C A P I T O L O 3

F R E S A T U R A

Nelle lavorazioni di fresatura (fig.3.1), il moto di taglio è rotatorio ed è posseduto dall'utensile, detto fresa; il moto di alimentazione è rettilineo ed è generalmente posseduto dal pezzo.

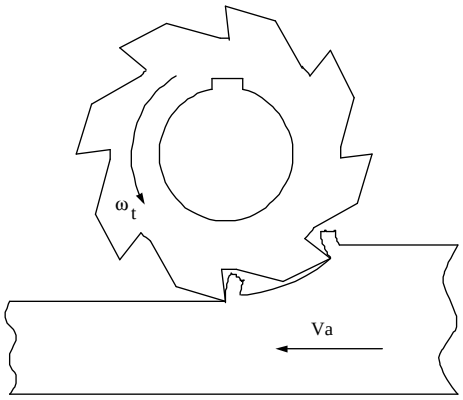


Fig. 3.1

Le macchine utensili che realizzano questa lavorazione vengono dette fresatrici. Esse si adoperano per la lavorazione di superfici esterne (fig. 3.2 a,b,c,f), per ricavare delle scanalature (d, e, g, h) e per la sagomatura (fig.3.3). Con le fresatrici è altresì possibile lavorare superfici di rivoluzione, tagliare filettature e ruote dentate.

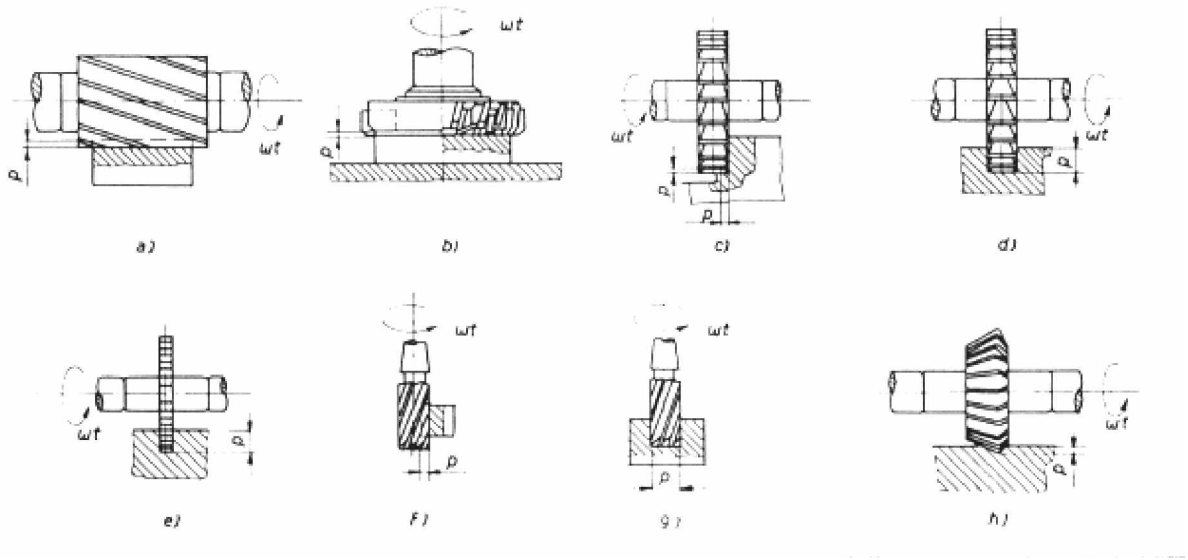


Fig.3.2. Esempi di fresature: a), b), f) spianatura; c) fresatura a gradino; d), e), g), h) scanalatura.

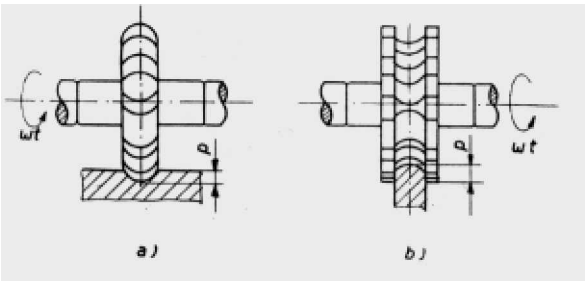


Fig.3.3. Fresatura di superfici concave (a) e convesse (b).

3.1. FRESE

La fresa è un utensile politagliente che ha la forma di un solido di rivoluzione con gli elementi taglienti, chiamati denti, disposti sulla superifcie laterale oppure su questa e su una o entrambe le basi.

Le frese possono essere interamente costituite di materiale da utensile oppure possono avere i taglienti riportati. Queste ultime sono ormai gli utensili più diffusamente impiegati perché consentono una elevata produzione, conducono a superfici lavorate ottimamente rifinite, tanto da eliminare in molti casi le successive operazioni di rettificatura, permettono di lavorare materiali ad elevata resistenza e, in ultima analisi, perché comportano minori costi di produzione.

La figura 3.4 riassume i tipi di frese di più comune impiego. Da a ad e vengono dette frese con foro; da f ad i, frese con codolo.Tranne alcuni casi particolari, quasi tutte le frese sono a denti elicoidali e non diritti, per conferire continuità di azione all'utensile.

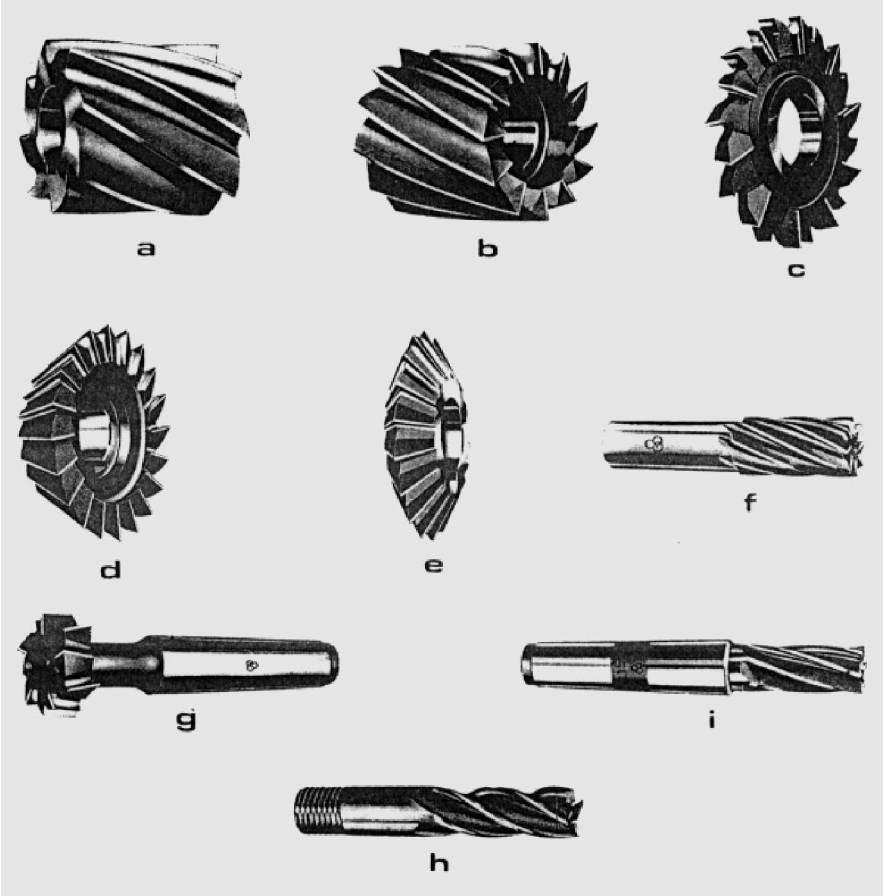


Fig.3.4. Alcuni fra i più comuni tipi di frese. a) cilindrica; b), f), g), h), i) cilindrico frontale; c) a disco a tre tagli; d) piano conica; e) conica simmetrica.

Come si vede, è stata fatta una classificazione in base al tipo di attacco dell'utensile alla macchina ed in base alla particolare lavorazione da eseguire. Se ci si riferisce infatti alla figura precedente, si comprende facilmente come, ad esempio, per fresare una guida a coda di rondine si debba adoperare una fresa piano-conica appositamente costruita; per ricavare una scanalatura diritta si deve impiegare una fresa a disco e così via.

I modi di classificare le frese non si limitano tuttavia a quello esposto. La nostra Unificazione, ad esempio, fa riferimento anche alle caratteristiche costruttive delle frese da impiegare a seconda del materiale da lavorare. Ad ogni esecuzione della fresa, individuata dalle lettere N per gli acciai comuni, D per materiali duri e T per materiali teneri, corrisponderanno valori consigliati dei più importanti parametri geometrici (angoli caratteristici dei taglienti, angolo di inclinazione dell'elica, numero di denti, ecc.), sui quali del resto è lasciata ampia facoltà di scelta al costruttore.

Un altro modo di classificare le frese consiste nel far riferimento al profilo che presenta il dente in una sezione della fresa fatta con un piano normale al suo asse. Potremo così dividere le frese in due grandi categorie:

frese con profilo rettilineo
frese con profilo curvilineo

Le prime (fig.3.5 a) presentano la faccia ed il dorso piani; nelle seconde (fig.3.5 b) solamente il petto si presenta a superficie piana, mentre il dorso ha la forma di una spirale logaritmica. Le prime vengono chiamate anche frese a denti di sega, frese fresate, per il modo in cui sono costruite, oppure frese generiche. Le seconde si indicano anche col nome di frese a profilo costante, frese spogliate, per il modo in cui sono costruite, oppure frese di forma.

