rispetto al laser, elettroerosione e fascio elettronico.

## SCHEMA DI UNA POSTAZIONE MANUALE PER IL TAGLIO PLASMA



Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

Kalpakjian • Schmid

© 2008, Pearson Education

ISBN No. 0-13-227271-7

# Lavorazioni a Getto di Acqua

Getto d'acqua con pressioni fino a 400 Mpa

Diametro ugello 0.05-1 mm

Taglio fino a spessori di 25 mm su:

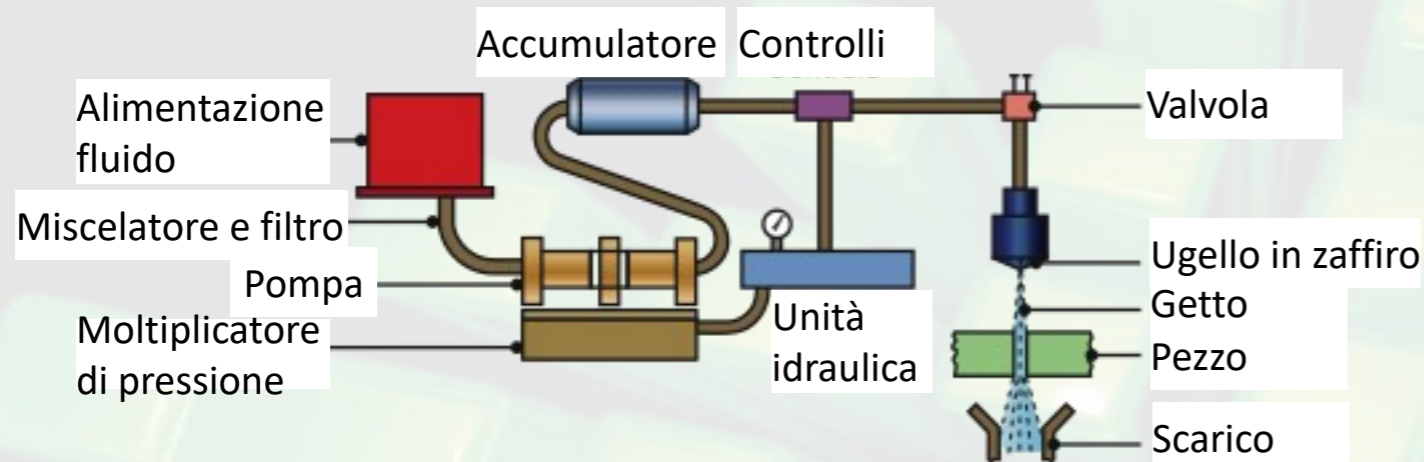
- Plastiche;
- Gomma;
- Tessuti;
- Legno;
- Carta;
- Cuoio;
- Materiali isolanti;
- Mattoni;
- Compositi;
- Alimentari.

