

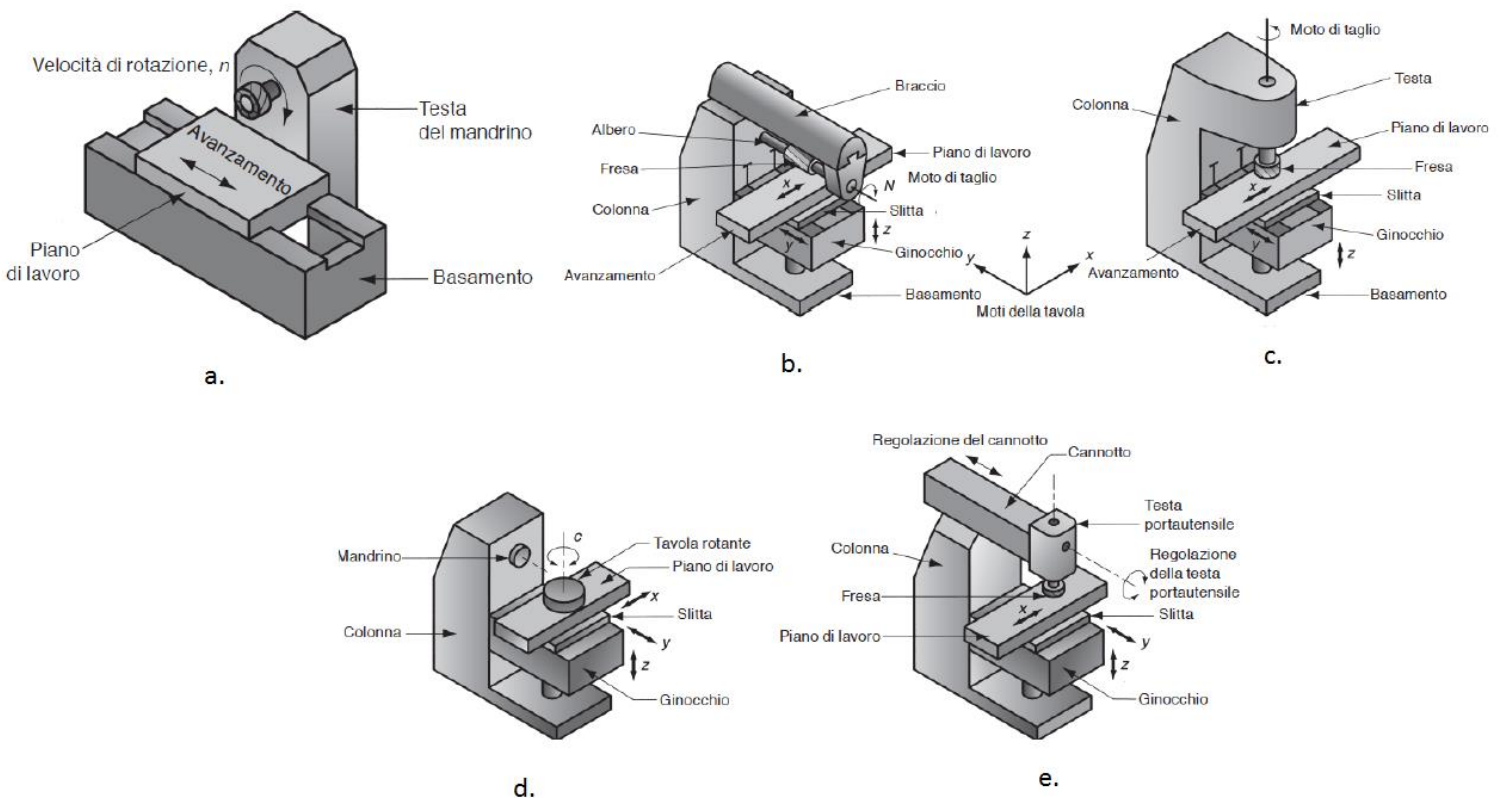
# PROCESSI PER ASPORTAZIONE DI TRUCIOLO: FRESATURA

## Fresatrici

La fresatura è una lavorazione per asportazione di materiale che consente di ottenere una vasta gamma di superficie mediante l'azione di un utensile pluritagliente a geometria definita. È un processo usato per lavorare superficie di oggetti prismatici. Essa viene realizzata mediante le fresatrici cioè macchine in grado di realizzare tali lavorazioni. È importante sottolineare che tali macchine sono caratterizzate da un certo numero di assi; in base a questo numero la macchina sarà più o meno funzionale e più o meno costosa. Vediamo ora alcuni esempi di fresatrici:

- Fresa a banco fisso simplex = questa è la configurazione più semplice costituita da un unico asse
- Colonna orizzontale = caratterizzato da 3 assi; la macchina può dunque essere controllata in 3 direzioni diverse
- Colonna verticale = caratterizzato da 3 assi; la macchina può dunque essere controllata in 3 direzioni diverse. L'asse z serve per aggiustare l'altezza, l'asse y per gli avanzamenti laterali e x per gli avanzamenti del pezzo.
- Fresatrice universale = oltre ai 3 assi principali è presente anche un quarto asse c che permette di ruotare il pezzo così da poter variare la faccia in lavorazione
- Fresatrice a canotto = ha un altro asse legato alla rotazione della testa su cui è montato il mandrino. Permette dunque di lavorare superficie oblique.

La zona definita dalle tre dimensioni che la macchina può raggiungere durante le lavorazioni viene definita cubo di lavoro della macchina. Il cubo di lavoro della macchina definisce di fatto la zona utile ed è dunque un vincolo dimensionale che deve essere rispettato in fase di progettazione. Generalmente le fresatrici sono molto costose poiché uniscono alla flessibilità anche un'estrema precisione in tutte le zone del cubo di lavoro. Per ottenere precisione occorre utilizzare dei materiali estremamente ottimi e effettuare una progettazione di qualità cercando di ottenere un livello di usura degli utensili estremamente basso.