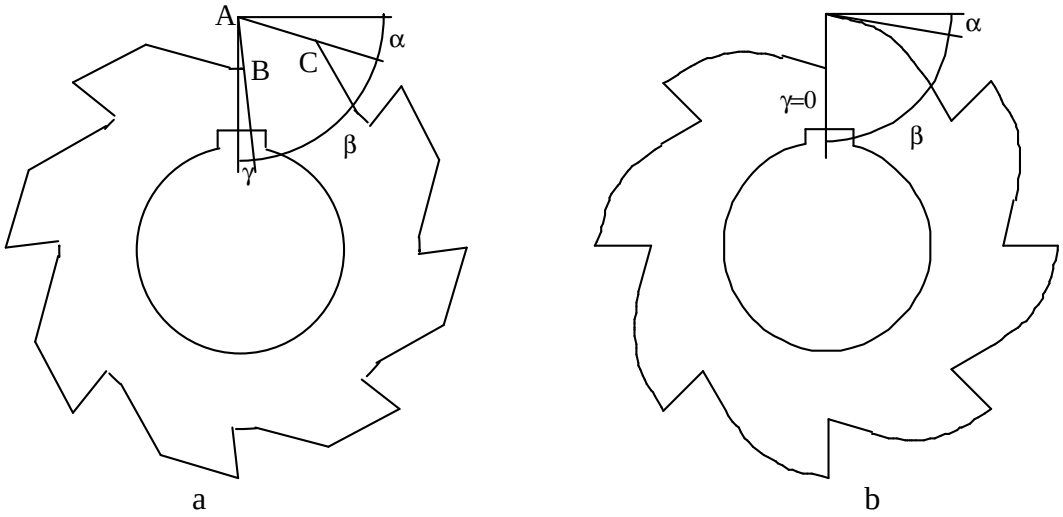


Fig. 3.5. (a) fresa a profilo rettilineo; (b) fresa a profilo curvilineo.

Come ripetutamente si è fatto notare, la fresa è un utensile politagliente, cioè ogni dente può essere riguardato come un utensile singolo cui competono i soliti angoli di spoglia superiore, inferiore e di taglio. Come tutti gli altri utensili, avrà altri angoli caratteristici che dipendono dalla forma geometrica che esso assume, come ad esempio l'angolo di inclinazione dell'elica, l'angolo di semiapertura del cono nel caso di frese ad angolo, ecc.

Gli angoli α, β e γ meritano invece una trattazione meno superficiale rivestendo, come è ormai noto, una grande importanza nella asportazione di truciolo.

Per individuarli, si seziona l'utensile con un piano normale all'asse di rotazione (ovvero normale al tagliente); si possono presentare due possibilità a seconda che si tratti di una fresa a profilo rettilineo o di una fresa a profilo curvilineo.

Nel primo caso (fig.3.5 a) l'angolo di spoglia superiore γ sarà formato dal raggio della circonferenza descritta dalla traccia A del tagliente principale con la traccia AB del petto dell'utensile; l'angolo di spoglia inferiore α sarà formato dalla tangente alla circonferenza descritta dal punto A con la traccia AC del dorso del dente; l'angolo di taglio β sarà, al solito, il complemento a 90° dei primi due. La tabella 11.I riporta i valori consigliati dell'angolo di spoglia superiore in funzione del materiale da lavorare.

Tab. 11.I Angoli di spoglia	Materiale da utensile	
Materiale da fresare	acciaio rapido	carburo
Acciaio (R<600 MPa)	20°	15°
Acciaio (500<R<1000 MPa)	15°	+5° ÷ -5°
Acciaio (R>1000 MPa)	10° ÷ 12	-10° ÷ -15°
Ghisa	5° ÷ 15°	+5° ÷ -5°

Negli utensili a spoglia curvilinea l'angolo di spoglia superiore γ sarà ancora formato dal raggio della circonferenza descritta dal punto A con la traccia AB del petto dell'utensile. C'è da osservare tuttavia che, nella quasi totalità dei casi, queste frese si costruiscono con angolo di spoglia superiore nullo, essenzialmente per motivi di affilatura; nel seguito pertanto questi utensili saranno sempre disegnati con $\gamma = 0$.

L'angolo di spoglia inferiore α sarà formato dalla tangente alla circonferenza nel punto A e della tangente, nello stesso punto, alla curva che rappresenta il dorso del dente. Come sempre, l'angolo di taglio β sarà il complemento a 90° dei primi due.

Le frese a profilo rettilineo e quelle a profilo curvilineo si sogliono definire anche, come già detto, rispettivamente frese generiche e frese di forma. Nelle prime, dopo successive affilature, si modifica il profilo frontale di ogni singolo dente, mentre nelle seconde lo stesso profilo rimane inalterato. A questa differenza è dovuta la diversa denominazione di due utensili.

Si consideri infatti una fresa generica e si supponga che uno dei denti abbia subito un danno come indicato nella fig. 3.6. L'affilatura dell'utensile, necessaria per ripristinarne la funzionalità, dovrà essere effettuata in modo da conservare la costanza degli angoli caratteristici. L'unico metodo che la garantisce è il seguente

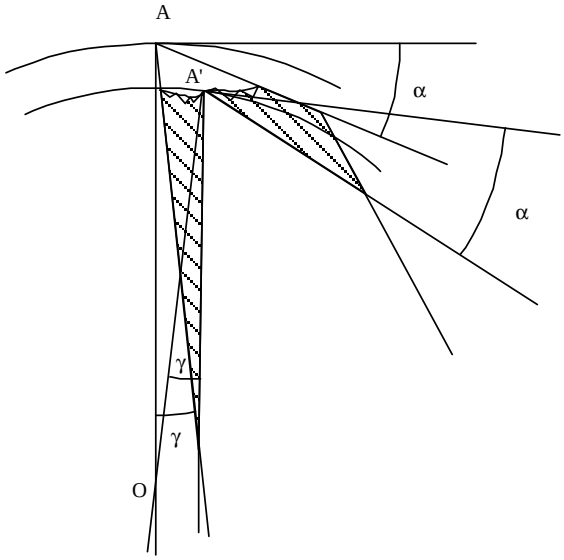


Fig. 3.6.

Si sceglie un punto A' che non giace sul dorso del dente, si congiunge A' con O e si stacca un angolo pari a γ; sempre da A' si conduce una semiretta che formi con la tangente alla circonferenza di raggio CA' un angolo α. Si è così raggiunta la condizione di uguaglianza degli angoli della sezione normale prima e dopo una operazione di affilatura. Così facendo però si è dovuto intervenire sul dorso del dente, il che comporta una variazione del profilo frontale, come si può vedere dalla fig. 3.7.

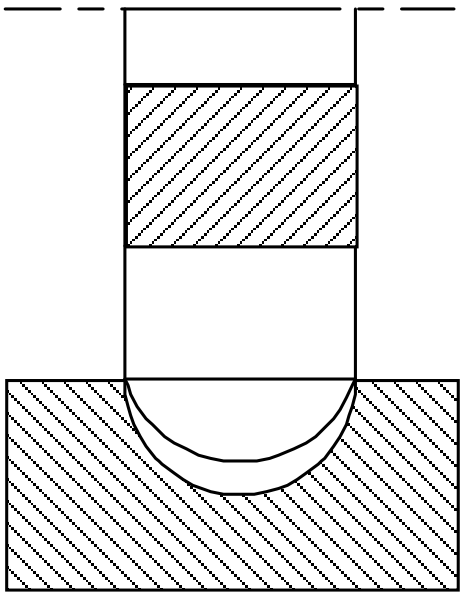


Fig. 3.7.

In conclusione si comprende facilmente come le frese a profilo rettilineo non possono essere impiegate quando, ad esempio, su un pezzo si voglia realizzare un solco dai contorni ben definiti, ma trovano applicazione solo per fresatura generica; di qui il loro nome.

Se, d'altra parte, si vuole conservare inalterato il profilo del petto del singolo dente anche dopo successive affilature, bisognerà ricercare una geometria della sezione normale dello stesso che consenta di asportare materiale, durante l'affilatura, esclusivamente sul petto, senza toccare in alcun modo il dorso, pur conservando la costanza degli angoli caratteristici.

A questi requisiti risponderà quel dente il cui dorso è sagomato secondo un arco di spirale logaritmica.

L'equazione in coordinate polari di questa curva è

$$R = C \cdot e^{\theta tg\alpha} \tag{3.1}$$

dove:

R = raggio vettore

θ = argomento

α = angolo formato dalla normale a R con la tangente alla curva

C = costante.

Come si vede le variabili nella (3.1) sono R e θ ma non α e quindi si può affermare che la spirale logaritmica gode della proprietà che ogni raggio vettore forma con la tangente alla curva un angolo costante. Se al dente di una fresa si fa assumere il profilo curvilineo a spirale logaritmica (fig. 3.8), si può affilare la fresa solamente sul petto, spostandosi cioè su un altro raggio vettore; in tal modo si è certi che l'angolo di spoglia inferiore α resta costante. In conclusione, non essendo intervenuti sul dorso del dente, resta inalterato il suo profilo frontale e quindi la forma del vano che si vuole creare sul pezzo rimane perfettamente conservata.

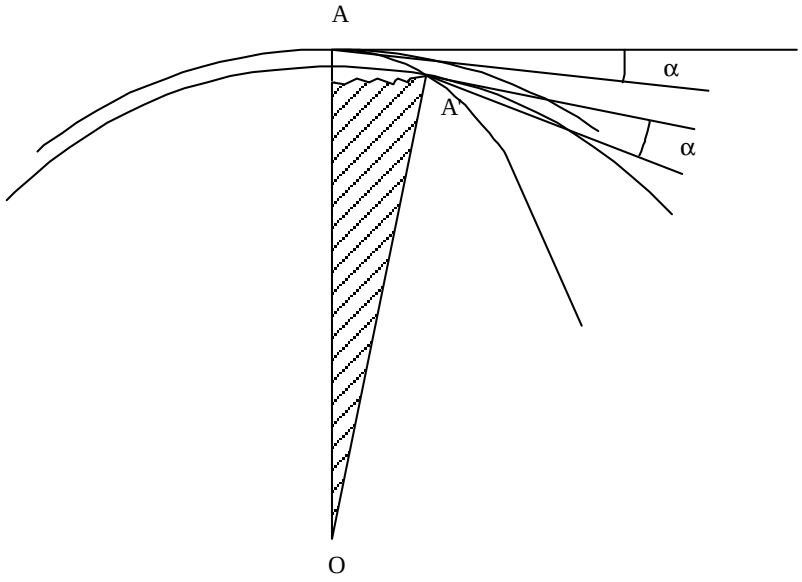


Fig. 3.8

Si comprende anche a questo punto il motivo per cui le frese di forma si costruiscono con l'angolo di spoglia superiore γ uguale a zero. E' comodo infatti, ma non necessario, disporre la mola di affilatura secondo un piano passante per l'asse della fresa e quindi contenente un raggio vettore, con il che risulterà sempre $\gamma = O$.

