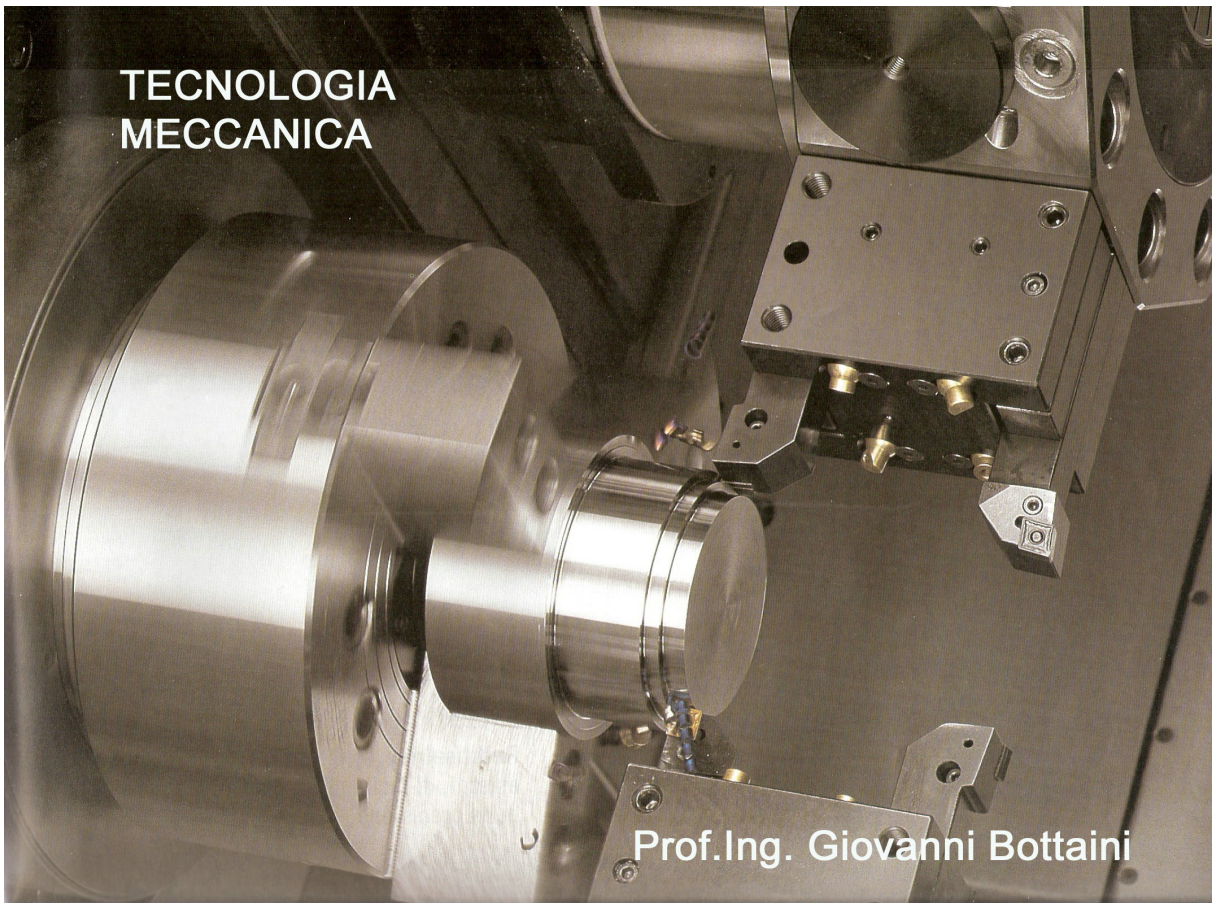


PARTE II

Il presente testo di tecnologia meccanica è destinato agli studenti del IV anno dell'indirizzo Meccanico dell'istituto professionale e fornisce la preparazione di base per affrontare lo studio della tecnica della produzione del V anno

I N D I C E

MODULO 14 – Lavorazioni al trapano

14.1 Generalità sulle tipologie di macchine
14.2 Accessori per usi particolari
14.3 Utensili
14.4 Parametri di foratura
14.5 Calcolo potenza di taglio e di penetrazione
14.6 Tempo di lavorazione

MODULO 15 - Lavorazioni alla fresatrice

15.1 Moti di lavoro e alimentazione
15.2 Generalità sulla macchina
15.3 L'apparecchio divisore
15.4 L'utensile fresa
15.5 Condizioni di taglio nella fresatura
15.6 Potenza di fresatura
15.7 Tempo di lavoro nella fresatura

MODULO 16 – La macchina alesatrice

16.1 Generalità sulla macchina alesatrice

MODULO 17 - La macchina stozzatrice

17.1 Generalità sulla stozzatrice

MODULO 18 - La macchina brocciatrice

18.1 La macchina e le lavorazioni
18.2 L'utensile broccia
18.3 Parametri di taglio e tempo di lavorazione

MODULO 19 – Le dentatrici

19.1 Generalità sul taglio delle ruote dentate
19.2 Richiami sulle ruote dentate cilindriche
19.3 Dentatrice Fellows
19.4 Dentatrice Maag
19.5 Dentatrice a creatore Pfauter
19.6 Tempi di macchina
19.7 Finitura delle ruote dentate

19.7.1 Sbarbatura
19.7.2 Rodaggio
19.7.3 Rettifica

MODULO 20 – La Rettificatrice

20.1 La Rettifica
20.2 Elementi caratteristici delle mole
20.2.1 Abrasivo
20.2.2 Grana
20.2.3 Durezza
20.2.4 Struttura
20.2.5 Agglomerante
20.3 Generalità sulle macchine
20.4 Parametri tecnologici di lavorazione
20.5 Tempi di lavorazione

MODULO 21 - Lavorazioni non convenzionali

21.1 Generalità
21.2 Taglio ad acqua
21.2.1 Waterjet
21.2.2 Taglio ad acqua pura
21.2.3 Caratteristiche del taglio
21.3 Lavorazioni con il laser
21.3.1 Applicazioni industriali
21.4 Lavorazioni con il plasma
21.5 Lavorazioni con elettroerosione
21.6 Lavorazioni con ultrasuoni

MODULO 22 - Metallurgia delle polveri

22.1 Generalità
22.2 Le polveri
22.3 Compattazione
22.4 Sinterizzazione

MODULO 14 - Lavorazione al trapano

14.1 – Generalità sulle tipologie di macchine

Come è noto nella operazione di foratura al trapano l'utensile possiede entrambi i moti di taglio e di avanzamento mentre il pezzo è bloccato sulla tavola. L'utensile per forare è la a punta ad elica normalmente a due taglienti ed è idonea a realizzare anche fori profondi.

I trapani possono così classificarsi:

- Portatili
- Sensitivi
- A colonna montante
- Radiali

Il trapano *portatile* non è un vera macchina utensile ma è uno strumento validissimo non solo per le lavorazioni domestiche ma anche nelle officine quando si devono fare fori in posizioni difficili o obbligate. Normalmente il massimo foro consentito è 13mm. L'azionamento è generalmente elettrico.

Il trapano *sensitivo* che può essere sia da banco che da colonna è cosi denominato per il fatto che avendo l'avanzamento manuale è la sensibilità dell'operatore che determina lo sforzo necessario alla operazione di foratura. Ne consegue che la capacità di foratura non supera i 20 mm. Queste macchine possiedono una cambio di velocità (in genere 3) con pulegge trapezoidali e cinghia. Il cambio della velocità richiede alcuni minuti per essere effettuato. Sono macchine comunissime all'interno delle officine.

Il trapano a *colonna montante* rappresenta una macchina certamente più importante in quanto può disporre di potenza sufficiente per eseguire fori anche di 50mm; è dotato di avanzamento automatico e di un cambio di velocità ad ingranaggi. Strutturalmente appare assai più robusto dei trapani sensitivi.

14.2 Accessori per usi particolari

Se si debbono fare delle forature in serie a distanze prestabilite si possono montare sul mandrino del trapano delle teste a più mandrini che derivano il moto dal mandrino principale. Le più semplici sono a tre mandrini (foto a ds) ma vi sono anche a più mandrini con snodi cardanici (foto a sn)

Queste attrezzature consentono di poter operare più fori con una discesa applicandole ad un trapano a colonna ma anche a un trapano radiale.

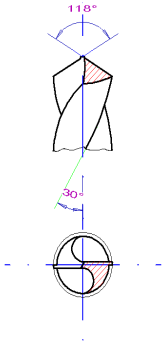
I trapani *radiali* sono trapani robusti e sono in genere indicati per eseguire forature su pezzi ingombranti ed anche pesanti, dove è necessario che sia la punta a raggiungere la posizione del foro e quindi non necessita spostare il pezzo. Sono dotati di cambio di velocità ed avanzamento e il raggio della bandiera determina la loro zona di operatività.

14.3 Utensili

I vari tipi di utensile *più comuni* utilizzati per forare si possono così distinguere:

- Punte elicoidali realizzate in acciaio HS non rivestito e rivestito con nitruri di titanio (TiN) e quelle con inserti in widia intercambiabili. L'estremità è cilindrica per piccoli diametri e conica (cono Morse) per diametri più grandi. Vi sono punte elicoidali con canalini di refrigerazione interni per raffreddare la punta ove c'è più necessità, cioè sul fondo del foro. Queste punte sono ottenute partendo dal cilindro nel quale viene eseguita la doppia foratura assiale, dopodiché viene torta a caldo la punta prima di ricavarne i solchi elicoidali.

Per ciascun diametro esistono punte di varia lunghezza per soddisfare le varie profondità di foratura.
Le norme UNI 3806 prevedono tre esecuzioni delle punte elicoidali N, D e T.
L'esecuzione N è l'esecuzione normale più comune adatta per acciai da costruzione, ghise e l'angolo che formano i due taglienti sulla punta è φ=118° , mentre l'angolo di inclinazione dell'elica γ varia da 15° a 30°. L'esecuzione T è più adatta per materiali teneri come alluminio, rame e leghe relative φ = 140° e γ = 30-45°. L'esecuzione D è indicata per materiali duri ma anche materiali non metallici, φ= 80° e γ = 8 - 16°.



- Punte a centrare; in realtà queste punte sono più utilizzate sulla controtesta del tornio.

- Punte a cannone utilizzate per fori profondi. Il nome deriva dall'utilizzo nella foratura delle canne da fuoco. Hanno la forma di un puntale cilindrico interrotto per una frazione di angolo giro in modo da ricavare una scanalatura laterale. In testa hanno un solo tagliente e dei pattini di guida. La lubrificazione avviene per mezzo di un foro, parallelo all'asse della punta, attraverso il quale il liquido in pressione giunge sulla punta e risalendo lungo la scanalatura asporta i trucioli.

- Fra le punte speciali segnaliamo due particolari punte che danno la possibilità di eseguire due lavorazioni diverse senza sostituire l'utensile.
  Foro con svasatura per alloggiare la testa della vite svasata

  Foro con sede per alloggiare la testa delle viti a frugola TCEI (testa cilindrica esagono incassato)

  i vantaggi in termini di tempo che si possono ottenere con queste punte, specie per forature di serie sono notevoli

- Alesatori. I fori eseguiti di punta non sono precisi né eccessivamente finiti; ciò è perfettamente compatibile per la maggioranza delle lavorazioni (ad esempio in carpenteria), ma a volte certe funzionalità richiedono forature in tolleranza. In tal caso si procede alla preventiva foratura lasciando un leggero sovrametallo (0.1-0.5mm) dopodiché

si passa nel foro l'alesatore di dimensioni idonee. Vi sono in commercio anche alesatori registrabili a lamelle espansibili che possono quindi essere utilizzati su più diametri.

- Maschi a macchina. Anche questa operazione può essere eseguita al trapano, quando questo è dotato di avanzamento automatico (uguale al passo da realizzare) e di invertitore del senso di rotazione del mandrino per il ritorno della punta.

Se la maschiatura è eseguita manualmente i maschi sono detti a mano, in tal caso si deve usare la serie di tre maschi usati in sequenza.

14.4 Parametri di foratura

Come è noto l'utensile possiede sia il moto di lavoro che il moto di avanzamento. Le punte più usate sono realizzate in acciaio super-rapido (HSS) e sempre di più la tipologia rivestita in nitruro di titanio (TiN – color giallo oro).
Le velocità riportate nelle tabelle si riferiscono ad una durata prevista dell'utensile pari a una lunghezza complessiva di foratura di 2000mm. L'avanzamento di riferimento è circa 1/100 del diametro della punta.