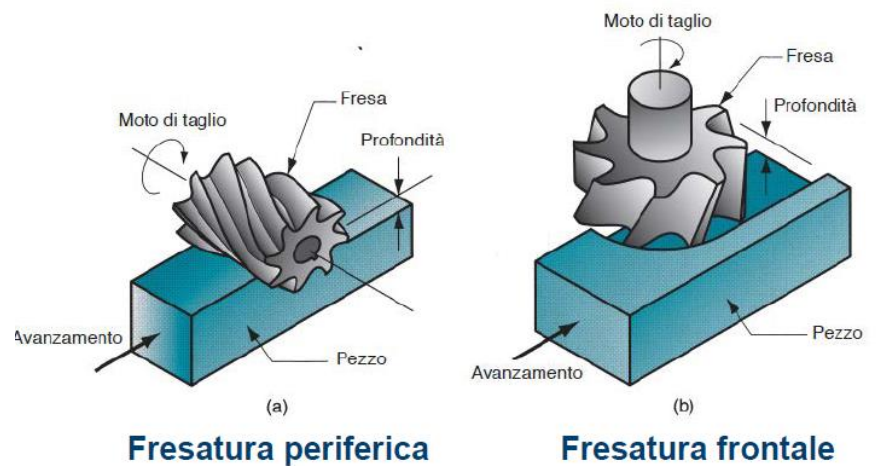


## Tipi di fresatura

Esistono due tipi di fresature:

- Fresatura periferica = in questo caso l'utensile multi tagliente ha un'asse parallelo alla superficie di lavorazione. Il moto di avanzamento viene dato tipicamente al pezzo, talvolta all'utensile ed è un moto traslazionale continuo o a intermittenza
- Fresatura frontale = l'asse della fresa è perpendicolare al piano di lavorazione. Il moto di avanzamento dato generalmente all'utensile

Occorre ora capire quando conviene effettuare una fresatura periferica e quando una frontale.

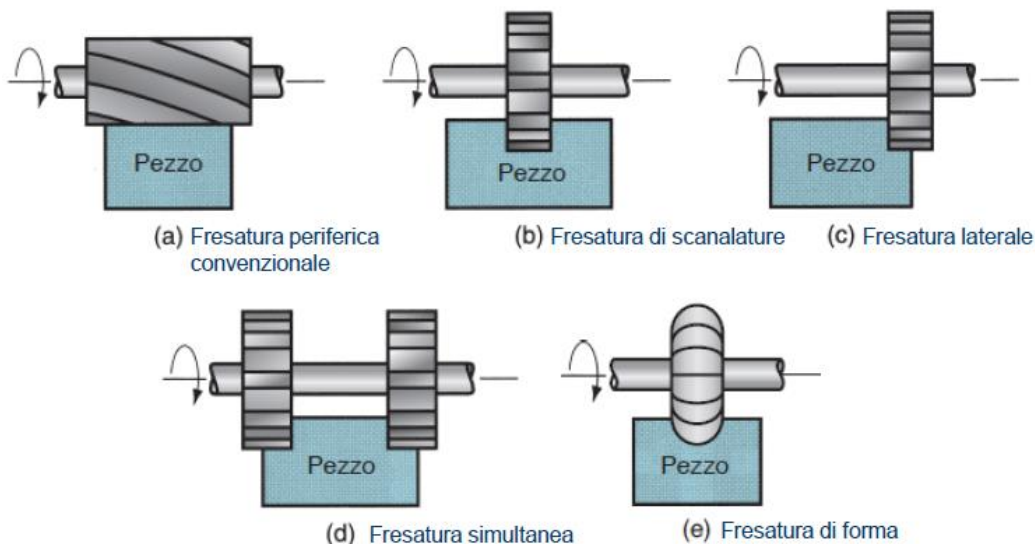


## Fresatura periferica

### Esempi di lavorazione

Analizziamo ora alcune lavorazioni che utilizzano fresatura periferica:

- Convenzionale
- Di scanalature = utensile diverso
- Laterale
- Simultanea = due utensili realizzano contemporaneamente due lavorazioni
- Di forma = utensile che ha una geometria particolare che replica la geometria che bisogna ottenere sul pezzo

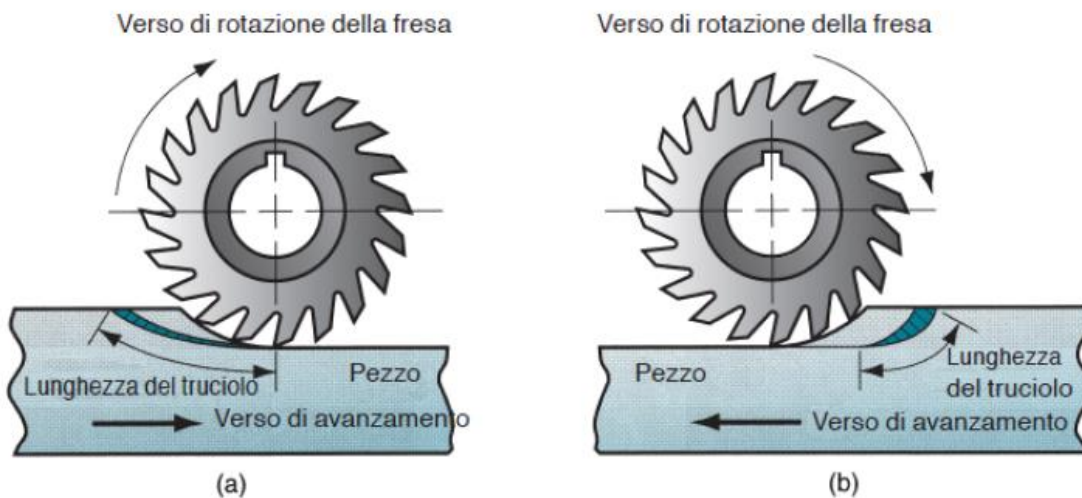


### Configurazioni

Si hanno due configurazioni:

- Fresatura periferica in discordanza = si parla di questo tipo di fresatura se la componente orizzontale del vettore velocità di taglio è discorde rispetto al vettore velocità di avanzamento. Nel punto di contatto tra fresa e pezzo la velocità di taglio ha direzione tangenziale e la sua componente orizzontale avrà la stessa direzione del vettore velocità di avanzamento ma verso opposto.

- b) Fresatura periferica in concordanza = si parla di questo tipo di fresatura se la componente orizzontale del vettore velocità di taglio è concorde rispetto al vettore velocità di avanzamento. Nel punto di contatto tra fresa e pezzo la velocità di taglio ha direzione tangenziale e la sua componente orizzontale avrà la stessa direzione del vettore velocità di avanzamento e anche lo stesso verso.



### Fresatura in discordanza

### Fresatura in concordanza

#### Analisi spessore truciolo e forze:

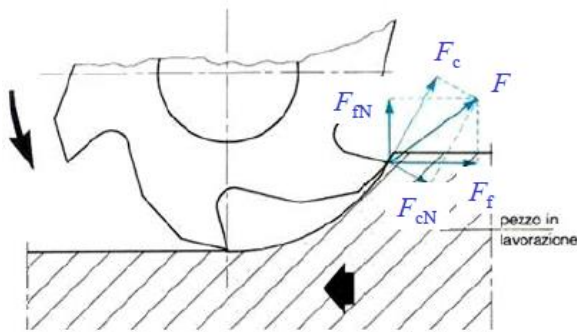
Queste due fresature presentano dunque differenze sia nei moti che nella qualità delle lavorazioni. Analizziamo ora le principali differenze tra questi due casi cercando di capire i vantaggi e gli svantaggi delle due fresature periferiche:

- Spessore del truciolo [usura, rugosità ed evacuazione]:
  - Nella fresatura in discordanza il primo dente di contatto asporta truciolo avente spessore ridotto; tale spessore aumenterà fino a quando la fresa non uscirà dal tratto di contatto. In questo caso il tagliente non si userà facilmente. Dall'altro canto però la rugosità superficiale sarà maggiore poiché il dente della fresa non ricalca la superficie già lavorata. In questo caso l'evacuazione del truciolo è più semplice.
  - Nella fresatura in concordanza invece il dente che entra in contatto con il pezzo asporta subito il truciolo con spessore maggiore, tale spessore diminuirà con l'avanzare del dente stesso. In questo caso il tagliente può rischiare di scheggiarsi e quindi può usurarsi più facilmente. Dall'altro canto però questo comportamento è positivo per la rugosità del pezzo perché non appena il dente esce dalla zona di contatto ricalca la zona già fresata portandola così ad avere una rugosità minore. In questo caso l'evacuazione del truciolo è più complessa. In entrambi i casi però il truciolo è discontinuo.
- Verso della componente verticale della forza di taglio:
  - Nella fresatura in discordanza la componente verticale della forza di taglio è rivolta verso l'alto. Ciò comporta che l'azione della fresa sul pezzo tenderà a staccare il pezzo stesso dalla tavola porta pezzo cioè quell'organo della macchina che permette al pezzo di avanzare. La principale conseguenza è la necessità di un bloccaggio stabile e più resistente rispetto alla fresatura di concordanza così da tenere il pezzo ben fissato ed attaccato alla tavola porta pezzo.
  - Nella fresatura di concordanza la componente verticale della forza di taglio è rivolta verso il basso. L'azione stessa della fresa spinge dunque il pezzo sulla macchina e quindi il pezzo è ben fissato alla tavola porta pezzo; di conseguenza non occorre un particolare tipo di bloccaggio.
- Verso della componente orizzontale della forza di taglio. Prima di analizzare questo aspetto occorre ricordare che in un processo di fresatura il moto di avanzamento è permesso grazie a una vite che si accoppia alla madrevite dunque il meccanismo di trasmissione del moto è

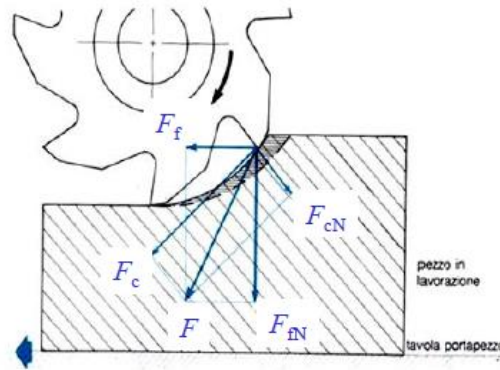
del tipo vite madrevite. Quando il contatto tra i denti della vite e quella della madrevite ha buon giorno allora il contatto tra pezzo e utensile è bene garantito.

- Nella fresatura in discordanza la componente orizzontale della forza di taglio ha verso opposta del vettore avanzamento dunque non ci sono problemi di velocità di avanzamento maggiore di quella della tavola porta pezzo
- Nella fresatura in concordanza la componente orizzontale della forza di taglio ha lo stesso verso del vettore avanzamento dunque il pezzo può essere fatto avanzare con velocità maggiore rispetto alla tavola porta pezzo. L'effetto sul pezzo è una riduzione di finitura superficiale.