Questa condizione limita le possibilità di impiego degli utensili di forma ad operazioni di finitura, giacché il valore nullo di γ non consente gli elevati spessori di truciolo richiesti in sgrossatura. Inoltre, a parità di usura del dente, il volume globalmente asportato in una affilatura, nonostante le apparenze, risulta decisamente superiore che nel caso di fresa generica; ciò fa naturalmente diminuire la durata complessiva dell'utensile[1].

La tab. 11.II riporta la quantità di truciolo asportata in una operazione di affilatura su un singolo dente in funzione del tipo di fresa.

Tab. 11.II			
Tipo di fresa			Sovrametallo asportato in una riaffilatura (mm)
in acciaio superrapido	cilindrica		0.4 ÷ 0.5
	cilindico-frontale		0.2 ÷ 0.3
	a disco		0.3 ÷ 0.5
	ad angolo		0.25
con taglienti riportati	cilindico-frontale	acciaio superrapido	0.4 ÷ 0.6
		carburo	0.6 ÷ 0.9
	a disco	acciaio superrapido	0.4 ÷ 0.7
		carburo	0.5 ÷ 0.7
di forma			0.8 ÷ 0.1

Alla luce di queste considerazioni è opportuno limitare il numero dei denti di una fresa di forma rispetto a quello di una fresa generica, per conferire più elevata robustezza all'utensile e consentire un maggior numero di affilature.

[1]da non confondere con la durata intesa come tempo intercorrente fra due affilature successive.

Orientativamente, il numero Z dei denti di una fresa generica viene empiricamente calcolato dai costruttori mediante la formula

$$Z = \sqrt[3]{D^2} \tag{3.2}$$

dando luogo quindi ad un valore di *Z* molto variabile a seconda del diametro della fresa. Una fresa di forma, invece, viene generalmente costruita con un numero di denti compreso fra 8 e 14, indipendentemente dal diametro.

3.2. LAVORAZIONI DI FRESATURA

La fresatura di una superficie può essere eseguita con due diverse sistemazioni dell'utensile rispetto al pezzo:

fresatura periferica (cfr. ad es; la fig.3.2 a)
fresatura frontale (cfr. ad es; la fig.3.2 b)

In quanto segue ci si riferirà quasi sempre alla fresatura periferica, dal momento che, anche in operazioni di fresatura frontale, l'asportazione del truciolo è sempre realizzata dai denti. disposti perifericamente, mentre quelli frontali hanno l'unico scopo di finire la superficie ottenuta.

La formazione del truciolo è accompagnata dagli stessi fenomeni descritti nella tornitura e nella foratura (deformazione, sviluppo di calore, tagliente di riporto, ecc.), derivanti da analoghe cause. Esistono tuttavia delle particolarità che non si riscontrano nelle due precedenti lavorazioni. In queste ultime, ad esempio, l'utensile, una volta entrato in contatto con il pezzo, è soggetto all'azione continua del truciolo per tutta la durata della lavorazione. Nella fresatura, invece, un dente, che può essere riguardato come un utensile singolo, è soggetto alle azioni del truciolo per un tempo relativamente breve durante un giro della fresa. Per gran parte della rotazione il dente è a contatto con l'aria e l'eventuale refrigerante, senza asportare truciolo. Ciò conduce ad un raffreddamento del dente e quindi ad un benefico effetto sulla durata dell'utensile.

A mano a mano che il pezzo avanza, d'altro canto, il dente che aveva abbandonato il contatto si troverà di nuovo ad interferire con il pezzo, con un brusco impatto contro la superficie da lavorare. Questi urti ripetuti riducono la durata dell'utensile e, in qualche caso, possono portare ad una distruzione istantanea del tagliente.

Anche durante il contatto l'utensile è soggetto a condizioni diverse da quelle riscontrate in altri tipi di lavorazione, perché lo spessore del truciolo varia continuamente dall'inizio alla fine del contatto. Questa variazione è illustrata nella figura 3.9 dove, per semplicità, si è fatto riferimento ad una fresa a denti diritti. Nel caso di denti elicoidali, lo spessore del truciolo varia anche secondo la larghezza della fresa. Ovviamente la variazione dello spessore di truciolo comporta anche la variazione della sezione di truciolo, data dallo spessore per la larghezza.

Il modo di lavorare ad intermittenza dei denti, la variazione della sezione di truciolo, la variazione del numero di denti simultaneamente in presa conducono ad una variazione della forza, della coppia e della potenza richiesta, con ripercussioni sulla finitura superficiale.

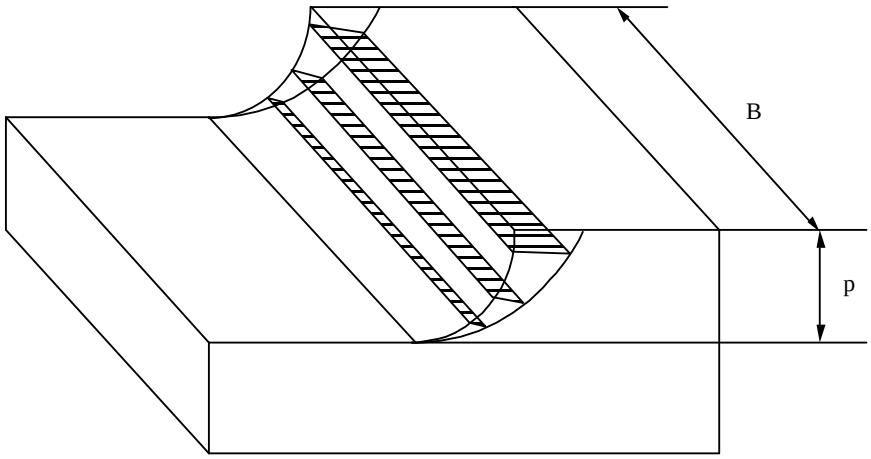


Fig. 3.9. Variazione dello spessore e della sezione di truciolo.

FRESATURA PERIFERICA

Le lavorazioni di fresatura periferica possono essere effettuate in due modi:

fresatura in discordanza (fig. 3.10 a)
fresatura in concordanza (fig. 3.10 b)

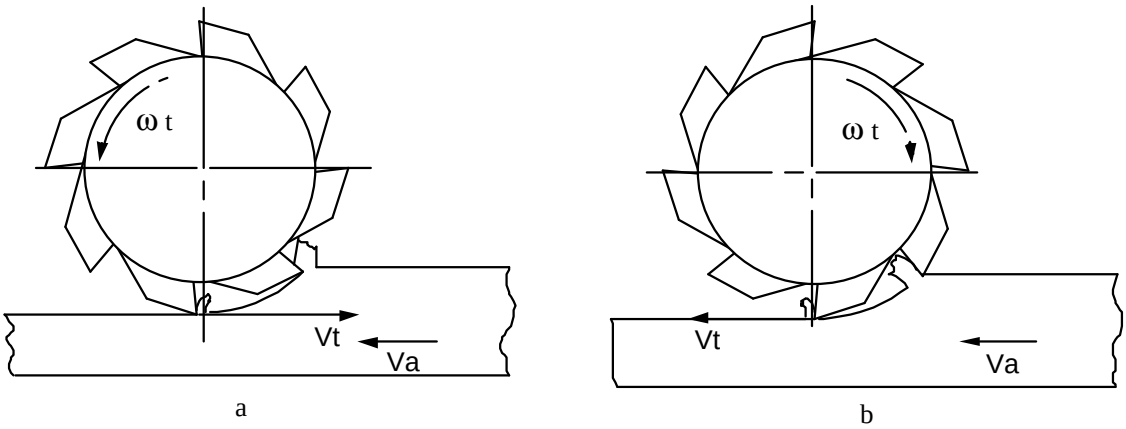


Fig. 3.10.

Nel primo caso, la velocità periferica Vt della fresa nel punto teorico di contatto A risulta di verso opposto alla velocità di avanzamento Va; nel secondo caso, Vt risulta concorde con Va.

La finitura superficiale ottenibile da una fresatura periferica può essere determinata con considerazioni puramente cinematiche, ricercando, analogamente alle altre lavorazioni per asportazione di truciolo, la forma della traiettoria del moto relativo della coppia cinematica utensile-pezzo. A tale scopo bisogna conoscere:

centro di istantanea rotazione;
polare fissa;
polare mobile;
traiettoria del moto relativo.

Nelle condizioni cinematiche di fresatura in discordanza, assegniamo al sistema fresa-pezzo una velocità uguale e opposta alla velocità di avanzamento (fig. 3.11).

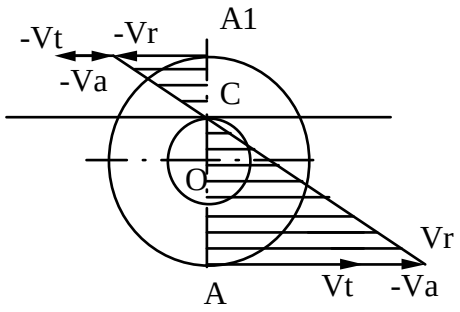


Fig. 3.11.

La velocità relativa varia da -Vr nel punto A_1 a +Vr nel punto A, mentre il punto C possiede velocità nulla ed è quindi il centro di istantanea rotazione. Se dalla superficie lavorata si conducono tutti i segmenti ad essa normali e di lunghezza pari ad AC, si sarà costruita la polare fissa che risulterà quindi una retta.