MATERIALE UTENSILE – ACCIAIO HSS		
Materiale da lavorare	*Velocità di taglio (m/1')*	*Avanzamento (mm/giro)*
Acciaio non legato (R_m < 700 dN/cm^2)	25 - 40	0.015 - 0.40
Acciaio non legato (R_m > 700 dN/cm^2)	20 – 30	0.01 – 0.30
Acciai legati (R_m < 900 dN/cm^2)	15 - 20	0.01 - 0.30
Acciai legati (R_m > 900 dN/cm^2)	10 - 15	0.07 – 0.20
Ghisa tenera (HB < 200)	20 - 30	0.02 – 0.50
Ghisa dura (HB > 200)	10 – 20	0.01 – 0.40
Acciai inox	5 - 10	0.01 – 0.30
Ottoni, bronzi (durezza media)	50 - 70	0.02 – 0.50
Leghe di alluminio	50 - 100	0.02 – 0.50

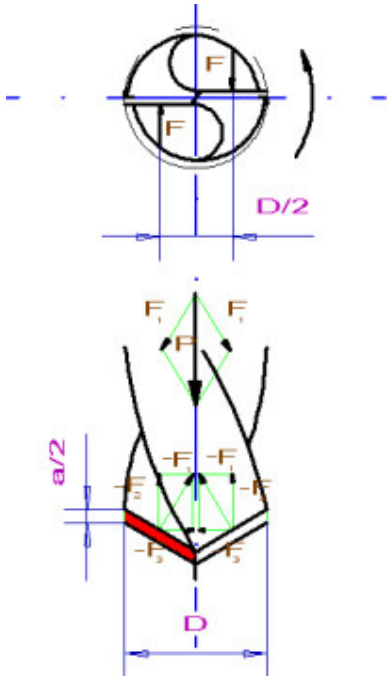
MATERIALE UTENSILE – ACCIAIO HSS – RIVESTITO IN TiN			
Materiale da lavorare	*Diametro punte (mm)*	*Velocità di taglio (m/1')*	*Avanzamento (mm/giro)*
Acciaio (R_m 850 – 1400 N/cm^2)	2 - 10	40 - 45	0.02 – 0.05
	10 -20	45 - 60	0.04 – 0.08
	20 - 40	60 - 70	0.08 – 0.12
Getti di acciaio (R_m > 700 N/cm^2)	2 - 10	15 - 20	0.02 – 0.05
	10 -20	20 - 25	0.04 – 0.08
	20 - 40	25 - 30	0.08 – 0.12
	2 - 10	15 - 20	0.02 – 0.03

Acciaio al Ni-Cr	10 -20	20 - 25	0.03 – 0.05
	20 - 40	25 - 30	0.06 – 0.08
Acciaio da utensili	2 - 10	8 - 10	0.02 – 0.03
	10 -20	10 - 12	0.03 – 0.04
	20 - 40	12 - 15	0.04 – 0.05
Ghisa (HB < 200)	2 - 10	50 - 55	0.04 – 0.08
	10 -20	55 - 60	0.08 – 0.15
	20 - 40	60 - 65	0.15 – 0.30
Ghisa (HB > 200)	2 - 10	25 - 30	0.03 – 0.05
	10 -20	30 - 35	0.05 – 0.10
	20 - 40	35 - 40	0.10 – 0.20
Ottoni , bronzi (durezza media)	2 - 10	70 - 80	0.06 – 0.10
	10 -20	80 - 85	0.10 – 0.15
	20 - 40	85 - 90	0.15 – 0.20
Leghe leggere	2 - 10	200 – 230	0.06 – 0.10
	10 -20	230 – 260	0.10 – 0.18
	20 - 40	260 – 300	0.18 – 0.25

14.5 Calcolo potenza di taglio e di penetrazione

Le sollecitazioni cui è sottopostala punta sono un momento torcente M e una forza di penetrazione –P.
La coppia di reazione è data dalla forza di taglio per il braccio che ha un valore prossimo a D/2

$$M = F\frac{D}{2}$$



$$F = K_s \times q = K_s \times \frac{aD}{4}$$

dove:

- K_s = (4 - 6) R_m è la tensione di strappamento
- $q = \frac{a}{2} \times \frac{D}{2} = \frac{aD}{4}$ è la sezione del truciolo

La potenza assorbita in Kw sarà:

$$P = \frac{M \times \omega}{1000}$$

se η è il rendimento del trapano, la potenza del motore elettrico sarà:

$$P_m = \frac{M \times \omega}{1000 \times \eta}$$

La potenza di avanzamento è invece data da:

$$P_a = \frac{P \times a \times n}{60 \times 10^6}$$

dove, se β = ~120° (angolo fra i taglienti)

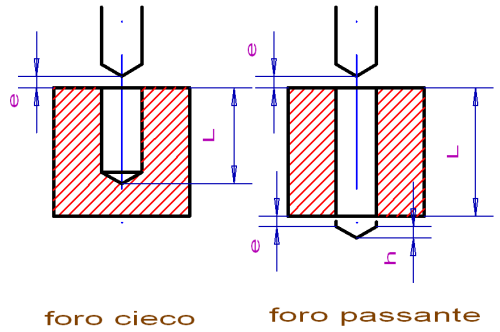
$$P = 2F_2 = 2F_1 sen\frac{\beta}{2} \cong F_1 \times \sqrt{3}$$

dove F_1 = ~ F (forza di taglio) e quindi la potenza di avanzamento è trascurabile rispetto a quella di taglio.

14.6 Tempo di lavorazione

Il tempo di lavorazione si calcola con la nota formula: $t = \frac{L+e}{a \times n}$

a seconda che il foro sia cieco o passante cambierà il valore di e:

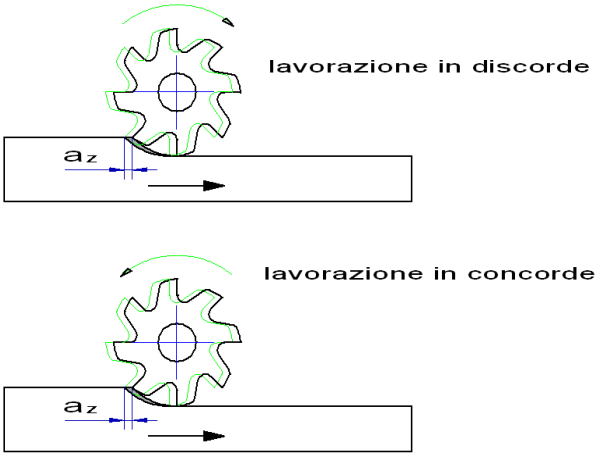


Dove h si può assumere = 0.3D

MODULO 15 - Lavorazioni alla fresatrice

15.1 Moti di lavoro e alimentazione

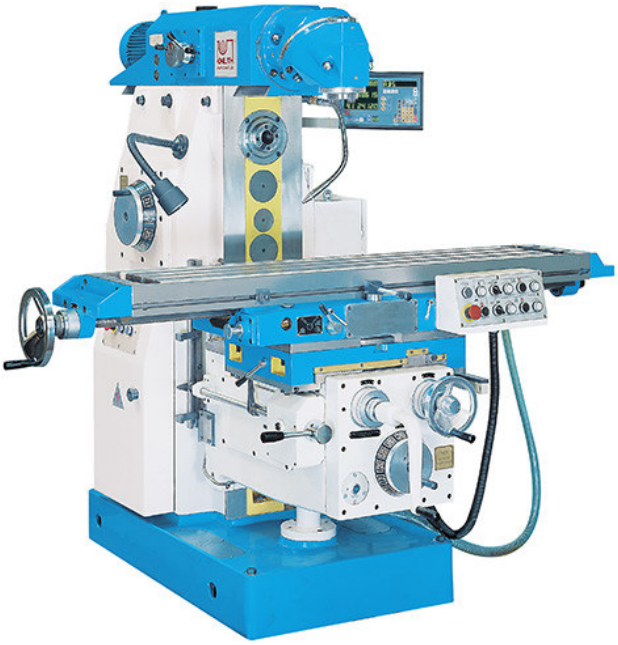
I moti di lavorazione e di avanzamento nella fresatrice sono posseduti rispettivamente dall'utensile (fresa) e dalla tavola (pezzo). Le lavorazioni più comuni che si possono effettuare sono le spianature, anche se è possibile realizzare lavorazioni diverse.
I metodi di lavoro sono in discorde e in concorde a seconda che l'avanzamento della tavola vada rispettivamente contro o favorisca il senso di rotazione dell'utensile durante il taglio.



La fresatura in discorde viene utilizzata quando fra vite e madrevite della tavola vi sono possibilità di gioco, il pezzo in questo caso tende a sollevarsi dalla tavola, inoltre la finitura superficiale non è ottimale perché il truciolo non può formarsi con spessore "0" e quindi inizialmente si ha un ricalcamento del materiale prima dell'inizio dell'azione tagliante.
Di contro la lavorazione in concorde dà stabilità al pezzo in quanto premuto contro la tavola, dà luogo ad una migliore finitura iniziando il taglio dallo spessore massimo ma richiede che non vi siano giochi fra vite e madrevite altrimenti l'utensile tende a impuntarsi. Questo fatto ne limita l'impiego specie sulle macchine vecchie, ma viene utilizzato quando il comando avviene tramite viti a ricircolazione di sfere come nelle macchine a CNC.

15.2 Generalità sulla macchina

La fresatrice convenzionale più attrezzata è la universale. Questa macchina possiede il mandrino orizzontale per lavorare come una fresatrice orizzontale con motore autonomo, possiede il mandrino verticale per lavorare verticalmente anch'esso con motore autonomo, ha la tavola inclinabile così come la testa verticale.



I pezzi possono essere fissati direttamente sulla tavola mediante staffaggio, ma si possono montare sulla tavola morse normali, morse con piattaforma girevole o l'apparecchio divisore.

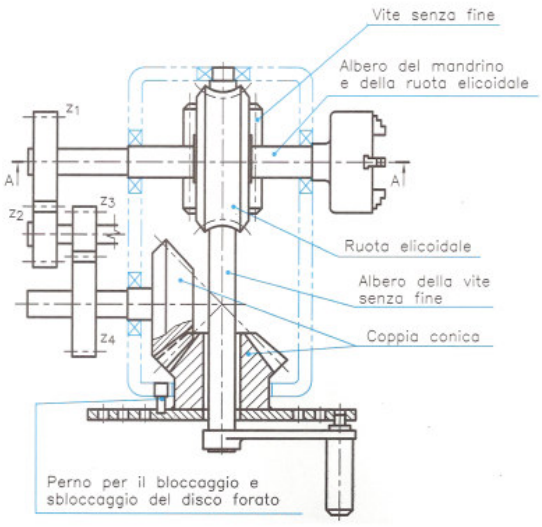
15.3 L'apparecchio divisore

La testa a dividere o apparecchio divisore è un apparecchio necessario per la esecuzione di scanalature su alberi, per la costruzione di ruote dentate o quando occorra effettuare un certo numero di divisioni di ampiezza angolare assegnata, oppure in cui occorra dividere in un certo numero di parti uguali una circonferenza.

Con il divisore viene fornito il gruppo contropunta per montare pezzi cilindrici fra le punte. Inoltre accessori al divisore sono il mandrino autocentrante, la brida (diversa da quella del tornio perché disco e brida sono univocamente collegati) con menabrida, una serie di dischi con varie serie di fori su circonferenze diverse, una staffa per il montarvi ruote dentate, una serie di ruote dentate.
L'apparecchio divisore può essere ruotato di 90°, ossia il mandrino viene a trovarsi da orizzontale a verticale.

All'interno del divisore c'è una vite senza fine che ingrana con una ruota elicoidale (rapporto in genere 1/40). La ruota è sull'asse del mandrino e l'albero fuoriesce posteriormente dalla scatola.

Dalla scatola esce un altro alberino (più basso) che può trasmettere, se collegato con un nottolino, un moto di rotazione al disco forato mediante due ruote coniche esattamente uguali; oppure se non collegato si può trasmettere la rotazione al mandrino derivandola dalla vite della tavola.



La divisione semplice prevede l'utilizzo del divisore senza le ruote dentate esterne in tal caso si utilizza la formula:

$$x = \frac{40 \times f}{n}$$

dove:

- x è il numero di fori da contare per eseguire la rotazione voluta
- f rappresenta il numero dei fori presenti sulla circonferenza forata prescelta
- n è il numero di suddivisioni da eseguire

esempi:
se si vuole ricavare un quadrato da un tondo, occorre ruotare il pezzo di 90° (1/4 di giro quindi 4 divisioni) per cui:

$$x = \frac{40 \times f}{4} = 10 \times f$$

ossia, indipendentemente dalla circonferenza scelta, è necessario eseguire 10 giri della manovella per ruotare in pezzo di 90°.