In generale dunque possiamo affermare che nella fresatura in Concordanza la finitura superficiale ottima mentre in quella in discordanza la finitura è buona, ma non ottima. Inoltre è possibile dedurre che un materiale duro è preferibile lavorarlo con una fresatura in discordanza.



Fresatura in discordanza



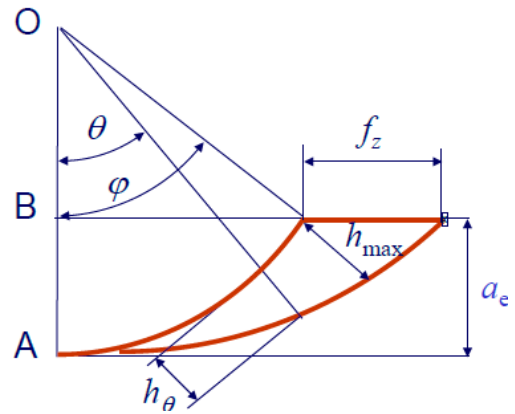
Fresatura in concordanza

### Analisi spessore truciolo e forze

Prima di analizzare la forza di taglio in funzione del tempo definiamo una serie di parametri:

- $Z$  numero di denti della fresa
- $D$  diametro della fresa
- $a_e$  profondità di passata radiale
- $a_p$  profondità di passata assiale
- $\rho$  angolo di contatto o di lavoro
- $\vartheta$  angolo che definisce la posizione di ogni dente
- $h_\vartheta$  altezza truciolo del in posizione  $\vartheta$
- $h_m$  altezza media truciolo
- $f_z$  avanzamento per dente

$$f = f_z Z$$



Lo spessore del truciolo in una generica posizione  $\vartheta$  può essere calcolato come:

$$h_\vartheta \cong f_z \sin \vartheta$$

Si può invece ricavare lo spessore medio del truciolo con il seguente procedimento:

$$h_m = \frac{1}{\rho} \int_0^\rho h_\vartheta d\vartheta = \frac{1}{\rho} \int_0^\rho f_z \sin \vartheta d\vartheta = \frac{f_z}{\rho} \int_0^\rho \sin \vartheta d\vartheta = \frac{f_z}{\rho} (1 - \cos \vartheta)$$

$$a_e = \frac{D}{2} - \frac{D}{2} \cos \vartheta = \frac{D}{2} (1 - \cos \vartheta)$$

$$1 - \cos \vartheta = \frac{2a_e}{D}$$

$$h_m = \frac{f_z}{\rho} (1 - \cos \vartheta) = \frac{2f_z a_e}{D\rho}$$

È importante sottolineare che lo spessore medio del truciolo non dipende in alcun modo dal tempo e inoltre è identico se calcolato in concordanza o in discordanza. Poiché lo spessore del truciolo varia, varierà anche la sezione di truciolo nella posizione  $\vartheta$  può essere scritta come:

$$A_{\vartheta} = h_{\vartheta} b$$

Se  $\vartheta = \omega t$  si ha che  $\kappa = 90^\circ$  e  $b = a_p$  quindi:  $A_{\vartheta} = h_{\vartheta} a_p$ . Definiamo inoltre numero medio di taglienti, o denti, in presa  $z$  il rapporto:

$$z = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{Z}{2\pi} \rho$$

Analizziamo ora la forza di taglio in funzione del tempo nei due casi di fresatura periferica mediante il seguente grafico:

Deduciamo che la forza in funzione del tempo ha un comportamento ciclico. Inoltre notiamo che, se si analizzano più denti, questi hanno un comportamento che è sfasato nel tempo. Come è facile intuire la lavorazione necessita di più denti di presa, che ricordiamo non asportano la stessa quantità di materiale a causa dello sfasamento di tempo.

La fresa possono essere di due tipi in base al numero di denti che la compongono:

- a. Molti denti in fresa = numero di denti estremamente elevato. In questo caso si ragiona in termini di forza media e spessore di truciolo medio. Se i denti in fresa sono molti allora  $\rho_0$  è molto piccolo e dunque si può lavorare con una forza complessiva totale media. Questo perché la forza non è molto influenzata dall'andamento di un singolo dente. Per questo tipo di fresa ci si basa dunque sullo spessore e sulla forza media. Questo approccio si usa quando il numero medio di denti in presa è maggiore di 2. La forza di taglio media può dunque essere calcolata come:

$$F_{c,m} = k_{c,m} A_m = k_{c,m} h_m a_p$$

$$k_{c,m} = k_{cs} h_m^{-x}$$

$$M_{c,m} = F_{c,m} \frac{D}{2}$$

$$M_c \cong zM_{c,m}$$

$$P_c = \frac{M_c \omega}{\eta}$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$h_m = \frac{2f_z a_e}{D\rho}$$

$$z = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{Z}{2\pi} \rho$$

$$P_c = \frac{M_c \omega}{\eta} = \frac{zM_{c,m} 2\pi n}{\eta 60} = \frac{zF_{c,m} D 2\pi n}{2\eta 60} = \frac{zk_{c,m} h_m a_p D 2\pi n}{2\eta 60} = \frac{Z}{2\pi} \rho \frac{k_{c,m} f_z a_e a_p D 2\pi n}{2\eta D \rho 60} = \frac{k_{c,m} f_z a_e a_p Z n}{60\eta}$$

$$v_f = f_z Z n$$

$$P_c = \frac{k_{c,m} a_e a_p v_f}{60 * 1000 * \eta}$$

- b. Pochi denti in fresa = numero di denti basso. In questo caso occorre analizzare la forza su ogni dente e considerare quella massima che rappresenterà la fase critica. Per questo tipo di fresa ci si basa dunque sullo spessore istantaneo e sulla forza massima. Questo approccio si usa quando il numero medio di denti in presa è minore di 2. In questo caso quindi si calcola la forza di taglio massima che si ha in corrispondenza della sezione più critica  $h_\vartheta$  quando  $\vartheta = \rho$ :