Se dalla circonferenza descritta dal punto A si tracciano i segmenti ad essa normali e di lunghezza pari ad AC, si sarà costruita la polare mobile che risulterà quindi una circonferenza di centro O e raggio OC.

La traiettoria del moto relativo che a noi interessa sarà quella descritta dal punto A, appartenente al tagliente, solidale alla polare mobile che rotola senza strisciare sulla polare fissa. La curva rappresentativa di questo moto è una cicloide allungata, dal momento che il punto A si trova ad una distanza maggiore del raggio dalla circonferenza di centro O e raggio OC.

Se la fresa avesse un solo dente, la superficie lavorata si presenterebbe come nella figura 3.12.

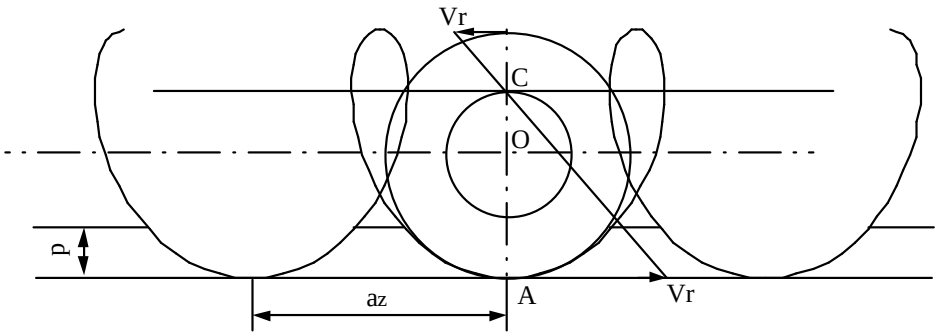


Fig. 3.12.

E' evidente che, per un utensile politagliente, la superficie lavorata si presenterà come costituita dall'inviluppo di tanti archi di cicloide, secondo il valore dell'avanzamento per dente (fig.3.13).

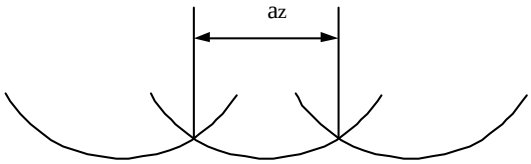


Fig. 3.13.

Le stesse considerazioni si possono svolgere per una lavorazione di fresatura in concordanza, come mostrato nelle figg. 3.14 e 3.15.

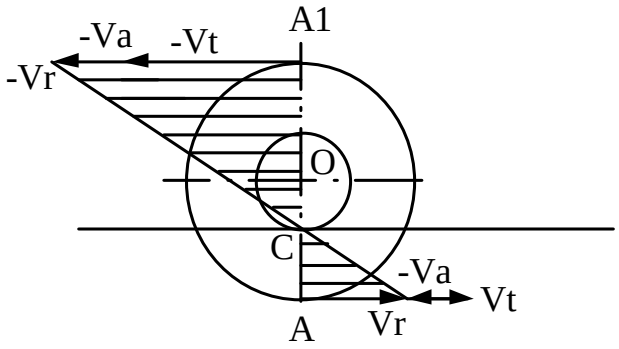


Fig. 3.14

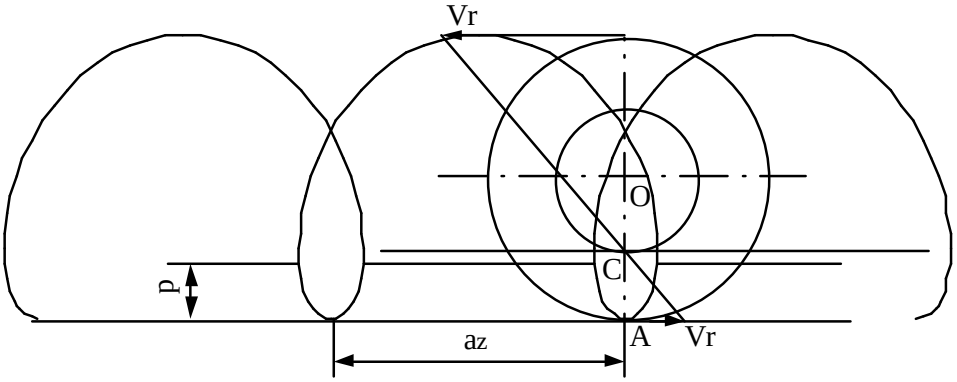


Fig. 3.15.

La traiettoria del moto relativo fra utensile e pezzo corrisponde sempre ad una cicloide allungata ma, in questo caso, la superficie fresata risulterà dall'inviIuppo degli archi di cicloide con raggio di curvatura minore.

A parità di avanzamento per dente, l'indice di rugosità, proporzionale all'altezza massima del profilo, risulterà maggiore per una lavorazione in concordanza che non per una lavorazione in discordanza (fig. 3.16).

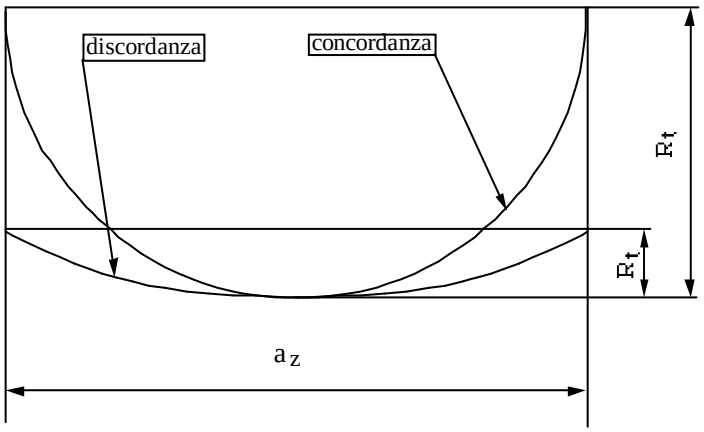


Fig. 3.16.

Queste considerazioni puramente geometriche porterebbero quindi alla conclusione che in una fresatura in discordanza la finitura superficiale è sempre migliore di quella ottenibile in concordanza. Considerazioni di carattere pratico, legate essenzialmente al meccanismo di asportazione di truciolo ed ai sistemi di comando della fresatrice, conducono invece a conclusioni affatto diverse.

Considerando infatti le figg. 3.10, si nota come, in discordanza, un dente della fresa dovrebbe iniziare ad asportare truciolo nel punto A e quindi con spessore nullo. Nelle condizioni pratiche di lavorazione ciò non avviene, ma il dente comincia ad asportare truciolo quando davanti ad esso si formerà, per deformazione plastica, uno spessore minimo di truciolo tale da consentire al dente di penetrare nel materiale e cominciare quindi la lavorazione. Il profilo della superficie non risulterà dal semplice inviluppo di archi di cicloide, ma si presenterà come nella figura 3.17, con un valore di rugosità evidentemente maggiore del caso teorico. Ciò non accade nella lavorazione in concordanza, dal momento che il dente attacca il pezzo con uno spessore di truciolo che quasi istantaneamente assume il valore massimo e si riduce gradualmente fino a zero, quando il dente non sarà più a contatto col pezzo. In tal caso la finitura della superficie lavorata risulterà molto prossima a quella prevista con considerazioni puramente geometriche.

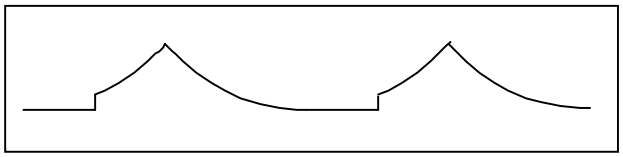


Fig. 3.17.

Da quanto detto sembrerebbe più conveniente lavorare in concordanza. Se però si considera l'inizio del contatto fra dente e pezzo, si può notare come, nel caso della discordanza, il dente, prima di asportare truciolo, striscia su un materiale già incrudito dal passaggio del dente precedente, usurandosi quindi soprattutto sul dorso, ma per contro lavorando materiale che non ha subito alcun danno dal contatto con l'atmosfera e con una variazione dello spessore di truciolo da un minimo ad un massimo. Viceversa, nella lavorazione in concordanza, il dente, al momento del primo contatto, subisce un urto, molto pericoloso se la superficie da lavorare è per esempio ricoperta da uno strato di ossido.

La pratica delle lavorazioni di fresatura ha mostrato che una fresatura in concordanza conduce ad una migliore finitura superficiale rispetto ad una fresatura in discordanza, cosa del resto già intuibile dalle considerazioni fatte in precedenza, a condizione però che la macchina sia in buone condizioni e soprattutto che il meccanismo di alimentazione presenti giochi trascurabili. L'osservazione della fig. 3.18 a e b consente di fare le seguenti considerazioni.

A parità di tutte le condizioni, nel caso della discordanza, la componente verticale dello sforzo di taglio tende a sollevare il pezzo dalla tavola porta pezzo. Poiché questo sforzo è variabile durante il contatto, perché è variabile lo spessore di truciolo, si innescheranno fenomeni di vibrazione che fanno scadere la finitura superficiale. Nella concordanza invece la stessa componente tende ad accoppiare stabilmente il pezzo alla tavola porta pezzo e quindi sono le stesse azioni di taglio che combattono l'insorgere delle vibrazioni.

La componente orizzontale dello sforzo di taglio, nel caso di fresatura in discordanza, tende a recuperare automaticamente il gioco esistente tra vite e madrevite della tavola porta pezzo, mentre nella fresatura in concordanza la stessa componente esalta il gioco. In tal caso, durante la lavorazione, vi saranno momenti nei quali la tavola porta pezzo si fermerà, quando la vite e la madrevite saranno disaccoppiate, salvo a riprendere il moto quando i fianchi dei filetti della vite torneranno di nuovo a contatto con i corrispondenti fianchi dei filetti della madrevite. E'

evidente che il movimento del pezzo avverrà ad intervalli discreti e non con continuità, conducendo ad una finitura superficiale assolutamente inaccettabile. Solo se la fresatrice è dotata di un sistema di avanzamento esente da giochi (ad es. viti a ricircolazione di sfere precaricate), sarà possibile lavorare in concordanza.