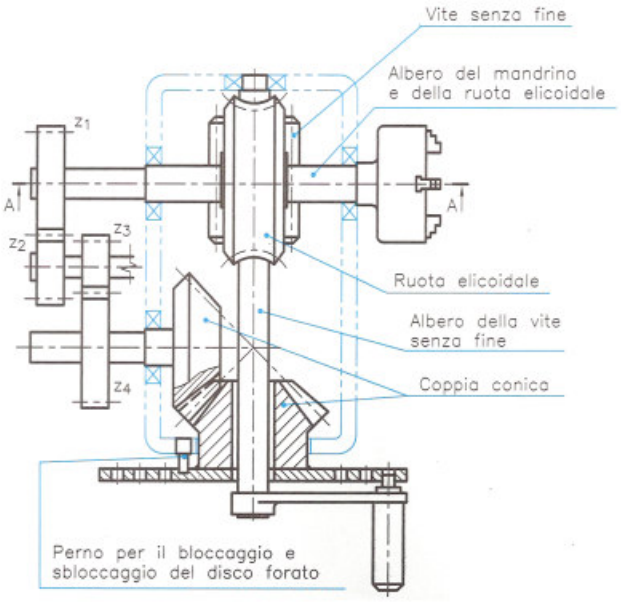
Se si volesse un esagono, occorre eseguire 6 divisioni in un giro e quindi:

$$x = \frac{40 \times 15}{6} = 100$$

per ottenere ciò, si è prima semplificato 40 e 6 dividendo per 2, dopodiché si è scelta una circonferenza contenente un numero di fori multiplo di 3; la più piccola è 15 ottenendo così 100. Per eseguire lo spostamento voluto occorre fare con la manovella 6 giri completi (6x15=90)

dopodiché si contano 10 fori e si inserisce il nottolino. Per facilitare l'operazione si usano le alidade, le squadrette mobili presenti sulla superficie del disco forato.

Nel caso non si disponga di una circonferenza forata che consenta di ottenere un numero intero, occorre far ricorso alla divisione differenziale rappresentata sotto in figura



esempio si debbano eseguire 47 divisioni (numero primo) , non esistendo la circonferenza con 47 fori si commette un errore esempio facendo 50 divisioni e correggendo l'errore commesso facendo spostare il disco come in figura.

$$x = \frac{40xf}{n} = \frac{40 \times 25}{50} = 20$$

abbiamo scelto la circonferenza con 25 fori e quindi per effettuare lo spostamento dobbiamo contare 20 fori sulla circonferenza di 25.

Per correggere l'errore commesso e = 50-47 = 3

Si calcolano le ruote con la formula del rapporto di trasmissione $r = \frac{40 \times e}{50} = \frac{40 \times 3}{50} = \frac{12}{5}$

$$r = \frac{z_1 \times z_3}{z_2 \times z_4} = \frac{12}{5} = \frac{30 \times 40}{25x20}$$

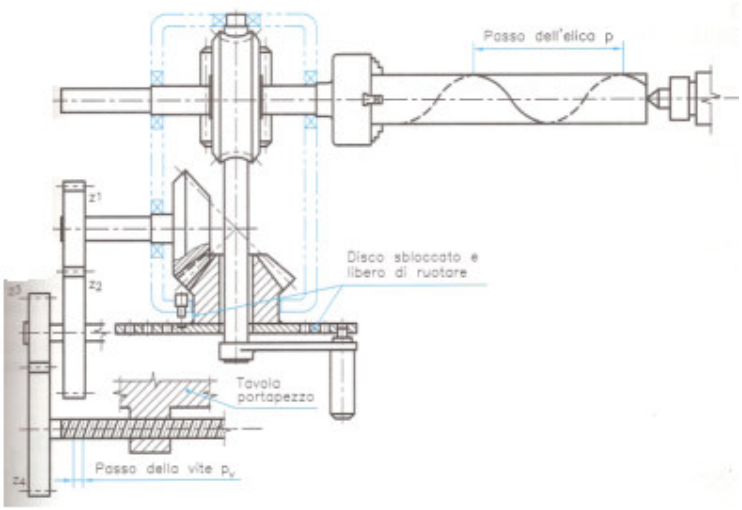
avendo commesso l'errore in eccesso il disco deve ruotare in senso orario (in avanti), se l'errore era in difetto il disco doveva ruotare in senso antiorario, quindi occorreva inserire una ruota oziosa nel cinematismo.

Per eseguire ruote dentate elicoidali oppure scanalature elicoidali lungo una circonferenza è necessario che il pezzo ruoti mentre avanza, per far ciò occorre combinare la rotazione del pezzo

con la rotazione della madrevite sotto la tavola. Si deriva il moto dalla vite e tramite opportune coppie di ruote dentate si porta il moto dentro il divisore alla coppia di ruote dentate coniche che fanno ruotare il disco forato; questo è reso solidale alla manovella tramite il nottolino e da questa il moto passa alla vite senza fine e quindi alla ruta elicoidale che comanda il mandrino.
Nel caso che i passi dell'elica e della vite non siano molto distanti come valore si può escludere il rapporto 1/40 portando il moto direttamente dalla vite madre all'asse del mandrino.

Tenendo presente che i passi sono inversamente proporzionali ai rispettivi giri avremo:

$$\frac{p_e}{pv} = \frac{n_v}{n_e} = \frac{40 \times z_3 \times z_1}{z_2 \times z_4}$$



Se si vuole realizzare un passo della elica di 200mm e il passo della vite madre è 6mm si avrà:

$$\frac{p_e}{40 \times p_v} = \frac{z_3 \times z_1}{z_2 \times z_4} = \frac{200}{40 \times 6} = \frac{10}{12} = \frac{20 \times 50}{30 \times 40}$$

Se per fare la scanalatura elicoidale si impiegano frese a candela (fresatrice verticale) la tavola rimane diritta, se invece si impiegano frese circonferenziali (fresatrice orizzontale) la tavola deve essere inclinata come l'elica per poter eseguire il taglio circonferenziale.

15.4 Utensili fresa

Gli utensili per fresatura a seconda del modo con cui tagliano si classificano in:
- tangenziali quando i denti sono ricavati sulla parte cilindrica dell'utensile
- frontali quando i denti sono ricavati su una superficie piana
- a due tagli se i denti sono attivi su due lati
- a tre tagli con denti attivi su tre lati
- frese a profilo costante (es. modulari per ingranaggi)

Nella fotografia sono riportati una gamma completa di frese in HSS

Le frese a profilo costante per fresare, ad esempio gli ingranaggi, sono così denominate perché a seguito dell'affilatura non variano il profilo di taglio. Per ottenere ciò la fresa deve avere il dorso sagomato secondo la spirale di Archimede, e l'affilatura, eseguita sul petto dell'utensile con una mola a tazza, è radiale.

Moderni utensili fresa per spianatura ad elevate prestazioni

15.5 Condizioni di taglio nella fresatura

La velocità di taglio è espressa dalla formula: $V_t = \frac{\pi \times D \times n}{1000}$

dove D è il diametro della fresa ed n il numero dei giri.
Per le frese in acciaio HSS, la velocità di taglio deve consentire una durata della affilatura almeno di 240 minuti, tenuto conto delle difficoltà della riaffilatura.
Nella tabella seguente sono indicati valori orientativi delle velocità

Materiale da lavorare	Acciaio HSS	Taglienti in carburi	Qualità ISO carburil
Acciaio R_m < 600 N/mmq	18 - 30	120 -200	P20
Acciaio R_m =600-1000 N/mmq	15 - 24	70 -100	P20
Acciaio R_m=1000-1200 N/mmq	8 - 14	30 - 50	P10
Ghisa HB < 180	15 –25	70 -100	K20
Ghisa HB > 180	12 – 16	50 - 70	K10
Ottoni - bronzi	15 - 24	70 - 100	K20
Rame	40 - 50	80 -120	K20
Leghe alluminio HB<50	100 -180	300-400	K20
Leghe alluminio HB>50	70 - 120	150 -250	K10

I valori più bassi per la sgrossatura e gli alti per la finitura.

Per calcolare la velocità di avanzamento è necessario riferirsi all'avanzamento a dente a_z che costituisce il riferimento di base, secondo la relazione :

$$V_a = a_z \times z \times n$$

dove z rappresenta il numero dei denti o taglienti della fresa ed n il numero dei giri.

Materiale da lavorare	Frese cilindriche e frontali	Frese a disco e di forma	Frese a codolo	Frese a lame riportate
Acciaio R_m < 600 N/mmq	0.08 - 0.20	0.02 – 0.08	0.04 – 0.08	0.10 – 0.25
Acciaio R_m =600-1000 N/mmq	0.05 – 0.15	0.02 – 0.07	0.02 – 0.06	0.10 –0.20
Acciaio R_m=1000-1200 N/mmq	0.04 – 0.10	0.02 – 0.07	0.02 – 0.06	0.05 – 0.10
Ghisa HB < 180	0.08 – 0.20	0.02 – 0.05	0.03 – 0.06	0.10 – 0.30
Ghisa HB > 180	0.04 – 0.10	0.02 – 0.04	0.04 – 0.05	0.10 – 0.20
Ottoni - bronzi	0.08 – 0.20	0.03 – 0.06	0.06 – 0.10	0.10 – 0.40
Rame	0.10 – 0.20	0.04 – 0.08	0.04 – 0.10	0.10 – 0.30
Leghe alluminio HB<50	0.10 - 0.25	0.06 – 0.10	0.08 – 0.15	0.08 – 0.30
Leghe alluminio HB>50	0.08 – 0.15	0.04 – 0.08	0.04 – 0.12	0.06 – 0.20

I valori più bassi per la finitura e gli alti per la sgrossatura

15.6 Potenza di fresatura

La potenza di fresatura è data dalla somma della potenza di taglio e dalla potenza di avanzamento. quest'ultima si può valutare da 12-15% della prima per cui la potenza massima di fresatura sarà:

$$N_{max} = 1.15\ N_{tmax}$$

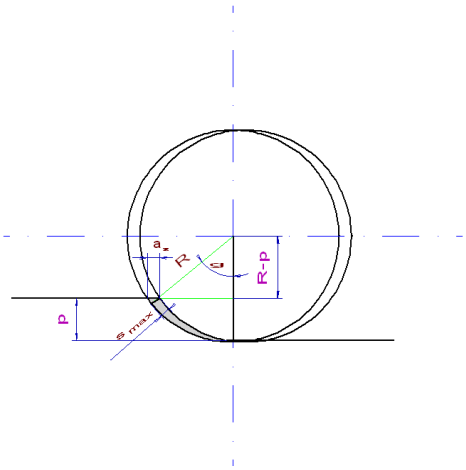
La potenza assorbita dal motore è: $$N_{mot} = \frac{N_{t\max}}{\eta}$$

Dove il rendimento si può assumere $\eta = 0.70\text{-}0.80$

A differenza del tornio la potenza durante l'operazione non è costante ma varia in funzione sia del numero di denti in presa, sia dello spessore diverso che si trova sotto il tagliente.
Si dimostra che lo spessore massimo del truciolo

$$\boxed{s_{\max} = a_z \times sen\gamma}$$

$$\boxed{s_{\max} = 2a_z\sqrt{\frac{p}{D}}}$$



Se L è la larghezza di fresatura la sezione max di truciolo è:

$$q_{max} = s_{max} \times L$$

Lo sforzo massimo di taglio, nota la tensione di strappamento K_s , risulterà:

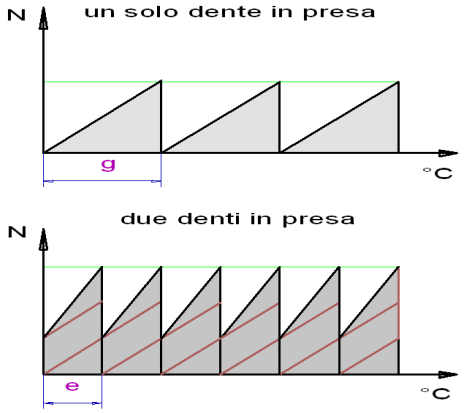
$$P_{max} = q_{max} \cdot K_s$$

e la potenza massima:

$$N_{max} = \frac{P_{max} \times V_t}{60000} (Kw)$$

questo se si ha un solo dente in presa ossia se $\varepsilon = \frac{360°}{z} = \gamma$

Se i denti in presa sono di più si può valutare la potenza complessiva sommando graficamente le potenze impegnate dai denti nella loro posizione di taglio.



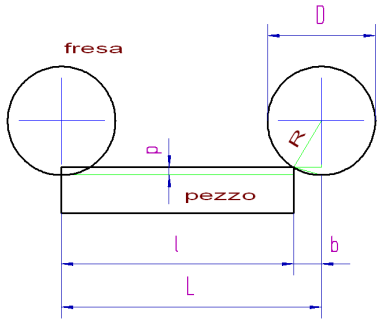
se la fresatura è frontale lo spessore massimo del truciolo è l'avanzamento a dente, e la sezione è data dallo spessore del truciolo per la profondità di passata.
Naturalmente anche in questo caso occorre valutare i denti in presa.

15.7 Tempo di lavoro nella fresatura

Il tempo di lavoro si calcola con $t = \frac{L + e}{V_a}$

La velocità di avanzamento abbiamo visto in precedenza come si valuta, per la lunghezza di lavoro occorre distinguere fra fresatura circonferenziale e frontale.