$$F_{c,max} = \sum_{i=1}^{k < z} F_{ci,dente}(\vartheta_i)$$

$$\vartheta_i = \rho$$

Questa espressione vale sia per la condizione in concordanza che per quella in discordanza. Per essere in presa un dente deve avere un angolo  $\vartheta$  compreso tra 0 e  $\rho$ . Se  $\vartheta_i < 0$  il dente non è da considerare in presa; sarà un dente in .... È possibile riconoscere  $F_{c,max}$  in corrispondenza della sezione id uscita poiché è possibile affermare che il truciolo è ... ed è massima  $h$ . Per la fresatura frontale non è così banale. In questo caso analizziamo ciò che riguarda:

- Primo dente è la condizione più critica:  $\vartheta = \rho$ .

$$\frac{k_{cs}}{h_{\vartheta_1}^k} = k_{c1}$$

$$F_{c1} = \frac{k_{cs}}{h_{\vartheta_1}^k} h_{\vartheta_1} a_p = k_{c1} h_{\vartheta_1} a_p$$

$$M_{c1} = F_{c1} \frac{D}{2}$$

$$P_{c1} = M_{c1} \omega$$

- Secondo dente

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 - \rho_0$$

$$F_{c2} = \frac{k_{cs}}{h_{\vartheta_2}} h_{\vartheta_2} a_p = k_{c2} h_{\vartheta_2} a_p$$

$$M_{c2} = F_{c2} \frac{D}{2}$$

$$P_{c2} = M_{c2} \omega$$

Si avranno forze via via più piccole sui denti successivi.

### Rugosità superficiale

Si può calcolare la rugosità superficiale come:

$$R_t = y \left( \frac{hz}{2} \right)$$

Il moto traslazionale combinato con il moto rotazionale sullo stesso piano dà origine a un moto elicoidale. Si può osservare che il truciolo avrà spessore variabile e si potrà notare che sul pezzo rimane una traccia di passo  $f_z$  caratterizzata da un'altezza cresta-valle determinabile geometricamente. La traiettoria di questo moto elicoidale può essere scritta come:

$$\begin{cases} x = v_f t + \frac{D}{2} \sin \omega t \\ y = \frac{D}{2} (1 - \cos \omega t) \end{cases}$$

$\sin \omega t \cong \omega t$  per angoli piccoli

$$\frac{f_z}{2} = v_f t + \frac{D}{2} \omega t$$

$$\omega t = \frac{\frac{f_z}{2}}{\frac{v_f}{\omega} + \frac{D}{2}}$$

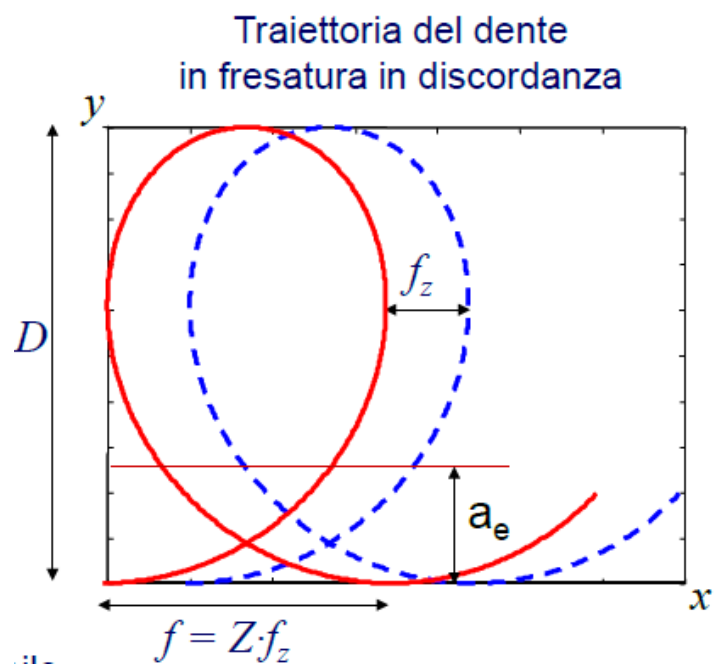
$$t = \frac{\frac{f_z}{2}}{\omega R + v_f}$$

$$\omega R = v_c \gg v_f \rightarrow \omega t = \frac{\frac{f_z}{2}}{\frac{D}{2}} = \frac{f_z}{D}$$

$$y = \frac{D}{2} (1 - \cos \omega t) = \frac{D}{2} \left( 1 - \cos \frac{f_z}{D} \right)$$

Ricordando Taylor si può scrivere che:

$$\cos \omega t \cong 1 - \frac{1}{2} \omega^2 t^2 + o(\omega^2 t^2)$$





Quindi si può riscrivere:

$$y = \frac{D}{2} \left( 1 - \cos \frac{f_z}{D} \right) = \frac{D}{2} \left( 1 - 1 + \frac{1}{2} \frac{f_z^2}{D^2} \right) = \frac{f_z^2}{4D}$$

$$y = y \left( \frac{f_z}{D} \right) = R_t = \frac{f_z^2}{4D} = \frac{f_z^2}{8R}$$