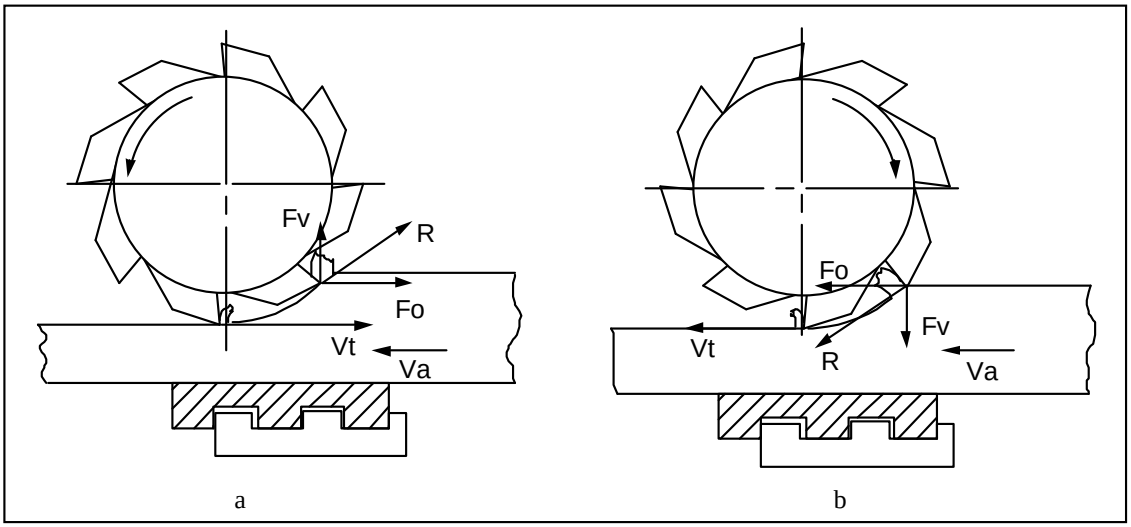


Fig. 3.18

PARAMETRI DI TAGLIO

Vengono di seguito elencati alcuni dei principali parametri da prendere in considerazione in un'operazione di fresatura periferica, già incontrati in precedenza, aggiungendone altri di particolare utilità.

La velocità di taglio *Vt* è data da

$$V_t = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ (m/min)} \tag{3.3}$$

dove *D* (mm) è il diametro della fresa e *n* (giri/min) la sua velocità angolare.

Un primo valore di tentativo viene assunto ricorrendo a tabelle, generalmente fornite dal fabbbricante dell'utensile. Il valore ottimale verrà poi determinato mediante algoritmi, costruiti in funzione del processo produttivo nel quale la lavorazione è inserita[2].

L'avanzamento può essere definito in tre modi:

avanzamento per dente a_z (mm/dente)
avanzamento per giro a_g (mm/giro)
avanzamento al minuto a_m (mm/min)

Queste grandezze, indicando con *Z* il numero di denti della fresa, sono legate fra loro dalle relazioni

$$a_z = a_g / Z = a_m / (n \cdot Z) \tag{3.4}$$

[2]Non è mai superfluo mettere in evidenza che le considerazioni che si fanno sulla scelta dei parametri di taglio si riferiscono all'impostazione di una lavorazione di tipo industriale, cioè per produzioni di serie e non per singoli pezzi da lavorare saltuariamente.

I principali fattori che influenzano la scelta dell'avanzamento, in un'operazione di sgrossatura, sono:

natura del materiale da lavorare
natura del materiale dell'utensile
dimensioni della superficie da fresare
resistenza del meccanismo di avanzamento

In operazioni di semi finitura e finitura il parametro più importante è la rugosità imposta al pezzo finito.

La profondità di passata *p* e la larghezza di taglio *B* si possono ricavare dalla fig. 3.9.

L'angolo di contatto δ viene assunto convenzionalmente come l'angolo formato dai due raggi della fresa che passano per il punto A e per il punto in cui si ha il massimo valore dello spessore di truciolo (trascurando quindi il piccolo arco di cicloide descritto dall'utensile prima di abbandonare completamente il pezzo). Dalla figura 3.19 si ricava

$$cos\delta = 1 - 2p/D \qquad (3.5)$$

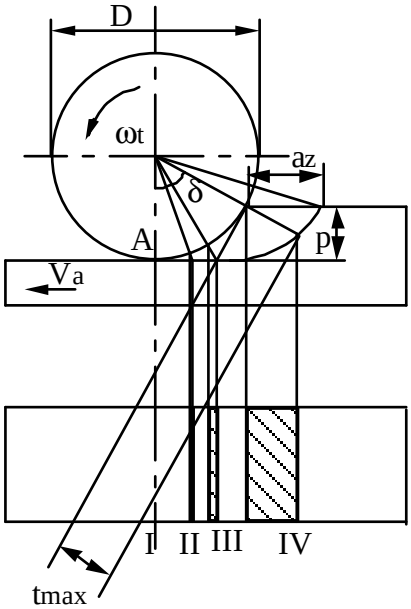


Fig. 3.19.

Lo spessore di truciolo indeformato *t* è l'interferenza, continuamente variabile, fra utensile e pezzo, misurato in direzione radiale (fig. 3.19) e varia lungo l'intero arco di contatto.

All'inizio del contatto[3] (posizione I) lo spessore di truciolo è uguale a zero e immediatamente prima della fine del contatto (posizione IV) assume il valore massimo dato dalla relazione approssimata

$$t_{max} \approx a_z \, sin\delta \qquad (3.6)$$

Il numero m di denti simultaneamente a contatto, nel caso di fresa a denti diritti, è dato da

$$m = \delta \cdot Z/360 \qquad (3.7)$$

Se dalla (3.9) risulta $1 < m < 2$, il numero di denti contemporaneamente in presa è al massimo uguale a 2; se risulta $2 < m < 3$, il numero di denti risulta uguale a 3 e così via.

[3]Implicitamente ci si è messi nelle condizioni cinematiche di fresatura in discordanza.

Ricordando la (3.5), si vede che il numero di denti simultaneamente in presa dipende dalla profondità di passata, dal diametro della fresa e dal suo numero di denti. Maggiori saranno *p* e *Z* e minore *D*, maggiore risulterà il numero m di denti che lavorano contemporaneamente. Nel caso che i valori di *D* e di *Z* siano imposti, *m* dipenderà solamente dalla profondità di passata.

Il tempo di lavorazione *T* (min) è dato da

$$T = \frac{L}{a_m} = \frac{l + y + \Delta}{a_z \cdot Z \cdot n} \tag{3.8}$$

dove (fig. 3.20):

L = lunghezza totale dello spostamento relativo fra utensile e pezzo (mm). Nella figura, L corrisponde allo spostamento del pezzo dalla posizione I alla posizione II.

l = lunghezza della superficie fresata (mm)

y = accostamento dell'utensile (mm)

Δ = extracorsa (mm); le si dà generalmente un valore compreso fra 1 e 5 mm.

a_m = velocità di avanzamento (mm/min).

L'accostamento *y* dell'utensile è definito come la distanza, misurata nella direzione di avanzamento, fra il punto iniziale di contatto M e il punto K di massimo arco di contatto tra utensile e pezzo. Considerando il triangolo rettangolo OKN si può ricavare il valore di *y* mediante la relazione

$$y = \sqrt{\left(\tfrac{D}{2}\right)^2 - \left(\tfrac{D}{2} - p\right)^2} = \sqrt{p(D - p)} \tag{3.9}$$

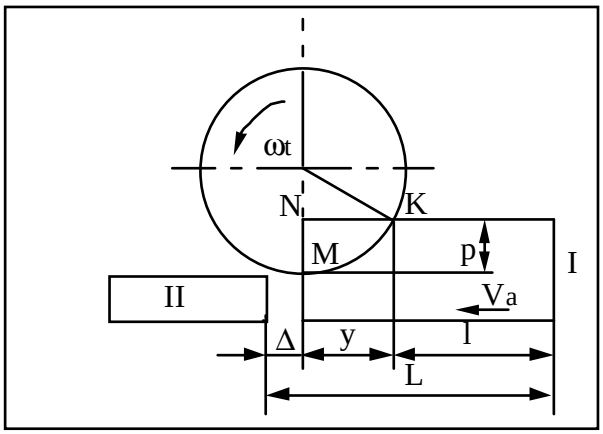


Fig. 3.20.

CONDIZIONI PER LA CONTINUITÀ DELLE AZIONI DI TAGLIO NELLA FRESATURA PERIFERICA

Il dente di una fresa a denti diritti, durante il taglio, resta a contatto col pezzo per tutta la sua lunghezza contemporaneamente. Ciò comporta, come visto, variazioni di sezione di truciolo e, di conseguenza, delle forze che agiscono durante il taglio.

Supponiamo che un solo dente di una fresa a denti diritti sia in contatto col pezzo. Ciò significa che il dente precedente ha già lasciato il pezzo e che il dente considerato è appena entrato in contatto col pezzo. Da questo istante la sezione di truciolo aumenterà gradualmente dal valore nullo al valore massimo, annullandosi nuovamente quando il dente lascia il pezzo.

L'azione di taglio è più uniforme di quella appena descritta se due o tre denti sono impegnati contemporaneamente. In tal caso le variazioni di sezione di truciolo non saranno molto brusche.

E' tuttavia impossibile mantenere le forze di taglio costanti nel tempo quando si lavora con frese a denti diritti, per quanto grande sia il loro numero contemporaneamente in presa. Un'azione di taglio uniforme richiede che la sezione di truciolo si mantenga costante per tutta la

durata della fresatura. Tale condizione si realizza solamente con una fresa a denti elicoidali ed in particolari condizioni che verranno qui di seguito ricercate.