1- fresatura periferica o circonferenziale

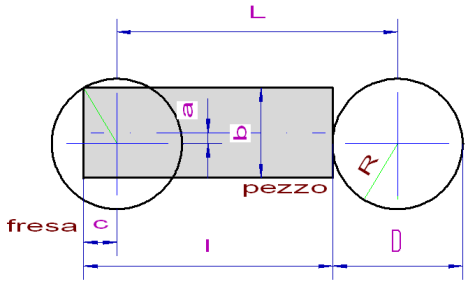


In prima approssimazione si può assumere L+e = l+R

Esattamente $$b = \sqrt{R^2 - (R-p)^2} = \sqrt{2Rp - p^2} = \sqrt{p(D-p)}$$

2- fresatura frontale

si deve valutare innanzi tutto la posizione fresa-pezzo, inoltre se si vuole che la fresa esca completamente dal pezzo per una finitura superficiale uniforme, oppure la posizione in cui la fresa cessa di fare truciolo. In quest'ultimo caso sempre in prima approssimazione si può assumere L+e = l+D. Negli altri casi occorre procedere ad un calcolo; a titolo di esempio sviluppiamo una fresatura asimmetrica di valore "a":



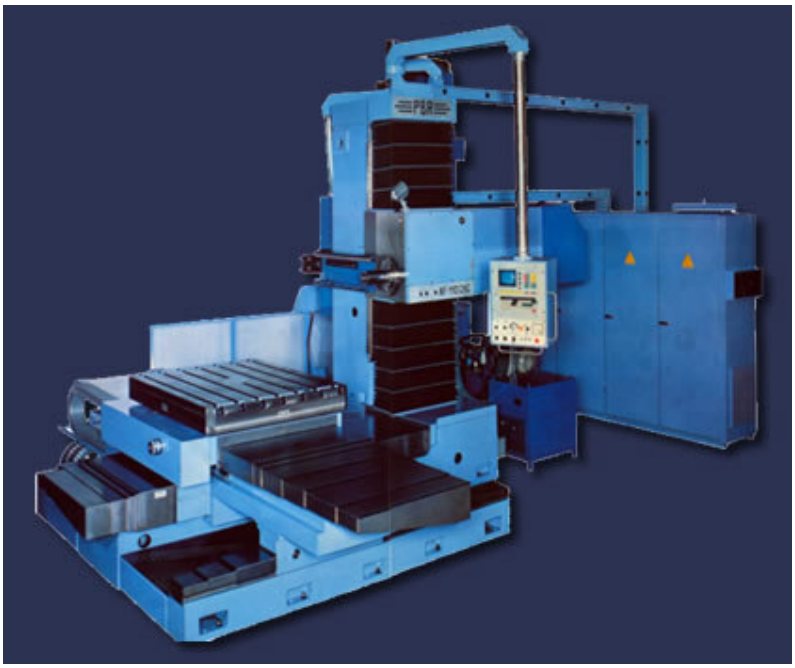
$$c = \sqrt{R^2 - (\frac{b}{2} + a)^2}$$

e quindi L = l + R -c

MODULO 16 – La macchina alesatrice

16.1 Generalità sulla macchina alesatrice

L'alesatrice è una macchina di dimensioni medio-grandi in grado di lavorare pezzi di dimensioni e peso anche rilevanti mantenendo però una precisione di lavoro notevole.
Si può dire che è una evoluzione della macchina fresatrice, con una particolare attitudine alla esecuzione di forature.



La macchina è costituita da un robusto basamento sul quale scorrono il gruppo delle slitte per il posizionamento è l'orientamento della tavola portapezzo nel piano orizzontale e quindi slitta longitudinale, slitta trasversale e tavola girevole.
Su un lato della macchina si trova il montante, lungo le cui guide verticali scorre la testa motrice con il suo motore che fornisce il moto al mandrino.
Su alcune macchine un po' datate, all'altra estremità, può trovare alloggio, sulle guide longitudinali del basamento, un contromontante dotato di un supporto il cui asse è perfettamente allineato col mandrino. Su questo asse può ruotare una robusta barra portautensili denominata *"bareno"* e utilizzata per alesature di lunghi e grossi diametri.

Il moto di lavoro rotatorio è posseduto dal mandrino; il moto di avanzamento può essere affidato all'utensile che quindi fuoriesce per un certo tratto, oppure alla tavola portapezzo.
Il moto di registrazione e di alimentazione verticale (es. per spianare una superficie verticale) è affidato alla testa motrice che scorre sulle guide del montante. I moti orizzontali trasversale e longitudinale sono posseduti dal pezzo tramite le slitte.

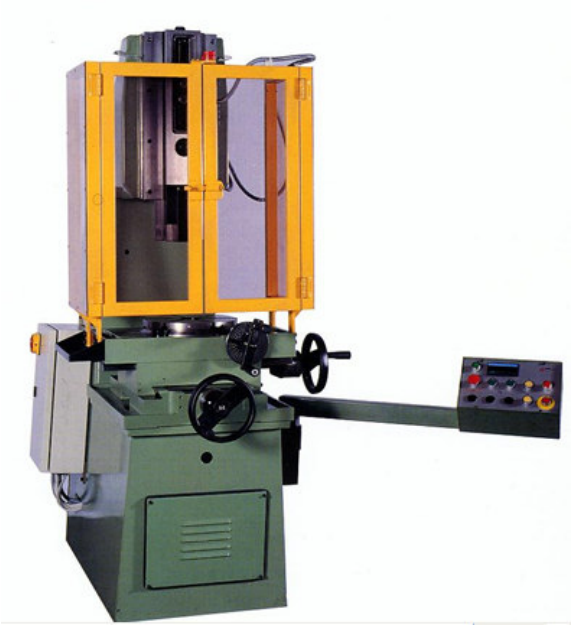
Le macchine odierne sono tutte a controllo numerico per la facilità e rapidità di gestione delle lavorazioni. Queste possono essere di foratura, alesatura, maschiatura, singole o multiple, nonché fresature di superfici secondo qualsiasi angolazione.

Per quanta riguarda le velocità di taglio di foratura, alesatura e fresatura si fa riferimento a quelle usate nelle specifiche macchine con gli stessi utensili.

MODULO 17 - La macchina stozzatrice

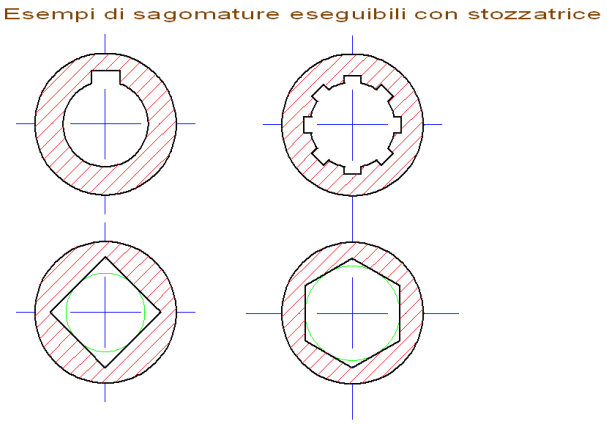
17.1 Generalità sulla stozzatrice

E' una macchina a moto rettilineo alternativo che avviene in verticale. In genere il movimento è ottenuto attraverso un meccanismo di biella-manovella. Viene essenzialmente utilizzata per compiere lavorazioni interne previa operazione di foratura tale da permettere all'utensile di entrare. Il basamento è dotato di una tavola che possiede le due traslazioni e la rotazione. La testa può anche ruotare di 45° nei due sensi.



La macchina è abbastanza semplice poco costosa ed assai diffusa nelle officine. Con essa si eseguono sagomature interne su fori passanti, ma è l'unica macchina che consente di fare sagomature anche su fori ciechi.

Le sagomature devono essere eseguite una per volta per cui nell'esempi di lavorazione in figura solo il primo non necessita di rotazione del pezzo. Ciò comporta tempi di lavorazione piuttosto lunghi per cui non è indicata per lavorazioni di serie. Nelle officine è assai diffusa per l'esecuzione di cave per chiavette e linguette sui mozzi delle ruote.



Modulo 18 – La brocciatrice

18.1 La brocciatrice: macchina e lavorazioni

La **brocciatrice**, è una macchina utensile che lavora per *asportazione di truciolo*, realizzando la lavorazione tramite un utensile detto *broccia*, costituito da una serie di taglienti che rimuovono progressivamente il materiale dalla superficie del pezzo. Le brocciatrici possono essere per interni o per esterni, ed a struttura orizzontale o verticale.

Le brocciatrici per interni servono a realizzare fori di geometria fissata a partire da fori preesistenti. La broccia è fornita di più serie di denti di sporgenza crescente, in modo da asportare progressivamente il materiale dalla superficie interna del foro iniziale e realizzare la geometria finale desiderata. È ovviamente necessario che il foro iniziale abbia una dimensione tale da consentire l'inserimento della parte iniziale dell'utensile. Si possono realizzare fori sagomati nelle geometrie più disparate, quali fori scanalati, rigati, quadrati, esagonali, eccetera. Il moto di lavoro è fornito alla broccia, per trazione o compressione, mentre il pezzo è opportunamente fissato al banco della macchina.

Le brocciatrici per esterni servono per la lavorazione di superfici esterne. Gli utensili non hanno una forma di asta dentata come quelle per interni, ma si presentano invece come delle piastre dotate di più file di denti. Il moto di lavoro può essere fornito all'utensile o al pezzo.

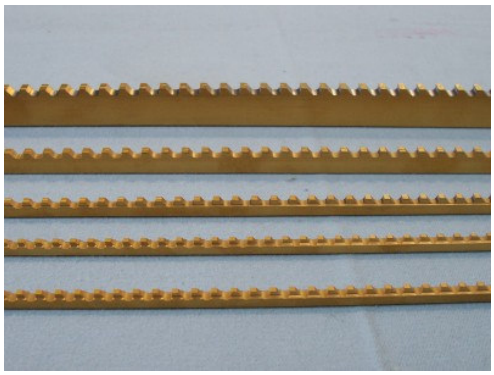
Nella esecuzione di tagli di chiavette sostituisce utilmente la stozzatrice.

18.2 L'utensile broccia

Dato il costo elevato dell'utensile, con il quale si può eseguire solo la lavorazione per cui è progettata, l'operazione di brocciatura è indicata per le lavorazioni di serie.

Brocce per interni

Brocce per chiavette



La broccia è un utensile speciale, costruito appositamente per realizzare una lavorazione la cui precisione dipende dall'utensile e non dalla macchina.
La broccia per interni, la più comune, si caratterizza per avere tre parti:

- 1. il codolo anteriore formato dall'attacco e dalla guida anteriore
- 2. la dentatura che può essere suddivisa a sua volta in tre zone: per sgrossare, per semifinire e per finire
- 3. il codolo posteriore con la guida

Per progettare una broccia è necessaria la conoscenza dei seguenti parametri:

- diametro del foro iniziale. Può essere il foro finito o con sovrametallo se necessita di rettifica.
- spessore del materiale da asportare ricavabile dal disegno del pezzo
- incremento dei denti: è la differenza radiale fra un dente e il suo successivo
- passo dei denti in mm $p = (1.75 \div 1.8)\sqrt{L}$ dove L(mm) è la lunghezza da brocciare
- profilo dei denti
- numero dei denti deriva dallo spessore (S) da asportare e dall'incremento

$$z = \frac{S}{i} + (5 \div 6 lisciatori)$$

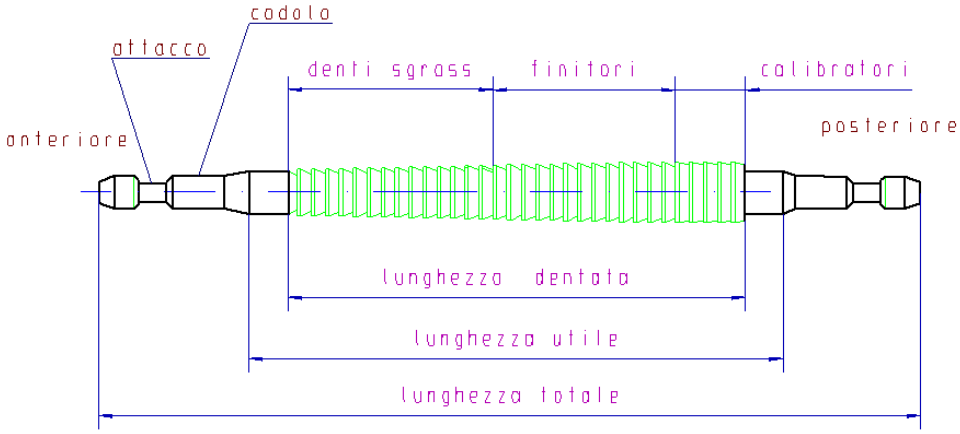
- numero delle brocce occorrenti (la lavorazione è di serie e l'affilatura provoca la variazione del profilo e quindi della precisione, inoltre se la lunghezza dentata supera il metro la broccia si spezza in due)
- verifica della resistenza a trazione della sezione minima che è in genere l'attacco. A tale scopo si calcola lo sforzo di taglio:

$$F_t = K_s \cdot q = K_s \cdot n_z \cdot p \cdot i$$

dove: K_s è la tensione di strappamento, n_z il numero dei denti contemporaneamente in presa,