$$R_a = \frac{R_t}{4}$$

$$R_a = \frac{f_z^2}{32R}$$

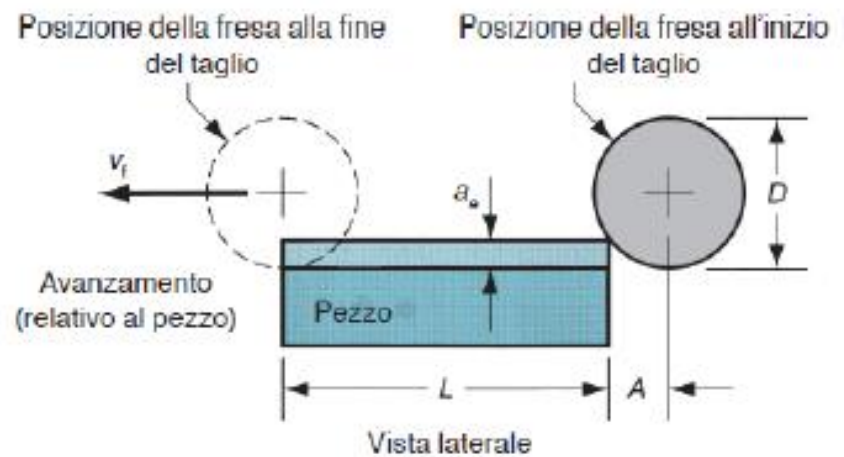
### Tempo di taglio in fresatura periferica

Il tempo necessario per fresare un pezzo di lunghezza L deve tener conto della distanza d'avvicinamento necessaria a impegnare tutta la fresa. Per determinare il tempo necessario a eseguire questa operazione occorre aggiungere alla lunghezza L del pezzo la distanza di avvicinamento A per raggiungere la profondità finale. Tale valore può essere ricavato come:

$$A = \sqrt{a_e(D - a_e)}$$

Il tempo in cui la fresa è impegnata nella lavorazione sarà dunque calcolabile come:

$$T_m = \frac{L + A}{v_f}$$



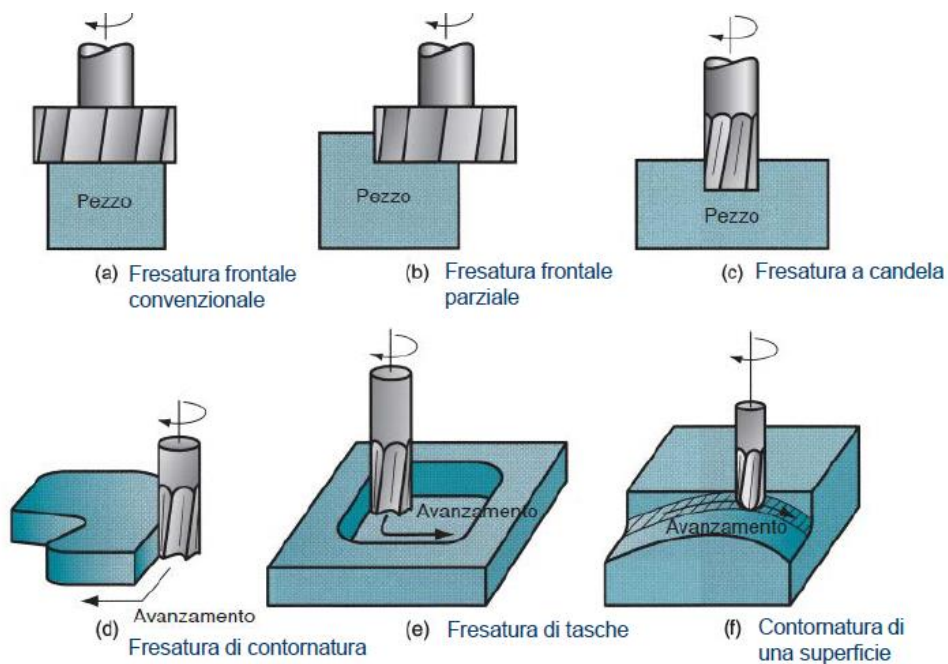
## Fresatura frontale

### Esempi di lavorazione

Nella fresatura frontale l'asse della fresa è perpendicolare alla superficie del pezzo e la lavorazione viene eseguita dai taglianti sia sul fondo sia sulla superficie periferica della fresa. Analizziamo ora alcune lavorazioni che utilizzano fresatura frontale:

- Convenzionale = il diametro della fresa è maggiore della larghezza del pezzo da fresare così che i bordi della fresa si estendano oltre il pezzo
- Parziale = la fresa si estende solo su un lato del pezzo
- A candela = il diametro della fresa è inferiore alla larghezza del pezzo al scopo di creare delle cave
- Di contornatura = si effettua il taglio sulla superficie di un pezzo piano determinandone il contorno. Generalmente in questi casi la superficie che si sta lavorando è quella laterale, ma il pezzo ha una superficie piana maggiore di quella laterale
- Di tasche = Si lavora sia la superficie laterale che quella piana con il fine di ottenere delle tasche poco profonde in pezzi piani
- Contornatura di una superficie = lavorazione con fresa frontale di una superficie non piana, curva con un profilo generico. Generalmente la fresa è a punta sferica e viene fatta avanzare avanti e indietro a passo stretto lungo un percorso curvilineo per creare una forma tridimensionale sulla superficie del pezzo. Si deve dunque dare un moto di avanzamento che replichi la geometria necessaria. In questo tipo di fresatura si controllano in modo puntuale gli assi della macchina. Il programma part programme è una sequenza di passaggi.