Come è intuitivo, in un tale tipo di fresa il tagliente di ciascun dente interferisce gradualmente con la superficie da tagliare e gradualmente se ne distacca. In tal modo, come già detto, la variazione della sezione di truciolo è meno brusca, l'incremento della forza di taglio è più graduale e, di conseguenza, la fresatura sarà più dolce e la finitura superficiale ottenuta migliore.

Da quanto detto, si deduce che la condizione da ricercare è quella che consente di ritenere costante la sezione di truciolo indeformato per l'intera durata del contatto fra dente e pezzo.

Se la fresa avesse un solo dente ad asse elicoidale di passo H e se la larghezza da fresare B fosse uguale alla distanza fra due punti omologhi dell'elica, cioè $B = H$, il dente non abbandonerebbe mai il contatto con il pezzo e lungo il tagliente vi sarebbero tutte le infinite sezioni di truciolo, comprese all'interno della profondità di passata.

Per una fresa con Z denti

$$H = Z \cdot h_a \tag{3.10}$$

dove h_a è il passo assiale della dentatura.

In definitiva, la risultante delle forze di taglio sarà costante nel tempo se la larghezza totale B del truciolo è uguale al passo assiale della fresa o un suo multiplo (fig. 3.21):

$$B = k\, h_a \tag{3.11}$$

Con k numero intero.

La relazione fra il passo assiale h_a e il passo circonferenziale h è data da:

$$h_a = h\, cotg\, \omega \tag{3.l2}$$

dove con ω si è indicato l'angolo di inclinazione dell'elica; e poiché

$$h = \frac{\pi \cdot D}{Z} \tag{3 13}$$

si ottiene:

$$h_a = \frac{\pi \cdot D}{Z} cotg\omega \tag{3.14}$$

Sempre dalla figura 3.21 si può calcolare il passo H di un singolo dente elicoidale:

$$H = \pi \cdot D \cdot cotg\omega \tag{3.15}$$

Dopo opportune sostituzioni, si ottiene in altra forma la (3.10), condizione da soddisfare per un'azione di taglio uniforme nella fresatura:

$$\frac{B \cdot Z}{H} = k \tag{3.16}$$

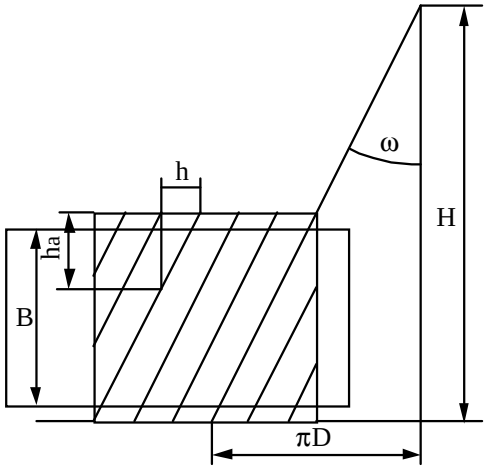


Fig. 3.21

3.3. FRESATRICI

Le fresatrici si classificano soprattutto in base alla disposizione dell'asse di rotazione della fresa ed alle possibilità di movimento che vengono offerte al pezzo da lavorare.

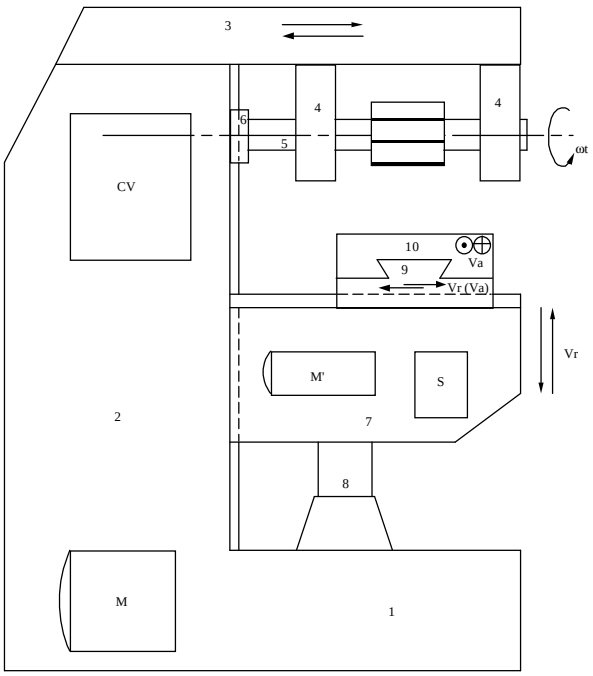
Con l'evolversi della ricerca tecnologica e con il consolidamento della tendenza alla "flessibilità" delle linee di produzione, sempre più raramente sono immesse sul mercato macchine di tipo tradizionale. L'orientamento è quello di impiegare centri di lavoro, in grado di eseguire numerose lavorazioni, ognuna diversa dall'altra, che prima venivano eseguite su macchine specifiche. Poiché, come si può dedurre da quanto detto all'inizio di questo capitolo, la fresatrice è una delle macchine utensili più versatili, in grado di eseguire lavorazioni che poco si somigliano fra loro, non ci si dovrà meravigliare di vedere sempre più frequentemente macchine che, pur se denominate ancora fresatrici, non sono più facilmente riconducibili ad uno dei tipi che saranno illustrati in questo paragrafo. La classificazione che qui viene riportata sembra comunque quella che meglio risponde ai requisiti di semplicità e completezza, permettendo all'allievo di poter in seguito discernere fra i vari tipi di macchine che potrà incontrare nella moderna industria.

I tipi più diffusi di fresatrici sono i seguenti:

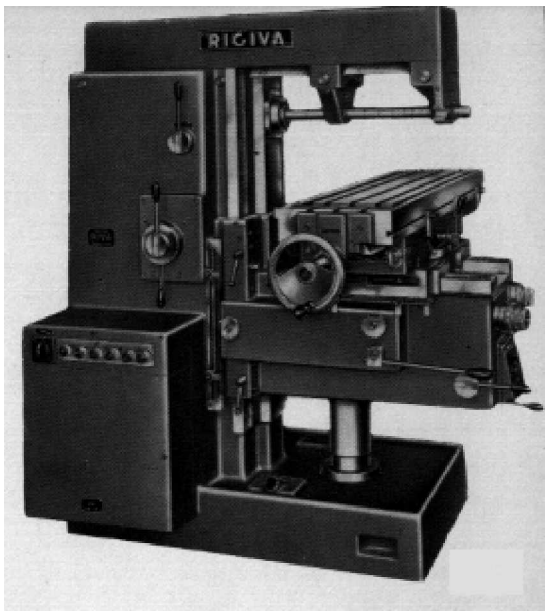
- orizzontale
- universale
- verticale
- piallatrice

FRESATRICE ORIZZONTALE

La fresatrice orizzontale (fig. 3.22 a,b) deriva il suo nome dal fatto che l'asse di rotazione dell'utensile è disposto orizzontalmente rispetto al piano di appoggio della macchina. Può eseguire operazioni di spianatura e solchi rettilinei comunque sagomati; il montaggio di accessori ne amplia notevolmente la gamma di lavorazioni.



a



b

Fig. 3.22.

E' composta da un basamento 1 con un montante 2 che contiene il motore M e il cambio di velocità C.V. Il montante sorregge un braccio o slittone 3 che a sua volta sostiene uno o due supporti 4. I supporti hanno il compito di ridurre la distanza fra gli appoggi dell'albero porta fresa 5, riducendo la freccia di flessione. L'albero riceve il moto di taglio rotatorio dal mandrino o naso 6. Una mensola 7, azionata da una vite a cannocchiale 8, può scorrere in direzione verticale su apposite guide ricavate sul montante e sostiene un carrello 9, che può muoversi lungo una direzione orizzontale parallela all'asse della fresa. Sopra il carrello è sistemata la tavola porta pezzo 10, che si può muovere in direzione normale a quella del carrello. I moti della mensola, del carrello e della tavola porta pezzo sono comandati da un motore M' con relativa scatola degli avanzamenti 5, distinti dal sistema principale di comando.

Dallo schema illustrato si vede che in una fresatrice orizzontale all'utensile è conferito il solo moto di taglio, mentre tutti gli altri moti sono posseduti dal pezzo.

FRESATRICE UNIVERSALE

La fresatrice universale è simile alla fresatrice orizzontale in tutti i particolari, tranne per il fatto che al pezzo montato sulla tavola è consentito un moto di registrazione in più. Fra la tavola e il carrello è infatti interposta una piastra, girevole intorno ad un asse normale al piano della tavola (fig. 3.23), che permette di orientare la stessa in direzione obliqua rispetto all'asse di rotazione della fresa. L'angolo massimo che può descrivere la tavola è di 45° in entrambi i versi.

Sull'utilità di poter disporre di questo ulteriore moto di registrazione si rimanda al paragrafo riguardante le lavorazioni eseguibili sulle fresatrici.

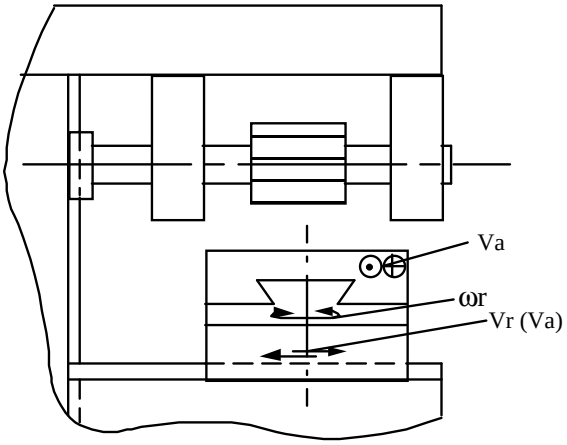


Fig.3.23.

FRESATRICE VERTICALE

Come è intuitivo, la fresatrice verticale è una macchina che adopera come utensile una fresa il cui asse di rotazione è disposto verticalmente rispetto alla tavola porta pezzo.