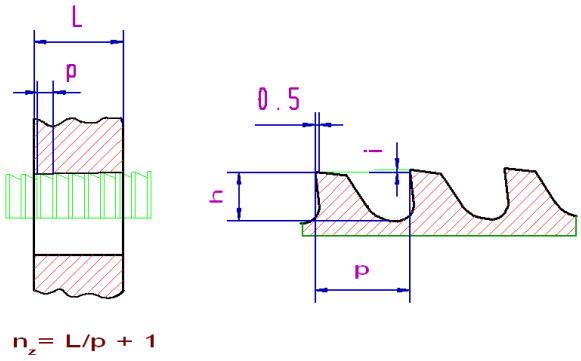
p è il perimetro di taglio e i è l'incremento

- tipo di attacco
- materiale per la costruzione: in genere acciai superrapidi, ma per brocce di grosse dimensioni i denti sono in placchette riportate di carburi
- lubrificazione è continua ed abbondante (tranne che per le ghise)
- lunghezza totale della broccia : $L_t = p \cdot (z+5) + 250$ dove con 250 mm abbiamo stimato le lunghezze degli attacchi e dei codoli
- altezza del dente: $h = (0.4\text{-}0.5)\ p$



Indicazioni per la scelta degli incrementi

Acciai dolci e semiduri	0.03-0.08 mm
Acciai duri e extraduri	0.02-0.05 mm
Ghise e bronzi teneri	0.08-0.15 mm
Ghise e bronzi duri	0.05-0.12 mm
Ottoni e alluminio duro	0.10-0.20 mm



18.3 Parametri di taglio e tempo di lavorazione

La velocità di brocciatura è piuttosto bassa per due motivi, innanzi tutto perché deve durare senza affilatura per 15000-20000 pezzi, in secondo luogo perché la velocità di taglio corrisponde alla velocità di avanzamento e quindi essendo molto alta comporta tempi di lavoro ridottissimi
Con brocce in acciaio superrapido si ha:

- acciai: da 2.5 a 4 m/1'
- ghise : da 1.5 a 2 m/1'
- ottoni e bronzi: 6 m/1'
- leghe leggere: 10 m/1'

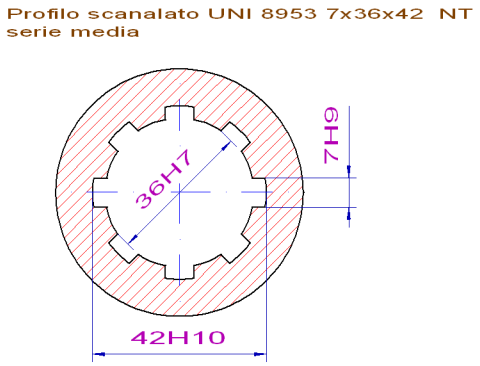
Il tempo di lavoro si calcola: $t = \frac{C}{V}$

dove: C = lunghezza della broccia + lunghezza di bocciatura + extracorsa

La potenza di brocciatura è data da: $P = F_t \cdot V$

Esempio

Progettare la broccia in acciaio HS per eseguire il profilo scanalato a disegno di un mozzo di ruota dentata larga L=30 mm : Materiale Rm 850 N/mm^2 bonificato.



Trattandosi di un acciaio duro assumiamo dalla tabella un incremento i = 0.04 mm
Il numero dei denti sarà:

$$z = \frac{(42-36)}{2 \times i} + 5 = \frac{3}{0.04} = 80$$

il passo dei denti $p = 1.75\sqrt{L} = 1.75\sqrt{30} = 9.6mm$

altezza del vano dente h = 0.5 x p = 4.8 mm

lunghezza utile dentata: L_u = p x z = 9.6 x 80 = 768 mm
Aggiungendo attacchi e codoli e centraggio stimiamo una lunghezza totale L_t = 1050 mm

Il diametro minimo del nucleo della broccia sarà:

d_{min} = diametro di centraggio – 2h = 36 – 2 x 4.8 = 26.4 mm

Verifica del nucleo a trazione:

Assumiamo la tensione di strappamento: Ks = 5 R_m = 4250 N/mm^2

Il diametro minimo del nucleo della broccia sarà:

d_{min} = diametro di centraggio – 2h = 36 – 2 x 4.8 = 26.4 mm

Numero dei denti in presa: $n_z = \frac{L}{p} + 1 = \frac{30}{9.6} + 1 = 4$ x 8 scanalatura = 32

La sezione del truciolo: q = p x i = 7 x 0.04 = 0.28 mm^2

Lo sforzo di taglio complessivo: $F_t = K_s$ x q x n_z = 4250 x 0.28 x32 = 38080 N

Sezione resistente del nucleo: A = $A = \frac{\pi \times d^2}{4} = \frac{\pi \times 26.4^2}{4} = 547 mm^2$

Tensione max nel nucleo: $\sigma = \frac{F_t}{A} = \frac{38080}{547} = 70 N/mm^2$

Il valore è ampiamente compatibile con la tensione ammissibile dell'acciaio rapido.

Calcolo del tempo di lavorazione:

Assumiamo come consigliato la velocità di taglio: V_t = 3 m/1'

$$t = \frac{C}{V_t} = \frac{0.05 + 1.050 + 0.030 + 0.05}{3} = 0.40 \min/ \, pezzo$$

A questo tempo occorre aggiungere il riposizionamento della broccia (ritorno), se consideriamo una velocità di ritorno doppia si ha t = 0.20 min/pezzo
A questo va aggiunto lo smontaggio e il montaggio del pezzo, la pulizia etc, possiamo valutare in 2 min questo tempo, per cui il tempo di esecuzione del pezzo risulterà:

t = 0.4 +0.2 + 2 = 2.6 min

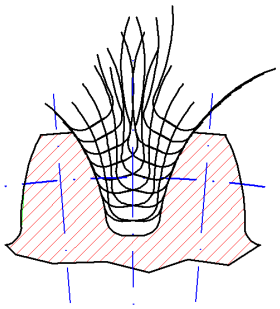
che per la difficoltà della lavorazione è esiguo.

Calcolo della potenza utilizzata: P = F_t x V_t = 38080 x 3/60 = 1900 W = 1.9 KW

MODULO 19 – Le dentatrici

19.1 Generalità sul taglio delle ruote dentate

Abbiamo visto che le ruote dentate possono essere realizzate sulle fresatrici, ma vedremo che tale operazione, anche per produzioni di piccolissima serie non è conveniente sia in termini di tempo sia come precisioni ottenibili.
Infatti per valutare il tempo di esecuzione sulla fresatrice occorre considerare, oltre al tempo macchina vero e proprio, tutti i movimenti senza asportazione di truciolo derivanti sia dall'uso del divisore sia dai ritorni a vuoto dopo aver eseguito il vano di ogni dente.
Nelle dentatrici i tempi passivi sono ridottissimi, inoltre la generazione della ruota dentata avviene per una combinazione di moti che simula l'ingranamento fra utensile e pezzo generando il cosiddetto taglio per inviluppo.



Il moto di taglio è posseduto sempre dall'utensile, il moto di alimentazione è posseduto da entrambi. Il taglio per inviluppo offre vari vantaggi rispetto al taglio sulla fresatrice; su questa macchina infatti il taglio del materiale avviene singolarmente vano per vano, mentre nella dentatrice la dentatura si sviluppa contemporaneamente su tutto ilo pezzo e quindi si ottiene una precisione più elevata, inoltre occorre un solo utensile per modulo in dipendentemente dal numero di denti della ruota, a differenza della fresatrice, in quanto la forma del dente è determinata dal moto di inviluppo stesso.

19.2 Richiami sulle ruote dentate cilindriche

Il dimensionamento delle ruote dentate è modulare, ossia è determinato da un numero razionale " il modulo *m* " che si ottiene in funzione della coppia che deve trasmettere la ruota e del materiale con cui è realizzata.
Quindi elementi caratteristici di una ruota dentata sono: il modulo, il numero dei denti z e l'angolo di pressione θ (rappresenta la direzione della forza che si trasmettono le due ruote quando il contatto è sulla circonferenza primitiva).

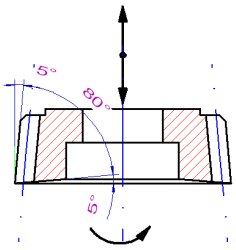
Passo :	$p = m \cdot \pi$
Diametro primitivo:	$d_p = m \cdot z$
Diametro esterno:	$d_e = d_p + 2m = m \cdot (z + 2)$
Diametro interno:	$d_i = d_p - 2 \cdot 1.25m$
Altezza del dente:	$h = m + 1.25m = 2.25m$

Nelle ruote elicoidali compare l'angolo di inclinazione dell'elica β, quindi abbiamo un passo cironferenziale, un passo normale e il passo dell'elica.

Passo elica: $p_e = \pi \cdot d / tg\beta$
Passo circonferenziale: $p_c = m_c \cdot \pi$
Passo normale: $p_n = p_c \cdot \cos\beta = m_n \cdot \pi$
Diametro primitivo: $d_p = m_c \cdot z$
Diametro esterno: $d_e = d_p + 2m_n$
Diametro interno: $d_i = d_p - 2 \cdot 1.25m_n$
Altezza del dente: $h = m_n + 1.25m_n = 2.25m_n$

19.3 Dentatrice Fellows

La dentatrice Fellows si caratterizza per avere l'utensile a forma di ruota dentata di modulo uguale a quella da costruire, ovviamente di materiale duro (HS) e dotato di angoli di spoglia.
Da notare che con questo tipo di utensile è possibile tagliare sia dentature esterne come dentature interne.



Utensile a coltello Fellows per ruote a denti diritti

Il moto di lavoro è rettilineo alternativo ed è posseduto dall'utensile. Se l'ingranaggio è elicoidale al moto rettilineo si sovrappone una piccola rotazione che dà luogo ad un moto rettilineo alternato elicoidale.
Il moto di generazione del profilo dei denti è realizzato dalla contemporanea rotazione

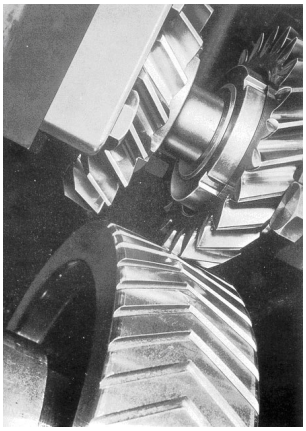
della ruota e dell'utensile.
Il moto di registrazione (penetrazione iniziale di tutta l'altezza del dente fino al contatto delle circonferenze primitive) è in genere posseduto dal pezzo.
Durante la corsa di ritorno l'utensile si allontana dal pezzo di alcuni decimi per evitare lo sfregamento contro la superficie lavorata.
La lavorazione ha temine quando il pezzo ha compiuto un giro completo

Moderna dentatrice Fellows a controllo numerico

Il tempo di lavoro può valutarsi con la formula:

$$t = \frac{7.5 \times m \times z \times c}{1000 \times V_t \times a}$$

dove:
- m è il modulo della ruota
- z è il numero dei denti
- c la corsa che fa l'utensile
- a l'avanzamento a corsa sul diametro primitivo (0.10-0.20mm/corsa)
- V_t è la velocità di taglio (Vt = 20-25 m/1' per acciai V_t = 50-60 m/1' per alluminio)



Dentatrice Fellows che esegue una ruota dentata tipo "Michelin" a doppia inclinazione

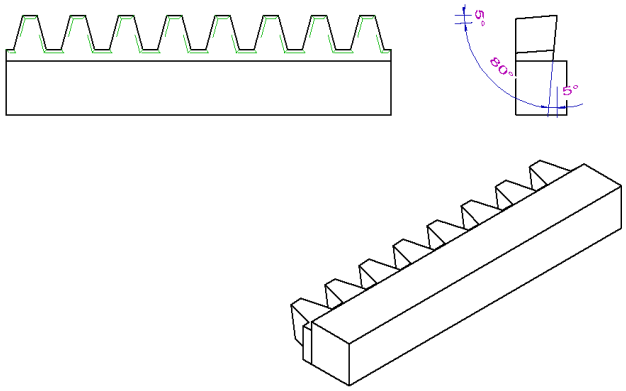
Esempio valutare il tempo per eseguire una ruota in acciaio C30 di modulo m = 3 mm, numero di denti z = 40, di spessore 30 mm.

Si stabilisce un extracorsa totale di 6mm, una velocità di taglio di 20 m/1', e un avanzamento di 0.12 mm/corsa, risulta:

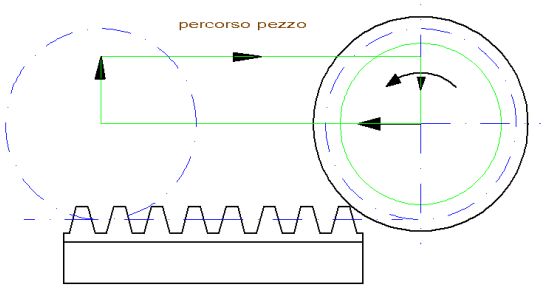
$$t = \frac{7.5 \times 3 \times 40 \times 36}{1000 \times 20 \times 0.12} = 13.5 \min$$

19.4 Dentatrice Maag

Si caratterizza perché l'utensile impiegato per ricavare i denti è costituito da una dentiera con un numero limitato di denti rettilinei che viene comunemente detto "pettine". Anche in questo caso con un pettine di determinato modulo si possono tagliare ruote di qualsiasi numero di denti purchè dello stesso modulo.