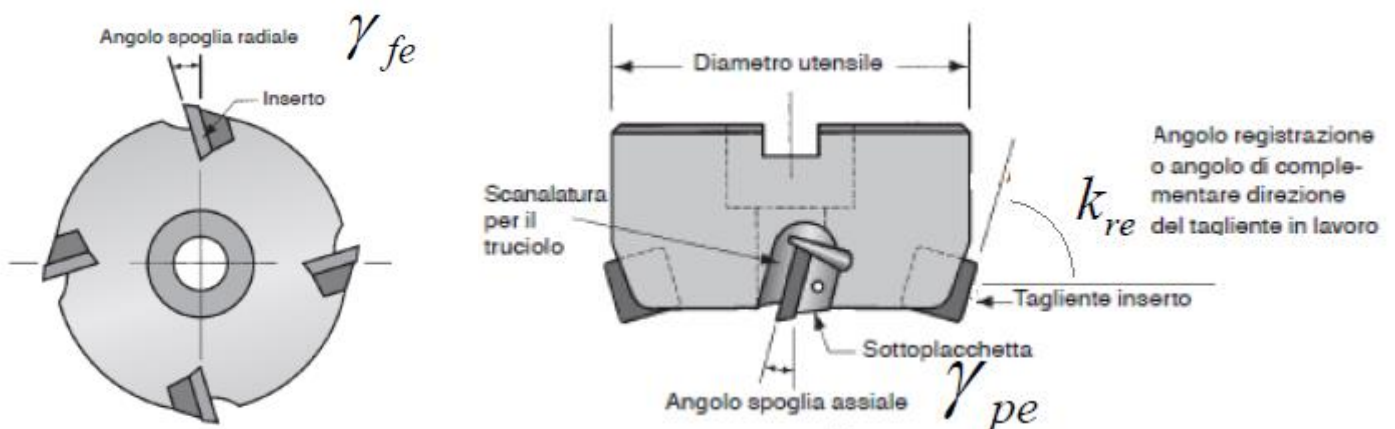


## Angoli

Nella fresatura frontale occorre distinguere due diversi tipologie di angoli di spoglia; tali angoli si distinguono in base al piano con cui si ottiene la sezione in cui li si identificano. Generalmente nella fresatura frontale gli inserti taglienti dell'utensile sono disposti sulla superficie della fresa in un unico strato o in più strati. In questa fresatura il tagliente principale è quello che si affaccia sulla superficie laterale mentre il tagliente secondario si affaccia sulla superficie inferiore del pezzo. La fresa ha dunque un'azione sia sulla superficie laterale che su quella inferiore. I due piani principali che permettono di ottenere i due angoli di spoglia sono:

- Assiale = è il piano parallelo all'asse passante per il tagliente principale. L'angolo di spoglia assiale è compreso tra il tagliente e la verticale. Figura a diapositiva 13.
- Radiale = è il piano perpendicolare all'asse della fresa passante per il tagliente principale. L'angolo di spoglia radiale è quello compreso tra il tagliente principale e il raggio fresa.

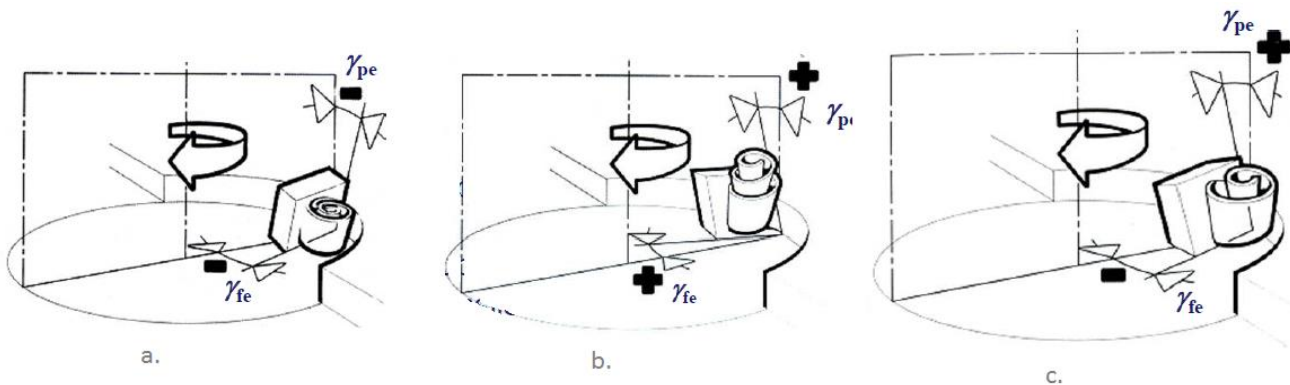
Oltre a questi due angoli introduciamo anche l'angolo di registrazione è il complementare a novanta dell'angolo ottenuto dalla direzione del tagliente principale.



Tali angoli possono essere positivi o negativi; in funzione della combinazione tra i tipi di angoli di spoglia assiale e radiale, positivi o negativi, si hanno diverse configurazioni geometriche:

- Geometria doppia positiva = angolo di spoglia radiale e angolo di spoglia assiale positivo. Si utilizza quando si hanno materiale e condizioni dolci. Dunque può lavorare con forze e potenze limitate. Il truciolo tende ad allontanarsi dalla superficie di lavorazione senza troppi problemi

- b. Geometria doppia negativa = angolo di spoglia radiale e angolo di spoglia assiale negativi. Si utilizza quando si hanno forze alte, potenze alte e materiali più resistenti. Il truciolo tende ad andare sulla superficie appena lavorata cioè sulla superficie inferiore
- c. Geometria positiva/negativa = un angolo è positivo mentre l'altro è negativo. Le potenze sono medie così come le forze.