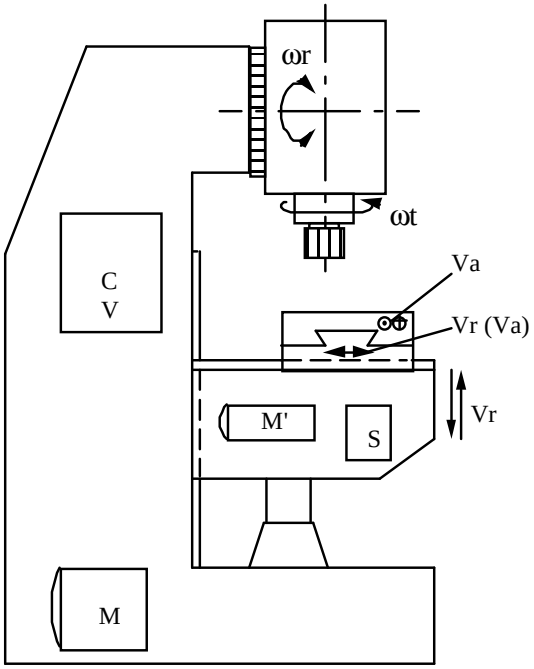


Fig. 3.24.

La figura 3.24 rende chiara la funzionalità delle varie parti. Resta da sottolineare che il moto di registrazione rotatorio della testa intorno ad un asse orizzontale consente di eseguire operazioni di fresatura anche ad asse inclinato. Il mandrino è dotato, a differenza dei due tipi di fresatrice visti precedentemente, anche di un moto rettilineo parallelo al proprio asse. Questa possibilità di movimento del naso può essere sfruttata per conferire all'utensile anche un moto di alimentazione.

FRESATRICI PIALLATRICI

Le fresatrici piallatrici sono macchine utensili destinate alla fresatura di pezzi aventi peso e dimensioni tali da renderne difficile la movimentazione e la registrazione rispetto all'utensile. Si preferisce quindi affidare alla fresa, oltre al moto di taglio, anche tutti i moti di registrazione

necessari e parte dei moti di alimentazione, riservando al pezzo il solo eventuale moto di alimentazione longitudinale. Derivano il loro nome dalla somiglianza, anche se puramente esteriore, con le piallatrici.

Si impiegano per operazioni di spianatura su superfici orizzontali, verticali o inclinate e per fresature di forma.

La figura 3.25 illustra schematicamente i diversi tipi di macchine.

Nelle fresatrici piallatrici la tavola porta pezzo si può muovere esclusivamente lungo una direzione longitudinale.

Come sempre il moto rotatorio dei mandrini intorno al proprio asse conferisce agli utensili il moto di taglio, mentre il movimento longitudinale della tavola e gli spostamenti assiali dei mandrini costituiscono i moti di alimentazione e di registrazione.

Oltre ai movimenti citati, le teste motrici possono avere la possibilità di ruotare intorno ad un asse normale alle guide, consentendo in tal modo all'utensile di lavorare su superfici comunque inclinate.

Le fresatrici piallatrici, e i centri di lavoro ad esse riconducibili, hanno una produttività molto elevata. Il tempo di lavorazione viene continuamente ridotto dall'impiego di mandrini ad alta velocità e dal continuo aumento della velocità di avanzamento. Tutto questo conduce a macchine sempre più grandi e con potenze installate sempre crescenti.

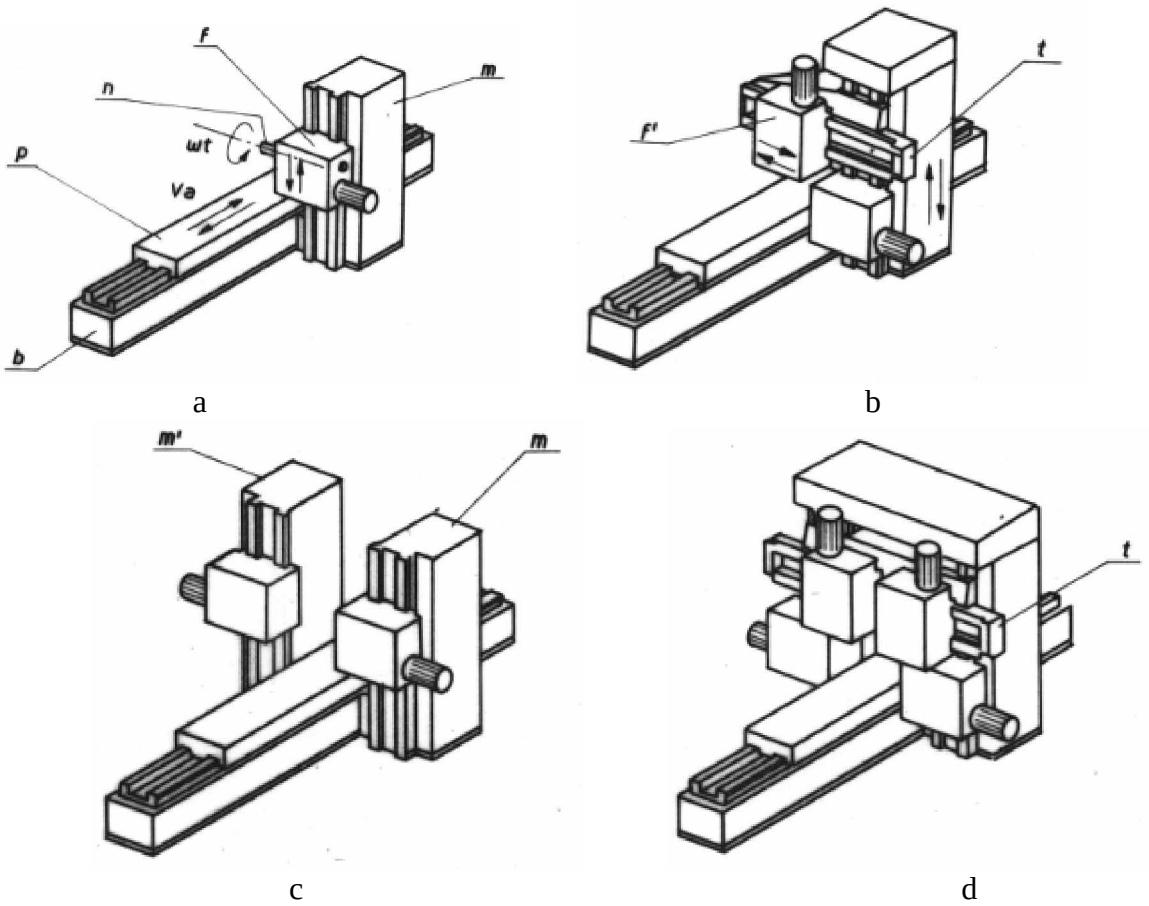


Fig.3.25. Fresatrici piallatrici: a) ad un montante; b) ad un montante con traversa mobile; c) a due montanti; d) a portale. b: basamento; f, f': testa; m, m': montante; n: mandrino; p: tavola porta pezzo; t: traversa mobile.

Oltre a quelli trattati in questo capitolo, esistono altri tipi di fresatrici (per filetti, per attrezzisti, a copiare) che però sono sempre meno diffuse, in quanto si tratta di macchine concepite o per lavorazioni molto specifiche oppure per lavorazioni molto diversificate. Nel primo caso (fresatrice per filetti) sono state sostituite da macchine dedicate; nel secondo caso

(fresatrici per attrezzisti e a copiare), le lavorazioni su di esse eseguibili vengono meglio realizzate da un moderno centro di lavoro a controllo numerico.

ALTRE LAVORAZIONI ESEGUIBILI SULLE FRESATRICI

Come si è accennato all'inizio di questo capitolo, la fresatrice, nei suoi vari tipi, si presta alle lavorazioni più diverse. Fra gli innumerevoli particolari che si possono ottenere su queste macchine, limiteremo la nostra attenzione solo a quelli che ne mettono bene in evidenza la versatilità.

ESECUZIONE DI CAMME

Le camme sono particolari elementi che servono a trasformare il moto rotatorio in un moto rettilineo di velocità assegnata. Uno dei casi più frequenti è quello in cui si richiede che il moto della punteria sia rettilineo uniforme: per tale necessità si dovrà impiegare una camma con profilo a spirale di Archimede[4].

Per la fabbricazione di questo elemento cinematico è necessario asportare truciolo da un disco circolare in modo che, mentre il disco ruota con velocità angolare costante, l'utensile si muove con moto rettilineo uniforme. A tale scopo ben si presta una fresatrice universale attrezzata con testa a fresare universale: il pezzo verrà montato su una testa universale impiegata come testa motrice (fig. 3.26)[5].

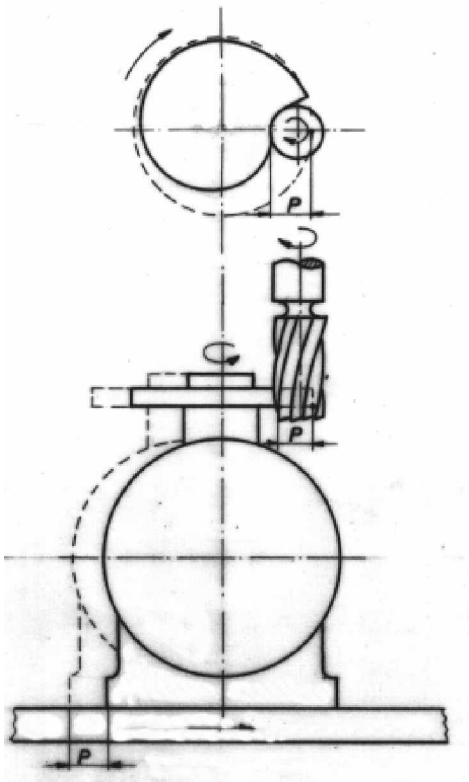


Fig. 3.26.