L'utensile possiede il moto di lavoro rettilineo alternativo e per la peculiarità dell'utensile può solo effettuare il taglio di dentature esterne.
Anche in questo caso il moto di registrazione porta a contatto la retta primitiva del pettine con la circonferenza primitiva della ruota, dopodiché la ruota inizia un lento movimento di roto-traslazione (rotolamento) durante il quale i denti del pettine penetrano nella ruota asportando il materiale che corrisponde ai vani della dentatura. Essendo il numero dei denti del pettine limitato (in genere inferiore a 10) è necessario al termine della sua corsa utile riportarlo indietro, dopo aver fermato la rotazione e disimpegnato la ruota , per un numero intero di passi. Quindi il ciclo ricomincia e la lavorazione termina quando la ruota ha effettuato un giro completo.

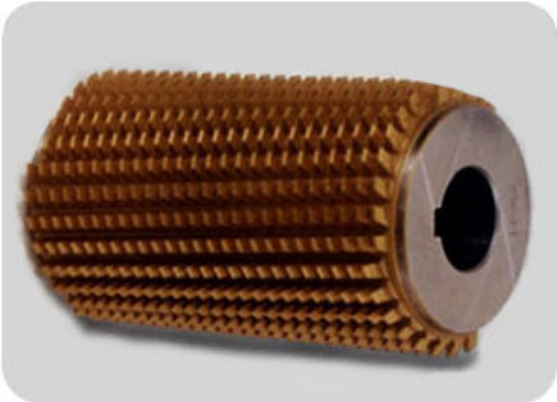


Il moto di stozzatura avviene in una sola delle 4 fasi del ciclo compiuto dal pezzo, cioè inizia quando è avvenuta la fase di accostamento.

19.5 Dentatrice a creatore Pfauter

Il taglio dei denti con creatore è basato sullo stesso principio del taglio a inviluppo, a differenza delle precedenti dentatrici il moto di lavoro (taglio) è rotatorio e non rettilineo alternativo.

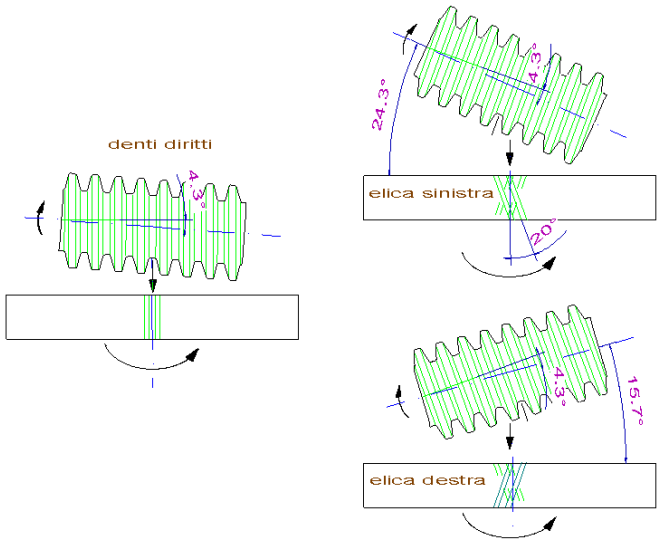
L'utensile denominato creatore è una fresa ricavata da una vite il cui filetto ha un profilo di tipo modulare il cui passo $p = \pi \cdot m$. Il materiale del creatore può essere metallo duro o acciaio HS in genere rivestito.



Le facce di taglio dei denti del creatore risultano dal taglio di canali elicoidali perpendicolari ai filetti, ossia inclinati dell'angolo della vite rispetto all'asse della stessa.
Il creatore ricava i denti della ruota ingranando con essa.
Se si tagliano denti diritti il creatore deve avere il proprio asse inclinato dell'angolo di inclinazione dell'elica, intorno al quale possiede il moto di lavoro. Contemporaneamente il creatore inizia la discesa con lento movimento di avanzamento.
La ruota da intagliare ruota ingranando con il creatore, quindi i suoi giri sono in relazione al rapporto di trasmissione. Se il creatore ha un solo principio fa z-giri mentre la ruota compie un giro (z è il numero dei denti sulla ruota).

$$R = \frac{i}{z} = \frac{n° \, principicreatore}{n° \, dentiruota}$$

Per dentare le ruote cilindriche a denti elicoidali, l'asse del creatore deve essere inclinato di un angolo pari alla somma delle inclinazioni delle due eliche se la dentatura è sinistra, pari alla differenza fra l'angolo dell'elica della ruota e l'angolo dell'elica del creatore se la dentatura è destra.



Con la dentatrice a creatore si possono eseguire le ruote dentate per viti senza fine. Questa lavorazione è assai diversa dalla classica, in quanto il creatore, se cilindrico, ha avanzamento solo radiale (a tuffo nella ruota) se, con imbocco conico, l'avanzamento è tangenziale alla ruota. In ogni modo il creatore deve essere eguale come diametro e modulo alla vite che dovrà ingranare con la ruota da costruire.

Velocità di taglio e avanzamenti per creatori in acciaio superrapido				
Materiale in lavorazione	Sgrossatura		Finitura	
	V_t (m/min)	a_a (mm/giro-ruota)	V_t (m/min)	a_a (mm/giro-ruota)
Acciaio R_m <700N/mm^2	30 - 40	0.8 – 1.2	40 - 60	0.3 – 0.8
Acciaio R_m >700N/mm^2	20 - 30	0.6 – 0.8	30 - 40	0.2 – 0.5
Ghisa HB < 180	40 – 50	0.6 – 1.2	50 – 60	0.3 – 0.6
Ghisa HB > 180	30 – 40	0.4 – 1.2	40 - 50	0.2 – 0.5
Bronzo e ottone	50 – 60	0.6 – 1.2	60 - 80	0.2 – 0.6
Leghe leggere	150 – 200	1.6 – 2.4	200 - 250	0.5 – 1.2

19.6 Tempo di macchina

La velocità di avanzamento del creatore nella sua discesa verso il basso è data:

$$V_a = a_a \times n_r = a_a \times \frac{n_c \times i}{z} \qquad \text{con}$$

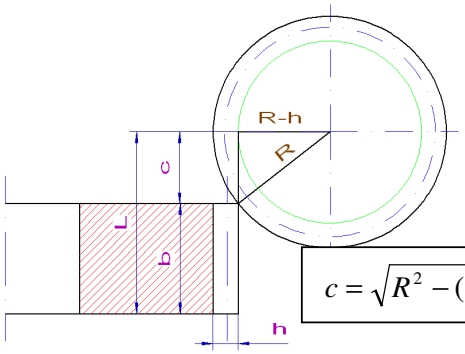
$$\frac{n_r}{n_c} = \frac{i}{z} = \frac{numero \cdot principi \cdot creatore}{denti \cdot ruota}$$

da cui:

$$t = \frac{L+e}{V_a} = \frac{(L+e)\times z}{a_a \times n_c \times i}$$

Esempio: valutare il tempo per eseguire una ruota in acciaio C30 di modulo m = 3 mm, numero di denti z = 40, di spessore 30 mm.

Creatore diametro 63mm n° dentature 9 a un principio i =1.



$$c = \sqrt{R^2 - (R-h)^2} = \sqrt{31.5^2 - (31.5 - 6.75)^2} = 19.5mm$$

L = b + c = 30 + 19.5 = 49.5 mm
Assumiamo: extracorsa e = 4.5 mm
Passata di sgrossatura V_t = 35 m/min a_a = 1.0 mm/giro ruota n_c =175 g/min
Passata di finitura V_t = 60 m/min a_a = 0.5 mm/giro-ruota n_c =300 g/min

Tempo sgrossatura $$t = \frac{(49.5 + 4.5) \times 40}{1.0 \times 175 \times 1} = 12.3 \min$$

Tempo finitura $$t = \frac{(49.5 + 4.5) \times 40}{0.5 \times 300 \times 1} = 14.4 \min$$

19.7 Finitura delle ruote dentate

La finitura delle ruote dentate è assai diversa a seconda dell'impiego dell'ingranaggio; ci sono situazioni di impiego che non richiedono nessuna finitura a seguito della dentatura, altre invece richiedono finiture più o meno accurate. Ad esempio ingranaggi per argani di sollevamento per cantieri non richiedono finitura, mentre le ruote di un cambio di velocità per auto richiedono non solo precisioni accurate ma anche silenziosità di ingranamento. Naturalmente ingranaggi che non richiedono prestazioni elevate in termini di precisione, velocità e rumorosità possono ottenersi direttamente da acciai bonificati, mentre per impieghi più sofisticati è consigliabile dentare lasciando un piccolo sovrametallo, eseguire il trattamento termico (in genere superficiale) e successivamente eseguire la finitura.

19.7.1 Sbarbatura o rasatura

Questa semplice operazione si fa per asportare le eventuali bave e per meglio rifinire il profilo del dente guadagnando anche silenziosità.
L'utensile sbarbatore ha la forma di una ruota dentata avente i fianchi dei denti intagliati da scanalature parallele che realizzano gli spigoli taglienti.

L'utensile ingrana con la ruota ad alta velocità con assi leggermente sghembi per creare lo sfregamento che asporta minuscoli trucioli e la lisciatura del pezzo. L'operazione si fa con abbondante lubrificazione e termina in pochi minuti si esegue prima del trattamento termico.

19.7.2 Rodaggio

Il rodaggio è un metodo semplice per ottenere una super finitura per una coppia di ruote che durante la loro vita ingraneranno sempre fra di loro quindi, nel caso una delle due si rendesse inutilizzabile, deve essere sostituita la coppia (esempio la coppia ipoidale nel differenziale dell'auto). Il metodo è adottato per trasmissioni veloci e riduce gli attriti e la rumorosità.
Il processo non asporta truciolo; si esegue facendo ingranare la coppia per alcuni minuti ad alta velocità e versando olio contenente in sospensione polvere abrasiva finissima sui denti che ingranano. La finitura corrisponde ad una lappatura.

19.7.3 Rettifica

Il sistema più impiegato è quello che utilizza due mole a disco che lavorano in contemporanea due fianchi del dente uno destro e uno sinistro su denti vicini. I fianchi attivi delle mole rappresentano i fianchi immaginari del dente con il quale ingrana la ruota da rettificare, quindi ruota e mole hanno movimenti di rotazione oscillante, le mole poi percorrono con moto parallelo all'asse la lunghezza dell'ingranaggio. Una variante a questo metodo è la raschiettatura in cui si aggiunge il moto di entrata e uscita delle mole a disco.
Questa lavorazione permette una più efficace lubrificazione dell'area di contatto.
L'operazione di rettifica si può eseguire anche con mole profilate e quindi con il metodo di inviluppo usato per il taglio ad esempio mole aventi la forma del creatore senza però l'intaglio dei denti. Le rettifiche sono previste di dispositivi automatici che provvedono a compensare il consumo e periodicamente a ricreare il profilo consumato con diamantatura.

MODULO 20 – La Rettificatrice

20.1 La rettifica

La rettifica è l'operazione mediante la quale si asporta materiale sotto forma di minutissimi trucioli da un pezzo, mediante un utensile abrasivo particolare detto "mola". L'operazione è particolarmente usata per lavorare i pezzi dopo il trattamento di tempra.
La mola è quindi costituita da un miscuglio di sostanza abrasiva più legante che ha il compito di fissare e tenere assieme i granelli di abrasivo.

20.2 Elementi caratteristici delle mole

- La forma della mola dipende dalla lavorazione a cui è destinata (mola a disco, a tazza cilindrica o conica, a bisello, etc.)
- Le dimensioni caratteristiche: diametro esterno, spessore e diametro del foro di attacco
- La specifica della mola che ne determina le caratteristiche: abrasivo, grana, durezza, struttura, agglomerante

20.2.1 Abrasivo

E' la sostanza fondamentale in quanto esercita direttamente l'azione di asportazione del truciolo. Alcuni abrasivi più comuni:

- naturali : diamante , corindone, quarzo, silice
- artificiali : diamante artificiale, ossido di alluminio (A-*alundum*), carburo di silicio (C-*carborundum*) , carburo di boro e nitruro di boro (CB-*borazon*)

20.2.2 Grana

E' la dimensione media dei grani componenti l'abrasivo. Misurandosi con un setaccio, più è alto il numero delle maglie più è fine la grana. E' evidente che le grane più fini sono indicate per finiture e le grane più grandi per sgrossature.

- molto grossa da 6 a 12
- grossa da 14 a 24
- media da 30 a 60
- fine da 70 a 120
- molto fine da 150 a 140
- finissima da 320 a 500

20.2.3 Durezza

La durezza non ha nessun rapporto con la durezza dell'abrasivo, ma misura la capacità dell'agglomerante a tenere più o meno i granelli di abrasivo. Una mola tenera è quindi una mola che cede più facilmente i granuli abrasivi, quindi è più indicata per lavorare materiali duri, mentre una mola dura che trattiene più a lungo i granelli abrasivi è indicata per lavorare materiali più dolci.