## Vantaggi

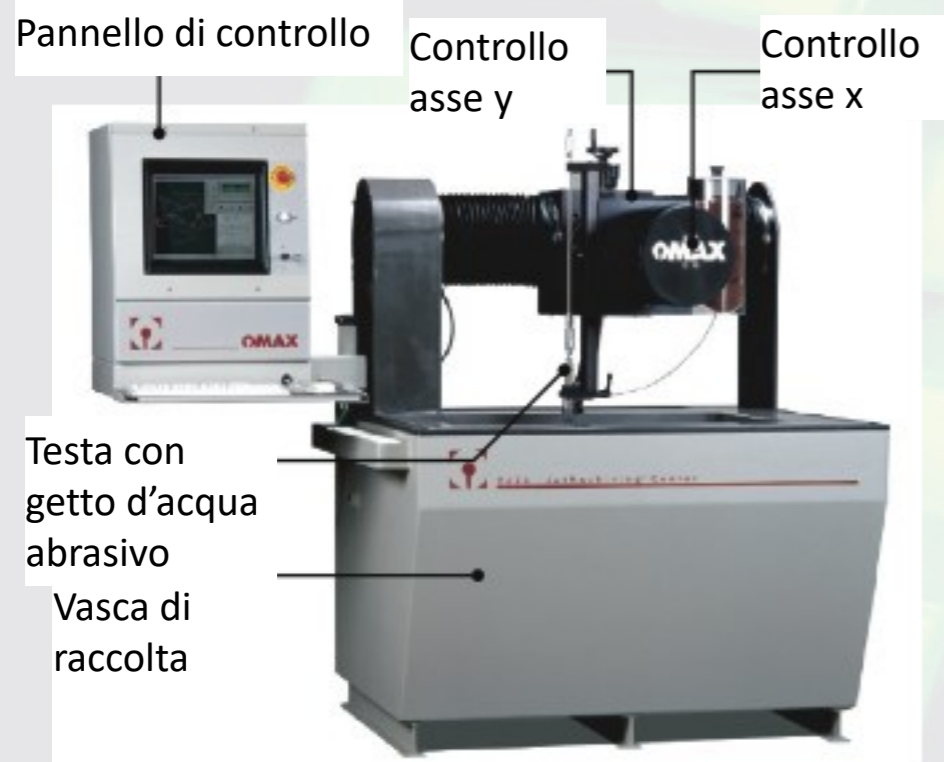
- Non necessita di fori iniziali per avviare il taglio;
- Non è inquinante;

## Svantaggi

- Pericoloso per le mani;
- All'aumento dello spessore il getto si apre e perde energia.



(a)



(b)

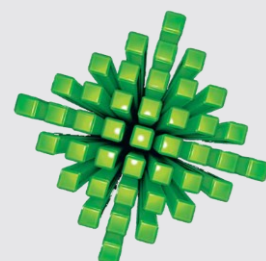


(c)

(a) Schema del processo a getto d'acqua.

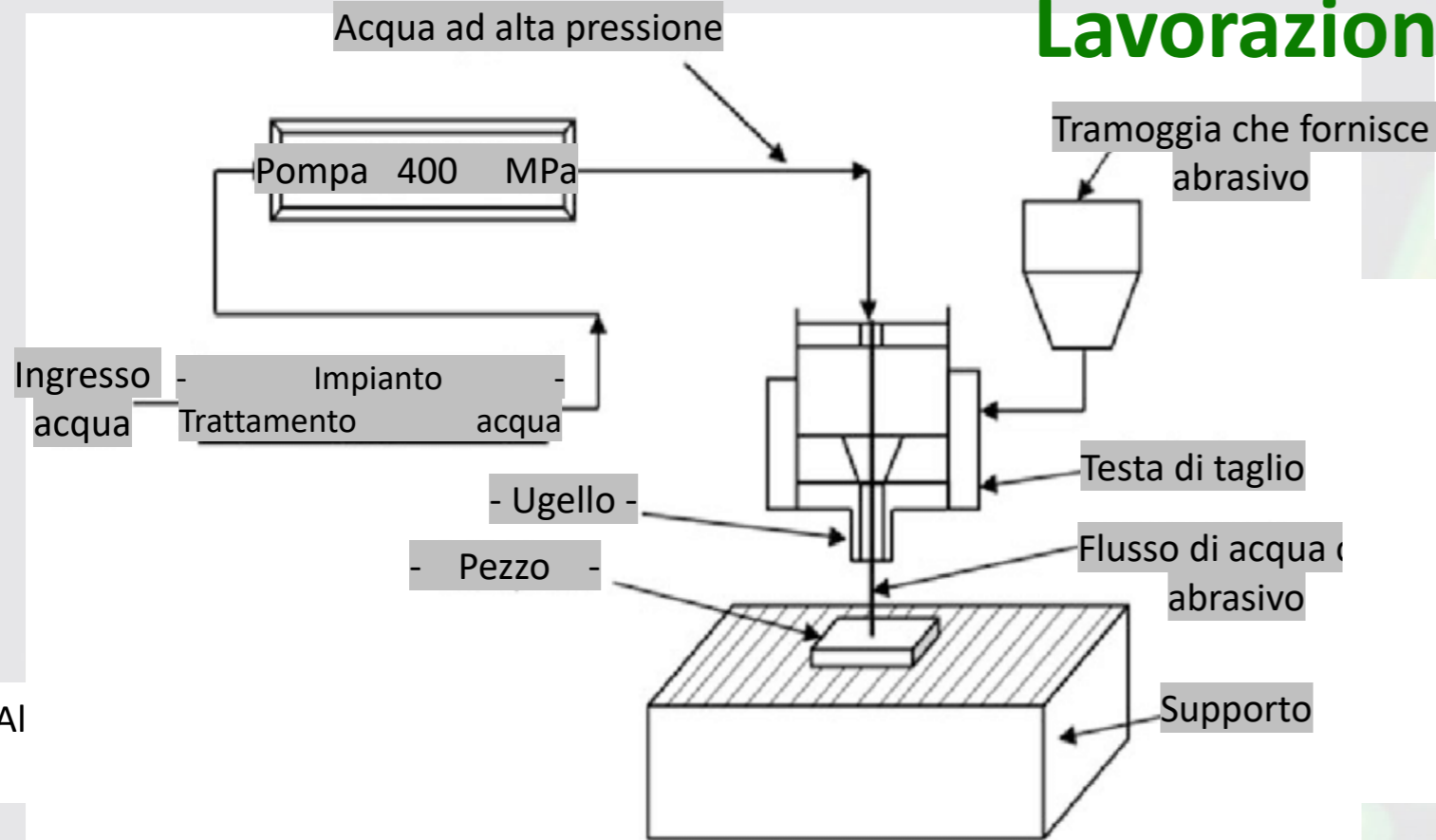
(b) Una macchina a controllo numerico per il taglio a getto d'acqua.