[4] E' la traiettoria descritta da un punto che si muove con velocità costante su una retta la quale ruota con velocità costante intorno a un altro punto.

[5] La testa a fresare universale e la testa universale sono due accessori diversi. Il primo si monta sulla testa di una fresatrice orizzontale o universale in corrispondenza del mandrino: serve ad orientare l'asse della fresa secondo una direzione qualunque nello spazio. Il secondo si monta sulla tavola porta pezzo e serve sia a dividere una circonferenza in parti uguali, sia a conferire al pezzo un moto rotatorio intorno al proprio asse.

Se il pezzo viene fissato sul mandrino della testa universale disposta col suo asse verticalmente, dalla combinazione del moto di rotazione della testa col moto di traslazione della tavola porta pezzo si riesce ad ottenere un moto a spirale di Archimede, il cui passo è dato dall'avanzamento della tavola per ogni giro del mandrino della testa universale. L'utensile viene montato con l'asse parallelo a quello del disco da cui si vuole ricavare la camma.

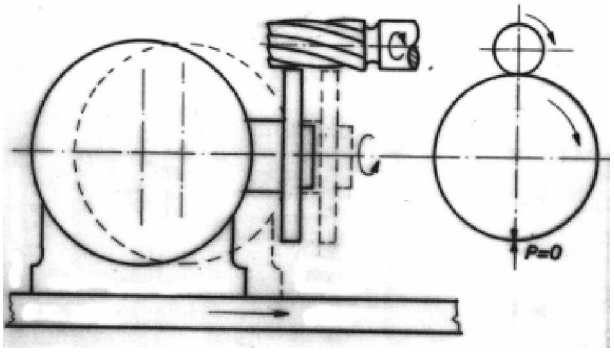


Fig. 3.27.

Si supponga di far ruotare l'asse del pezzo e l'asse della fresa di 90˚, disponendoli orizzontalmente rispetto alla tavola (fig. 3.27). In tal modo all'avanzamento del pezzo non fa riscontro una variazione di distanza fra l'asse del pezzo e l'asse della fresa; si avrà così la costruzione di una spirale di passo nullo e cioè di un disco circolare. E' facile intuire che, ruotando i due assi di un angolo compreso fra 0 e 90˚, si otterrà una spirale con passo variabile fra un massimo e zero, una volta scelto il ruotismo che asserve il numero di giri della testa universale all'avanzamento della tavola porta pezzo. Se quindi, come frequentemente accade, la combinazione di ruote prescelta non è tale da assicurare che l'avanzamento sia uguale al passo della spirale da eseguire, si dovrà compensare l'errore commesso inclinando l'asse del pezzo come precedentemente detto.

Se ad esempio (fig. 3.28) si deve fresare una camma di passo *P* e il ruotismo prescelto dà un avanzamento orizzontale del pezzo pari a *S*, bisognerà inclinare l'asse della testa universale di un angolo α tale che:

$S = P/\sin\alpha$

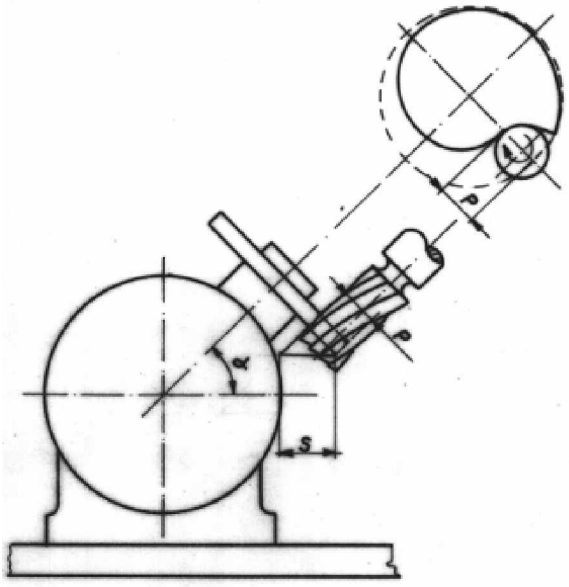


Fig. 3.28.

Una fresatrice universale attrezzata con testa universale può essere impiegata per la fabbricazione di ruote dentate cilindriche o coniche, a denti sia diritti che elicoidali. Tuttavia l'uso di questa macchina è ormai del tutto abbandonato nella produzione di serie. Si ricorrerà ad una fresatrice solo in casi eccezionali e per pezzi singoli.

Per questa lavorazione si dovranno impiegare utensili che hanno i denti sagomati come il vano fra i denti consecutivi della ruota da ottenere. Affinché queste frese non mutino il profilo frontale dopo affilature successive, dovranno appartenere alla categoria delle frese di forma; in altre parole, i singoli utensili dovranno avere il modulo uguale a quello della ruota da realizzare.

E' evidente però che, anche a parità di modulo, la forma del vano fra due denti consecutivi varia al variare del numero di denti. Teoricamente bisognerebbe disporre di una fresa per ogni modulo e per ogni numero di denti. In pratica si impiegano le cosiddette frese modulari, divise in gruppi ed adatte ognuna a fabbricare più di una ruota con diversi numeri di denti. Questo procedimento condurrà inevitabilmente ad errori, ma ha il pregio di semplificare notevolmente la scelta e la scorta di utensili.

La figura 3.29 illustra la disposizione che assumono il pezzo e la testa universale, quando si debbano fabbricare ruote dentate cilindriche a denti diritti su una fresatrice universale.

Dopo aver fresato completamente un vano, il pezzo viene ruotato di una quantità pari al passo della dentatura, manovrando la testa universale che, in questo caso, funzionerà come testa a dividere. Si procederà allo stesso modo, fino a realizzare la dentatura completa.

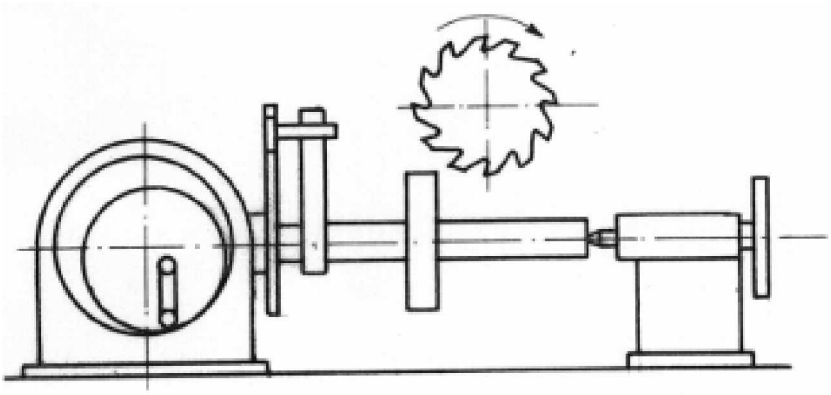


Fig. 3.29.

Quando si deve fabbricare una ruota dentata cilindrica a denti elicoidali, la macchina viene preparata come in figura 3.30, avendo cura, come si vede, di ruotare la tavola porta pezzo in modo che l'asse della fresa risulti tangente all'elica media della ruota. In tal caso, la testa universale funzionerà come testa motrice durante la fresatura di un solo vano; infatti, scegliendo opportunamente le ruote che asservono il moto rotatorio del mandrino della testa universale al moto traslatorio della tavola porta pezzo, si imporrà a quest'ultima di avanzare di una quantità pari al passo dell'elica per ogni giro del pezzo. Una volta ricavato un solco sul pezzo, si farà funzionare la testa universale come testa a dividere, ruotando il pezzo di una quantità pari al passo circonferenziale della dentatura.

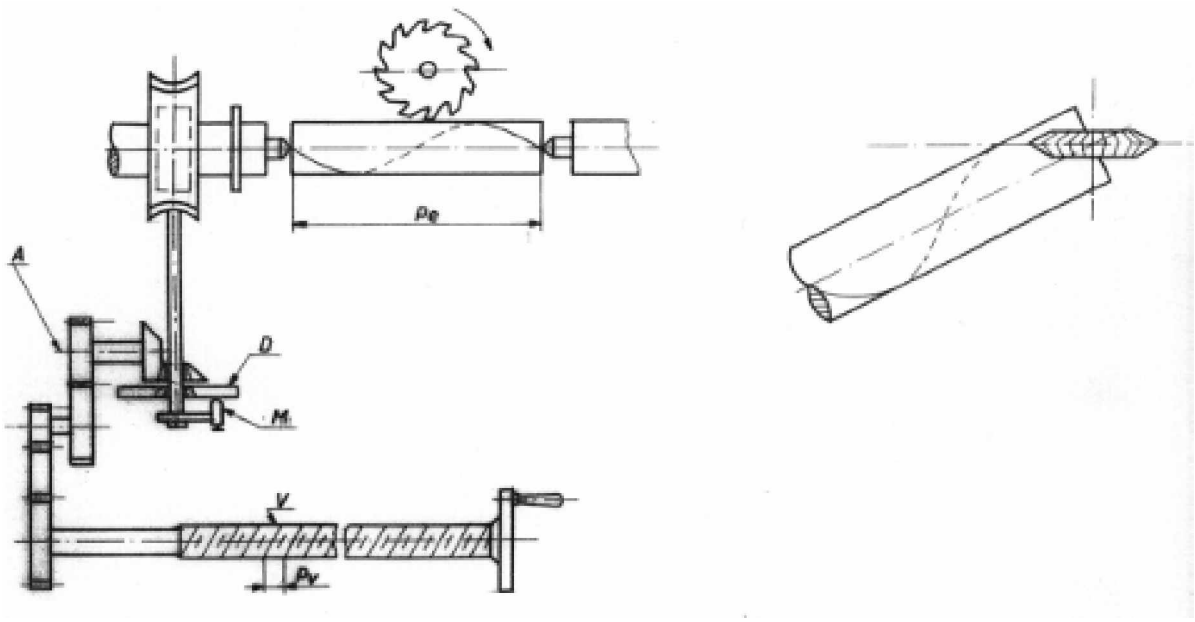


Fig. 3.30.