- molto tenere : D – E – F – G
- tenere : H – I – **J** – **K**
- medie : **L** – **M** – **N** – **O** **i**n neretto le più usate
- dure : **P** – Q – R – S
- durissime : T – U - W – Z

20.2.4 Struttura

E' la distanza media che intercorre fra i granuli abrasivi. La struttura può essere aperta (porosa) quando le distanze sono abbastanza elevate, la struttura è chiusa se i granelli sono assai ravvicinati. La struttura aperta si impasta meno e quindi riesce a scaricare meglio il truciolo. La struttura si esprime con un numero convenzionale:

- chiusa : da 1 a 4
- media : da 5 a 8
- aperta : da 9 a 12
- molto aperta: da 13 a 16
- superporosa: da 17 a 20

20.2.5 Agglomerante

E' il materiale che tiene assieme i granelli abrasivi e il modo con cui li circonda determina la porosità . Si distinguono tre gruppi di abrasivi:

- minerali : vetrificato (V), ceramico (V), silicato (S), magnesiaco (O)
- organici o resinoidi: gomma e gomma lacca (R)
- metallici : bronzo e lega bianca

La disgregazione dell'agglomerante che ovviamente è meno duro dell'abrasivo, determina nel tempo delle superfici della mola leggermente irregolari per cui si ricorre alla *diamantatura* che consiste nel far sfregare la mola in rotazione contro una bacchetta metallica alla cui estremità è incastonato un diamante artificiale. In questo modo si ricreano anche profili complessi seguendo il percorso di una sagoma tramite un copiatore.

Esempio di classificazione di una mola: **32 A 46 M 6 V**
Mola con: 32 tipologia dell' abrasivo indicazione facoltativa del costruttore, A abrasivo in Alundum (ossido di alluminio), grana 46 (media), durezza M (media) struttura 6 (media), agglomerante V (vetrificato)

20.3 Generalità sulle macchine

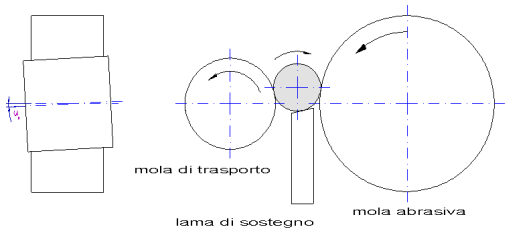
Oggi le rettificatrici sono a controllo numerico e in genere universali per gestire al meglio tutte le lavorazioni e i rispettivi movimenti. Il grado di automazione viene scelto in base alle necessità dell'utilizzatore, comunque il sistema controlla tutti gli assi, la gestione delle velocità della mola e del pezzo in base alle dimensioni, la programmazione degli avanzamenti e la diamantatura della mola secondo il profilo richiesto.

Rettificatrice per esterni

Un tipo particolare di rettificatrice è la rettifica senza centri, particolarmente usata nelle lavorazione in serie di pezzi cilindrici, comunque a diametro costante anche se con presenza di gole. La particolarità della lavorazione è l'assenza di punte da centro per sostenere il pezzo che risulta libero assialmente.
Si distinguono: la mola abrasiva che compie il lavoro di rettifica ; la mola di trasporto posta di fronte alla mola abrasiva; la lama che sostiene il pezzo in lavorazione permettendogli la rotazione e lo spostamento.

Rettificatrice senza centri

Nell'operazione di rettifica, il pezzo avanza fra la mola operatrice e la mola di trascinamento entrando da un lato della zona di lavoro ed uscendone dal lato opposto. Il pezzo ruota e si sposta contemporaneamente in senso longitudinale, scorrendo sulla lama.
Lo spostamento longitudinale del pezzo è ottenuto inclinando la mola di trasporto usualmente di 2-3°. Se i gradi sono più elevati maggiore risulta la velocità di avanzamento del pezzo.
L'asportazione del materiale avviene progressivamente durante l'avanzamento assiale del pezzo.



20.4 Parametri tecnologici di lavorazione

Nella tabella seguente forniamo alcune utili indicazioni sulle scelte dei parametri di taglio, la lettera **b** indica la larghezza della mola

Velocità, avanzamenti e prof. di passata nella rettificatura						
Rettifica cilindrica						
Materiale del pezzo	Velocità di rotazione del pezzo (m/1')		Profondità di passata (mm/corsa andata e ritorno)		Avanzamento assiale (mm/giro pezzo)	
	sgrossatura	finitura	sgrossatura	finitura	sgrossatura	finitura
Acciaio	9-12	12-14	0.01-0.04	0.001-0.01	$\cong \frac{1}{4}b$	$\cong \frac{2}{3}b$
Ghisa	14-16	16-18	0.02-0.06	0.01-0.02	$\cong \frac{3}{4}b$	$\cong \frac{2}{3}b$
Leghe alluminio ottoni - bronzi	16-20	20-25				
Rettifica piana						
	Velocità di avanzamento longitudinale			Profondità di passata		
Acciai/ghise	5-30 m/1'			0.01-0.06		
Materiali non ferrosi	10-40 m/1'					

Come detto in precedenza la velocità massima della mola è prescritta dal costruttore ed è indicata sulla etichetta, di seguito diamo alcuni valori indicativi per tali velocità ricordando che solo per questa macchina utensile le velocità sono espresse in m/sec

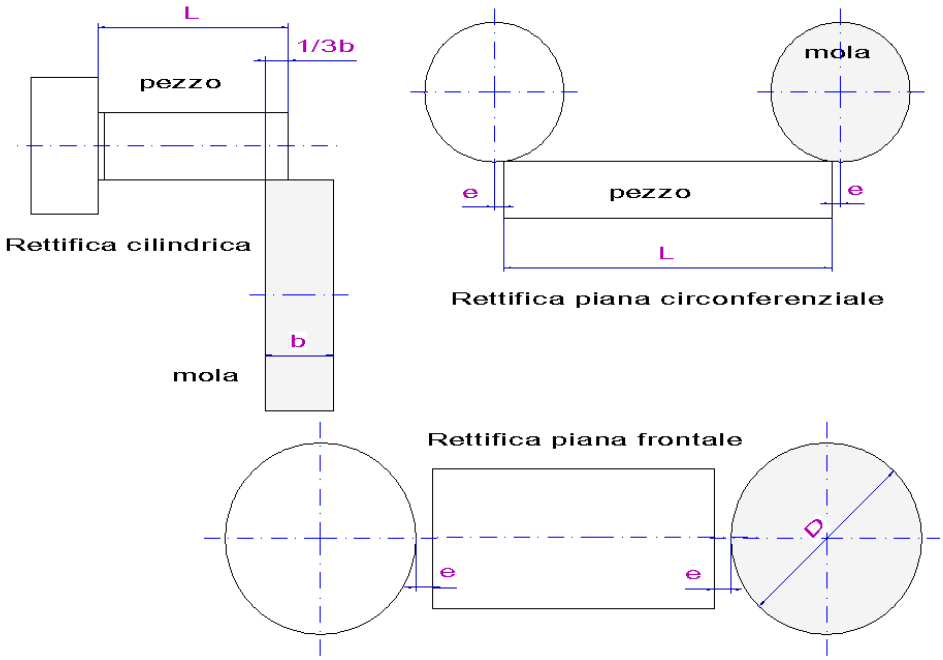
- agglomerante magnesiaco o silicato 20 m/sec mole di forma 15 m/sec
- agglomerante ceramico (ossido di alluminio) 25 m/sec mole di forma 20 m/sec
- agglomerante a base di resine sintetiche 30 m/sec mole di forma 25 m/sec

20.5 Tempi di lavorazione:

Rettificatura cilindrica:

$$T = K \times \frac{L - \frac{1}{3}b}{a \times n_p}$$

ove K sono le passate totali $K = 2\frac{h}{a_r} = \frac{sovrametallo}{avanzamentoradiale}$



Rettificatura piana circonferenziale:

$$T = K \times \frac{L + 2e}{V_a}$$ ove K sono le passate totali $K = 2\frac{h}{a_r} = \frac{sovrametallo}{passata}$

Rettificatura piana frontale:

$$T = K \times \frac{L + D + 2e}{V_a}$$ ove K sono le passate totali $K = 2\frac{h}{a_r} = \frac{sovrametallo}{passata}$

MODULO 21 – *Lavorazioni non convenzionali*

21.1 Generalità

Sono quelle lavorazioni in cui l'asportazione del truciolo avviene non nella maniera classica cioè per via meccanica attraverso un utensile più duro del materiale in lavorazione, ma attraverso lo sfruttamento di altre fonti energetiche come la termoelettrica, l'elettrochimica e la chimica.

21.2 Taglio ad acqua

Il **taglio a getto d'acqua** è una tecnologia di taglio che utilizza un getto d'acqua ad altissima pressione (fino a 7000 bar) per tagliare numerose tipologie di materiali

21.2.1 Waterjet

Il taglio waterjet abrasivo e ad acqua pura sta guadagnando la popolarità come utensile per tagliare una ampia varietà di materiali. Facilità di programmazione, costi contenuti di taglio e la possibilità di tagliare pressoché tutti i materiali da pochi decimi di millimetro fino a spessori di 250 mm con precisione del decimo di millimetro ne ha fatto una macchina essenziale per numerose tipologie di aziende per diverse applicazioni.

21.2.2Taglio ad acqua pura

Il taglio a getto d'acqua trova applicazione anche nel campo alimentare, naturamente senza l'utilizzo di abrasivo, tagliano quindi con l'utilizzo di sola acqua. La tecnologia a idrogetto è in grado di tagliare qualsiasi tipo di materiale, con spessori fino a circa 150 mm (15 cm), con un'elevata precisione di taglio (dell'ordine di 1/10 di mm per spessori fino a 40 - 50 mm). Il taglio ad acqua non provoca alcuna alterazione fisica o deformazione meccanica del pezzo e consente di tagliare materiali di spessore non uniforme e materiali compositi o stratificati. La larghezza del solco di taglio è molto contenuta permettendo di ottenere la minima quantità di materiale asportato. L'idrogetto consente il taglio di materiali preverniciati e/o rivestiti con pellicola di protezione inoltre le superfici originate dal taglio presentano poche sbavature.

La tecnologia a idrogetto può tagliare tutti i materiali che il taglio a Laser non sarebbe in grado di tagliare senza danneggiare (gomma, sughero, pelle, cuoio, materiali espansi, plastica, legno, fibre di carbonio, ecc.) fino a spessori di 200 mm.

Altri materiali lavorabili sono: titanio, ottone, rame, acciaio inossidabile, alluminio, vetro, marmo, ceramica, ecc...

Aggiungendo sostanze abrasive all'acqua è possibile tagliare spessori maggiori o materiali più duri con maggior velocità. L'abrasivo che solitamente si usa è una sabbia speciale.

21.2.3 Caratteristiche del taglio

Il taglio a getto d'acqua è un taglio a freddo, quindi non altera le caratteristiche chimico fisiche del materiale tagliato. È possibile tagliare forme in 2D di qualsiasi sagoma con precisioni di ± 0,1 mm con macchine utensili dette a "3 assi" (denominati x,y,z solitamente). Si possono inoltre utilizzare robot (5 o più assi) per tagliare materiali in tridimensionale come per esempio caschi, interni auto, lavorazioni speciali nel campo dell'areonautica e molto altro ancora.

21.3 Lavorazioni con il laser

Il Laser (acronimo di Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) è un dispositivo in grado di generare un tipo di luce essenzialmente diversa da quella emessa dalle comuni sorgenti luminose. Le sue caratteristiche sono:

- monocromaticità (radiazioni aventi la stessa lunghezza d'onda)
- direzionalità (le radiazioni si propagano in un'unica direzione)
- coerenza (le radiazioni hanno tutte la stessa fase)

Queste caratteristiche consentono di concentrare, con un sistema ottico, l'energia della luce Laser su una piccolissima superficie di un pezzo da lavorare, ottenendo condizioni di riscaldamento locali assai intense in funzione della potenza concentrata.
Ad esempio una potenza di 2Kw è capace di generare un flusso termico tale da far fondere o volatizzare in breve lasso di tempo qualsiasi materiale.

21.3.1 Applicazioni industriali

Senza entrare nei dettagli della produzione del laser che non è compito di questo corso, vediamo invece le applicazioni. I laser sono da intendere come sorgenti di luce di elevata qualità o come sorgenti di energia termica e quindi vengono impiegati nei rispettivi campi. Come sorgenti di luce trovano impiego nei sistemi ottici e quindi per allineamento di piani, misure di precisione. Ad esempio le macchine utensili a CNC possono essere dotate di un sistema di misurazione laser per il presetting degli utensili.

Nell'ambito dell'industria meccanica, vengono in genere usati laser a CO_2 più indicati per impieghi di potenza e si possono effettuare taglio, saldatura e trattamenti termici localizzati.