### Analisi spessore truciolo e forze

Prima di analizzare la forza di taglio in funzione del tempo definiamo una serie di parametri e riprendiamo alcune formule che useremo più avanti:

$Z$	numero di denti della fresa
$D$	diametro della fresa
$a_e$	profondità di passata radiale
$a_p$	profondità di passata assiale
$\rho$	angolo di contatto o di lavoro
$\vartheta$	angolo che definisce la posizione di ogni dente
$h_\vartheta$	altezza truciolo del in posizione $\vartheta$ sul piano
$h_m$	altezza media truciolo
$h_D$	spessore truciolo istantaneo
$f_z$	avanzamento per dente
$Q$	tasso di asportazione del materiale

$$v_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad [m/min]$$

$$n = \frac{1000 v_c}{\pi D} \quad [giri/min]$$

$$f = f_z Z$$

$$v_f = f n = f_z Z n$$

$$Q = a_p a_e v_f$$

Lo spessore del truciolo istantaneo può essere calcolato come:

$$h_D = h_\vartheta \sin \chi$$

Se  $\vartheta = 0$ :

$$h_\vartheta = f_z$$

Se  $\vartheta \neq 0$ :

$$h_\vartheta \cong f_z \cos \vartheta$$

In generale però lo spessore del truciolo così come il calcolo della forza deve, anche in questo tipo di fresatura, essere calcolato in due modi diversi a seconda del numero medio di taglienti in presa:

- Numero minore o uguale a 2:

$$h_{\vartheta_i} = f_z \cos \vartheta_i$$

$$F_{ci} = k_{cs} h_{\vartheta_i}^{-x} h_{\vartheta_i} b = k_{cs} h_{\vartheta_i}^{1-x} a_p = k_{cs} (f_z \cos \vartheta_i)^{1-x} a_p$$

- Numero maggiore o uguale a 2:

$$h_m = \frac{1}{\rho} \int_{-\rho_1}^{\rho_2} f_z \cos \vartheta d\vartheta = \frac{f_z}{\rho} \int_{-\rho_1}^{\rho_2} \cos \vartheta d\vartheta = \frac{f_z}{\rho} [\sin \rho_1 + \sin \rho_2]$$

$$L_1 = \frac{D}{2} \sin \rho_1$$

$$L_2 = \frac{D}{2} \sin \rho_2$$

$$a_e = L_1 + L_2 = \frac{D}{2} \sin \rho_1 + \frac{D}{2} \sin \rho_2 = \frac{D}{2} [\sin \rho_1 + \sin \rho_2]$$

$$\sin \rho_1 + \sin \rho_2 = \frac{2a_e}{D}$$

$$h_m = \frac{f_z}{\rho} [\sin \rho_1 + \sin \rho_2] = \frac{f_z}{\rho} \frac{2a_e}{D}$$

$$A_m = h_m a_p = \frac{f_z}{\rho} \frac{2a_e}{D} a_p$$

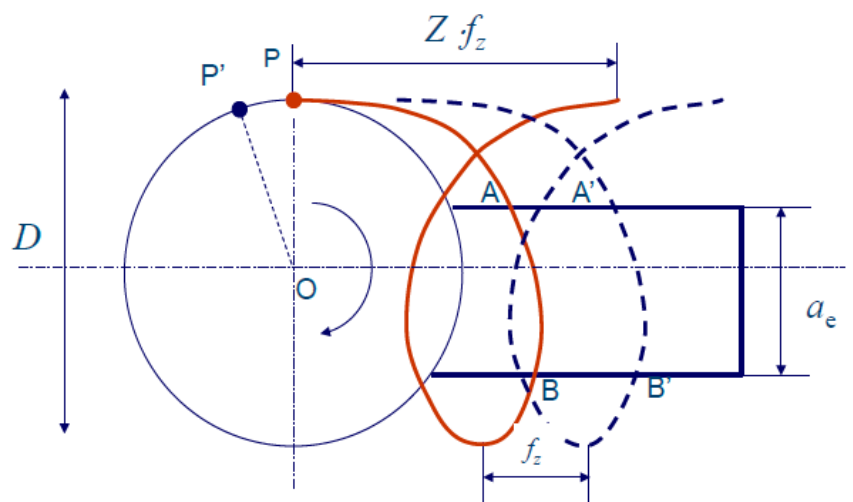
$$F_{cm} = \frac{k_{cs}}{[h_m \sin \chi]^x} A_m = \frac{k_{cs}}{[h_m \sin \chi]^x} h_m a_p$$

$$M_{cm} = F_{cm} \frac{D}{2}$$

$$P_{cm} = M_{cm} \omega$$

### Moto fresatura frontale

Nella fresatura frontale la traiettoria di un dente può essere rappresentata con delle cicloidi così come nel caso di fresatura periferica; tali traiettorie non sono però interessanti per determinare la rugosità. Tralasciamo questo aspetto della rugosità della fresatura frontale in quanto piuttosto complesso.



## Tempo di taglio in fresatura frontale

Il tempo necessario per fresare un pezzo di lunghezza  $L$  deve tener conto della distanza d'avvicinamento necessaria a impegnare tutta la fresa. Per determinare il tempo necessario a eseguire questa operazione occorre aggiungere alla lunghezza  $L$  del pezzo la distanza di avvicinamento  $A$  per raggiungere la profondità finale. Tale valore può essere ricavato in due modi diversi a seconda della situazione:

Per la fresatura frontale analizziamo due diversi casi:

- La fresa è allineata a un pezzo rettangolare. Se la fresa avanza da destra a sinistra lungo tutto il pezzo affinché essa copra la larghezza completa del pezzo essa deve raggiungere la distanza:

$$A = 0,5(D - \sqrt{D^2 - a_e})$$

- La fresa viene posta lateralmente e non allineata al pezzo. In questo caso la distanza di ingresso è data da:

$$A = \sqrt{a_e(D - a_e)}$$

Il tempo in cui la fresa è impegnata nella lavorazione sarà dunque calcolabile come:

$$T_m = \frac{L + A}{v_f}$$