(c) Esempi di diverse parti non metalliche ottenute con macchine a taglio a getto d'acqua.



# Lavorazioni a Getto Abrasivo

Esempi di parti prodotte mediante lavorazioni a getto abrasivo; lo spessore delle parti è di 50 mm e sono di acciaio inossidabile 304.



(b)

## Lavorazioni a Getto d'Acqua Abrasivo

Particelle di  $\text{SiC}$  o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  di granulometria controllata vengono immesse e trascinate da un getto d'acqua in pressione che attraverso un ugello le focalizza sull'oggetto da tagliare.

### Taglio di

- **Metalli;**
- **Non metalli;**
- **Compositi avanzati.**

### Vantaggi

- Taglio di materiali più resistenti e di spessori maggiori;

### Svantaggi

- Usura dell'ugello che richiede materiali resistenti all'usura (rubino, zaffiro o compositi a base di carburi).

## Lavorazioni a Getto Abrasivo

Particelle di  $\text{SiC}$  o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  di granulometria controllata vengono immesse e trascinate da un getto di aria secca,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  in pressione che attraverso un ugello le focalizza sull'oggetto da tagliare.

### Taglio di

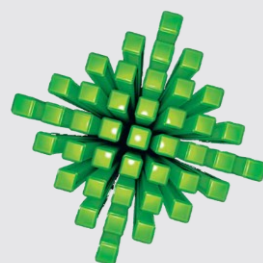
- **Metalli;**
- **Non metalli;**
- **Compositi avanzati.**

### Vantaggi

- Taglio di materiali più resistenti e di spessori maggiori rispetto al getto d'acqua;

### Svantaggi

- Pericolo dovuto alla presenza delle polveri nell'aria e quindi nell'ambiente circostante