La foratura e il taglio

La foratura è stata la prima applicazione industriale del raggio laser. I vantaggi sono la possibilità di lavorare qualsiasi materiale anche i materiali più ostici come ceramica, pietre dure, diamante etc; la possibilità di ottenere fori anche piccolissimi e con elevato rapporto profondità-diametro; possibilità di forare in posizioni difficili purchè visibili.
Oggi esistono macchine a CNC che realizzano ad esempio su profili tubolari e/o tubi non solo fori, ma anche asole, tagli diritti e inclinati sulle varie facce, sagomature, iscrizioni avendo il controllo sia sul mandrino come posizione angolare e fuori uscita del pezzo, sia spazialmente sul laser, quindi cinque assi controllati. La lavorazione è rapida e precisa ed è diventata veramente competitiva in lavori di media serie rispetto alle lavorazioni effettuate in modo più o meno tradizionale.

Per il taglio delle lamiere le macchine sono leggermente più semplici, ma altrettanto efficaci nel realizzare rapidamente tagli e sagomature di qualsiasi forma grazie al CNC e con grande rapidità di esecuzione. Le macchine sono silenziose, il processo è pulito, il taglio non è influenzato dalle proprietà del materiale e avviene in atmosfera ambientale.

Queste applicazioni hanno avuto più diffusione rispetto ai procedimenti di saldatura e di trattamento termico superficiale e quindi anche i costi delle macchine che inizialmente erano assai elevati adesso hanno valori più accessibili. Comunque essendo le macchine costose, avendo costi di esercizio non trascurabili e risultando comunque veloci hanno trovato

diffusione presso i "terzisti" cioè soggetti che lavorano per conto di altre aziende in quanto solo così riescono ad avere volumi di produzione che consentono tempi di ammortamento più brevi e costi inferiori per ridotti tempi di fermo macchina.

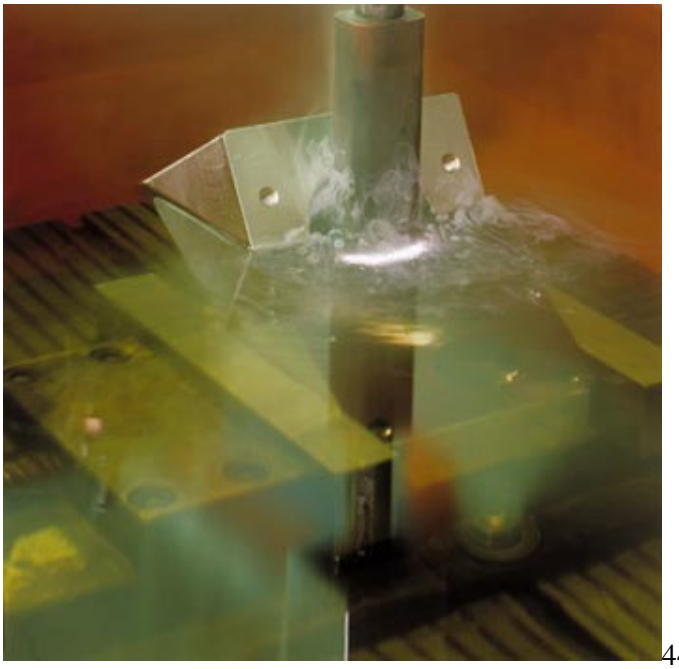
Nella saldatura il laser viene preferito quando si debbono eseguire saldature di elementi molto sottili anche di natura diversa.

21.4 Lavorazioni col plasma

Nelle lavorazioni con il plasma un gas (azoto, argon, idrogeno, ma anche acetilene) viene tramite fatto passare attraverso un arco elettrico dove si ionizza e raggiunge temperature intorno a 15000°C. Questo gas (plasma) viene proiettato sul pezzo, con velocità fra 200 e 2000m/sec determinando la fusione e l'evaporazione della superficie colpita. Le miscele gassose di argon e idrogeno sono le migliori per ottenere un plasma di buona qualità in grado di eseguire un taglio di buona finitura fino a spessori di 15mm; si possono eseguire comunque tagli fino a 100mm di spessore. Le lavorazioni con plasma sono in genere automatizzate e molto usate nel taglio di lamiere. Il processo ha scarsi effetti sulle caratteristiche metallurgiche e fisiche del metallo a causa della rapidità della operazione.

21.5 Lavorazioni con elettroerosione EDM (Electrical Discharge Machining)

L'elettroerosione è un processo capace di asportare materiale da qualsiasi metallo anche se molto duro con buona precisione dimensionale del pezzo finito. Il principio è l'utilizzazione di una corrente elettrica per erodere il pezzo senza la necessità del contatto fisico con l'utensile. E' evidente che con tale metodo si possono lavorare *solo* i materiali conduttori di elettricità.
L'asportazione del materiale è dovuta a tante scariche che si succedono con continuità tra l'elettrodo-utensile, avente la forma idonea a riprodurre la cavità richiesta nel pezzo, e il pezzo stesso. L'elettrodo-utensile non venendo a contatto col materiale può essere realizzato anche in materiale tenero facilmente plasmabile come l'ottone.
Nella zona di lavoro sia il pezzo che l'utensile sono immersi in un fluido avente lo scopo di operare come dielettrico, allontanare le particelle di metallo eroso dal pezzo, mantenere costante la resistenza al flusso di corrente e raffreddare l'elettrodo-utensile.

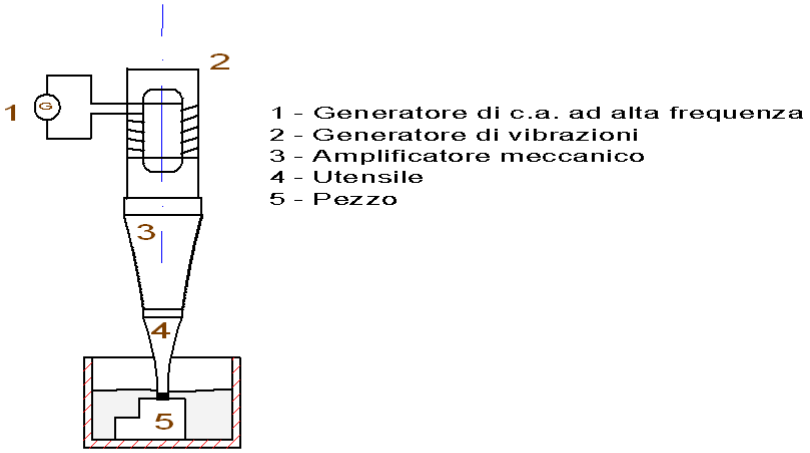


Il dielettrico deve avere una tensione di cedimento sufficientemente bassa da permettere alla scarica elettrica tra utensile e pezzo di perforarlo facilmente. Sono usati cherosene, olio per trasformatori, acqua distillata ma anche aria compressa.
L'asportazione del materiale provoca un aumento della distanza tra l'elttrodo-utensile e l'elettrodo- pezzo e quindi varia la tensione necessaria a far scattare la scarica, è necessario perciò avere un controllo CNC che mantiene l'ideale distanza per la prosecuzione del processo.
Ricordiamo che l'elettroerosione non provoca sforzi di taglio quindi il pezzo è semplicemente appoggiato.
Le principali applicazioni dell'elettroerosione sono produzione di punzoni e matrici per la

forgiatura dei metalli, produzione di particolari in tungsteno, realizzazioni di fori o cavità complesse, lavorazioni di materiali ad alte resistenza ed elevaa durezza. La lavorazione non lascia bave, opera con tolleranze +/- 0.015 mm.
Oltre alle macchine che operano *a tuffo* come quelle descritte vi sono quelle *a filo (WEDM)* dove l'elettrodo è costituito da un filo conduttore continuo. La scarica avviene lungo il filo per il tratto in cui esso è impegnato nel pezzo in lavorazione e dal quale è separato dal gap che controlla di fatto la tensione a cui avviene la scarica. Il filo si svolge da un aspo e dopo un percorso che segue anche un profilo complesso torna ad avvolgersi su un rocchetto. La lavorazione a filo riduce i costi dell'utensile, permette di seguire percorsi anche complessi , permette tolleranze ancor più precise e rugosità paragonabili a rettifiche accurate, ma il procedimento è assai più lento dell'elettroerosione a tuffo.

21.6 Lavorazioni con ultrasuoni

Come già visto nel modulo degli esami non distruttivi, gli ultrasuoni sono onde acustiche la cui frequenza supera la soglia uditiva dell'orecchio e si colloca fra 16 KHz e 1000 MHz.
La lavorazione con gli ultrasuoni determina l'asportazione del materiale mediante l'azione di granelli abrasivi in sospensione liquida proiettati contro il pezzo in lavorazione da un utensile che vibra con piccola ampiezza (~0,1 mm) ad alta frequenza (~20-30 KHz) in direzione perpendicolare alla superficie del pezzo. Queste tecniche permettono di eseguire forature di forma qualsiasi nei materiali duri e fragili, forature che sarebbe impossibile ottenere con processi convenzionali.



La figura illustra il generatore a *magnetostrizione* costituito da un pacco lamellare di Nichel, Cobalto leghe Ni-Co, avente la proprietà di subire vibrazioni forzate se sottoposto a polarizzazione magnetica indotta dalla corrente alternata ad alta frequenza in risonanza con le oscillazioni del campo eccitante.
Sono molto usati oggi i sistemi a *elettrostrizione* basati sull'effetto piezoelettrico: alcuni materiali cristallini come ad esempio il quarzo vengono posti in vibrazione sotto l'azione di un campo elettrico generato da una corrente alternata ad alta frequenza. Tali vibrazioni sono nell'ordine di grandezza di 4-5 μm troppo piccole per essere utilizzate sull'utensile, quindi necessitano di essere amplificate mediante un amplificatore meccanico, in genere di forma esponenziale, fino a valori di 50-100 μm alla estremità dell'utensile

L'utensile di forma allungata termina con una placchetta indurita di forma e dimensioni corrispondenti alla lavorazione da eseguire immersa in un liquido in cui si trovano in sospensione particelle abrasive durissime come Carburo di Boro. L'utensile non attacca direttamente il pezzo ma viene avvicinato allo stesso in modo tale che con le proprie vibrazioni (20-30 Khz) proietta le particelle abrasive contro il pezzo incidendo lentamente e progressivamente la superficie e facendogli assumere la forma dell'utensile.

MODULO 22 - *Metallurgia delle polveri*

22.1 Generalità

La metallurgia delle polveri consente di ottenere pezzi finiti o semilavorati mediante un procedimento che consente l'unione di particelle solide senza raggiungere la temperatura di fusione dei costituenti attraverso le fasi di

1. produzione delle polveri
2. compattazione
3. sinterizzazione
4. eventuale processo di finitura

La fase più importante e caratterizzante del ciclo è la sinterizzazione,; di questa esistono più tecniche anche non utilizzanti la pressione, ma per i nostri obiettivi faremo riferimento al processo tradizionale.

22.2 Le polveri

Le polveri metalliche vengono ottenute con varie tecniche, una delle più comuni è per riduzione dei relativi ossidi e successiva macinazione. La dimensione delle polveri espressa come granulometria viene determinata attraverso passaggi su una serie di stacci costituiti da reti formate da fili finissimi equidistanti che si incrociano a 90° e misurando la percentuale di polvere che rimane su ciascun staccio. Le polveri possono avere dimensioni da pochi μm a centinaia di μm e come noto hanno dimensione e forma dissimile fra di loro. Le polveri prodotte devono essere tenute in contenitori sotto vuoto o in atmosfera inerte o riducente per impedire l'ossidazione superficiale delle particelle.

22.3 Compattazione o pressatura

Dopo aver eseguito l'eventuale miscelazione quando richiesta, ad esempio nella fabbricazione delle placchette per utensili, si procede alla compattazione. Questa operazione trasforma la polvere incoerente in un pezzo dalla forma definita con una resistenza al verde sufficiente alla manipolazione che precede la sinterizzazione. La tecnica più usata è la pressatura in matrice. La pressatura è rapida e comunque la forma dei pezzi, in genere di piccole dimensioni, deve essere tale da consentire l'estrazione dallo stampo dopo la

compattazione. Le pressioni sono elevate dell'ordine di 500 Mpa che richiedono presse molto potenti e quindi il processo è indicato nelle lavorazione di pezzi in medio-grande serie.

22.4 Sinterizzazione

E' il processo termico eseguito a temperatura inferiore a quella di fusione del metallo che determina la formazione di legami stabili fra le superfici adiacenti delle polveri, in sostanza microsaldature localizzate. In seguito a questi effetti il pezzo acquisisce resistenza meccanica ed è in grado di sopportare anche notevoli sollecitazioni.
La temperatura di sinterizzazione è 2/3 – ¾ della temperatura di fusione del materiale se unico oppure, se miscele di polveri, della temperatura di fusione del metallo presente in percentuale maggiore. Oltre ala temperatura è importante la durata del trattamento che varia a seconda dei metalli da 10 a 60 min, con eccezione del tungsteno che richiede tempi assai più lunghi.
Per migliorare le caratteristiche dei pezzi sinterizzati si possono eseguire gli stessi trattamenti termici previsti per il materiale costituente le polveri.