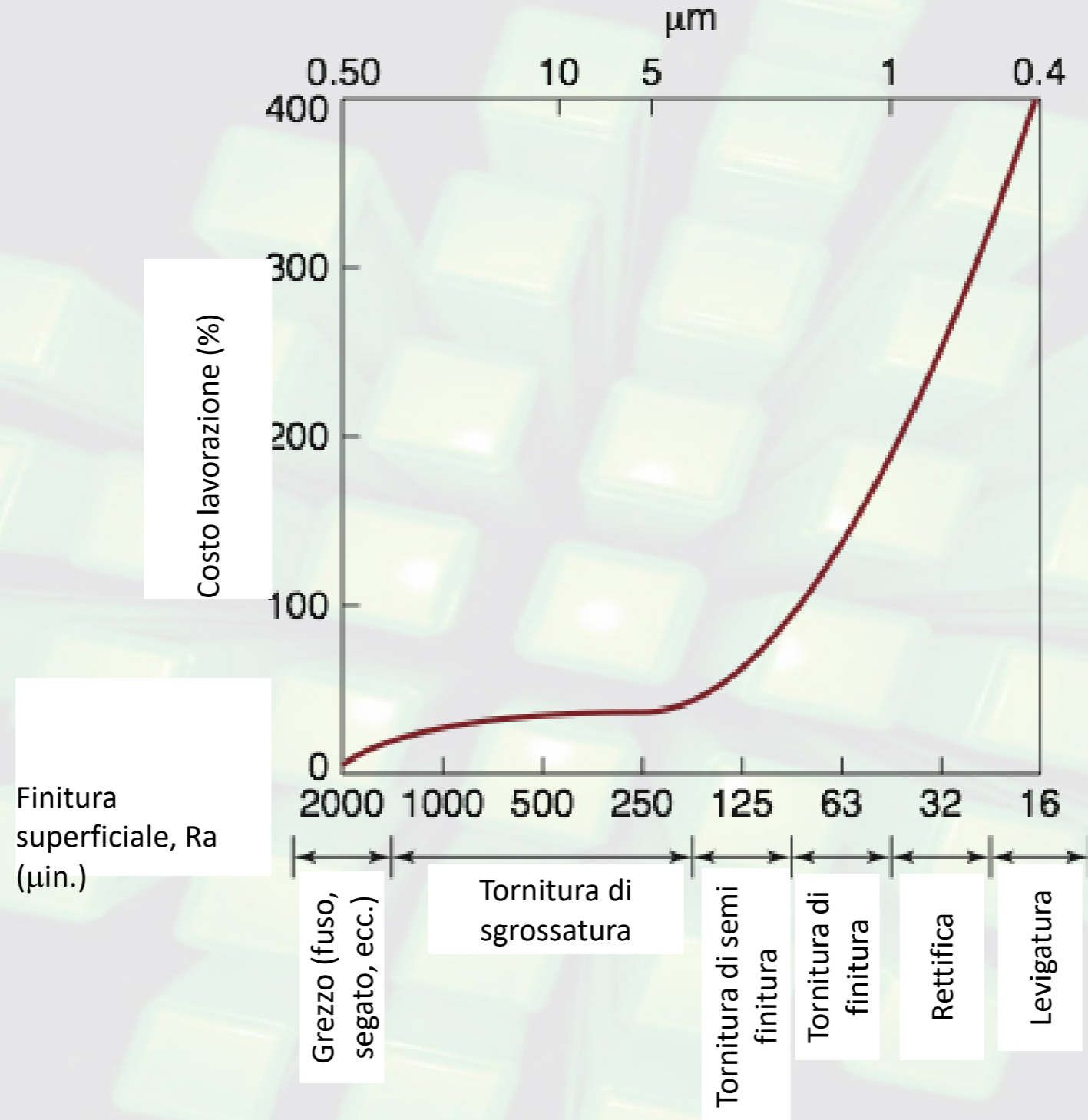
Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

Kalpakjian • Schmid

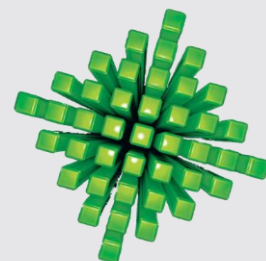
© 2008, Pearson Education

ISBN No. 0-13-227271-7

# Aspetti economici



Aumento dei costi per lavorazione per asportazione di truciolo e di finitura in funzione del grado di finitura richiesto. Notare il rapido aumento associato alle operazioni di finitura.



Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

Kalpakjian • Schmid

© 2008, Pearson Education

ISBN No. 0-13-227271-7