

Teoria della lavorazione per asportazione di truciolo

Sono una serie di lavorazioni di formatura che utilizzano un utensile da taglio per asportare parte del materiale fino ad ottenere la forma finale desiderata.

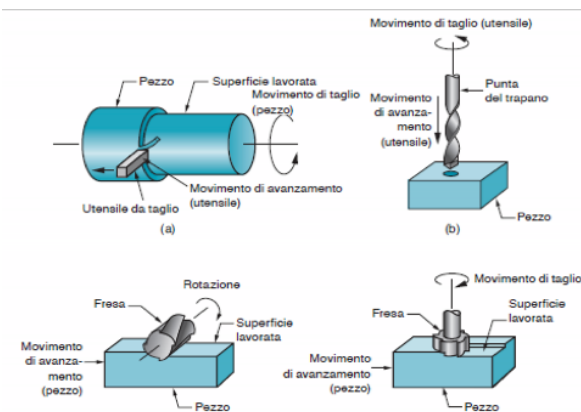
Questi processi sono ritenuti importanti per diversi motivi:

- Varietà di materiali lavorati
- Varietà di forme e di geometrie dei pezzi
- Precisione dimensionale (0.025 mm)
- Buona finitura superficiale (0.4 micron)

Nonostante questi aspetti positivi ci sono anche aspetti negativi:

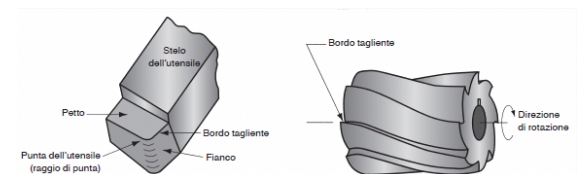
- Spreco di materiale (truciolo)
- Tempo: queste lavorazioni di formatura richiedono Maggiore tempo rispetto alla forgiatura o alla colata

Tutti processi di asportazione necessitano l'utilizzo di un utensile da taglio e di conseguenza di un movimento relativo tra il pezzo e l'utensile. Tale movimento è scomponibile in un movimento primario detto **movimento di taglio** e un movimento secondario detto **movimento di avanzamento**.



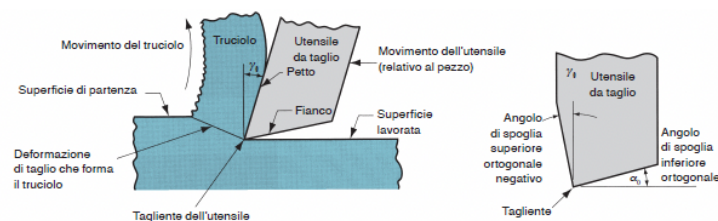
Le principali lavorazioni per asportazione di truciolo sono:

- Tornitura (a)
- Foratura (b)
- Fresatura periferica
- Fresatura frontale



Nella tornitura di solito si utilizzano utensili monotaglienti mentre nelle altre due si utilizzano utensili con due (foratura) o più taglienti (fresatura)

Utensile da taglio



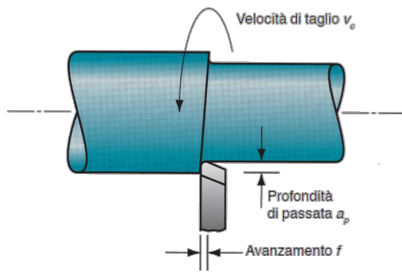
Un utensile da taglio ha uno o più bordi taglienti (che servono per separare il truciolo dal pezzo da lavorare) ed è costituito da un materiale più duro del materiale da lavorare.

Le due superfici principali dell'utensile sono il petto e il fianco.

Petto → dirige il flusso dei trucioli eventi nato di un certo angolo rispetto ad un piano perpendicolare alla superficie lavorata. Questo angolo prende il nome di angolo di **spoglia superiore ortogonale** γ_0 che può essere sia positivo che negativo.

Fianco → ha il compito di mantenere una distanza tra il materiale già lavorato (superficie lavorata) e l'utensile in modo da non rovinare la finitura superficiale. Questa superficie è caratterizzata dall'angolo di spoglia inferiore ortogonale α_0 .

Parametri di taglio



v_c → velocità di taglio ovvero velocità del moto primario di rotazione

f → avanzamento (movimento secondario) che è più lento rispetto all'altro

a_p → profondità di passata ovvero la penetrazione dell'utensile

Queste tre dimensioni che definiscono il processo di lavorazione possono essere utilizzate per calcolare il tasso di asportazione di materiale (material removal rate, MRR)

$$Q_{MR} = v_c f a_p$$

Solitamente

$Q \rightarrow [mm^3/s]$

$v_c \rightarrow [m/s]$

$f \rightarrow [mm]$

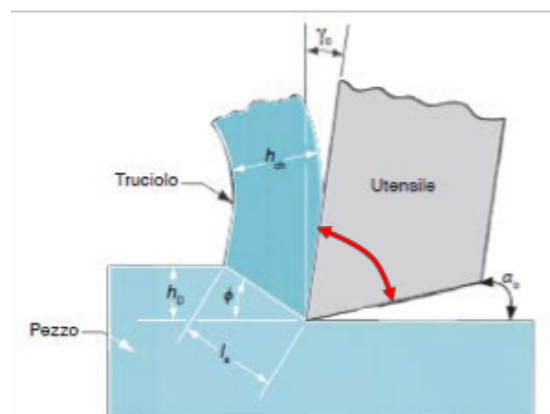
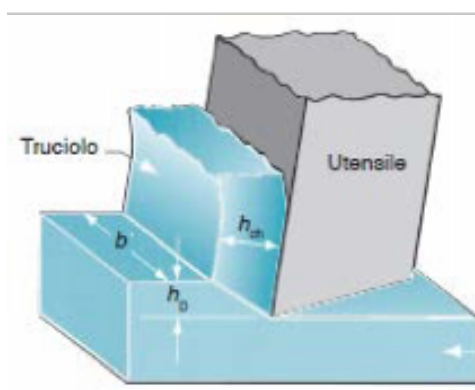
$a_p \rightarrow [mm]$

Le lavorazioni possono essere divise in due categorie:

- **Sgrossatura**: utilizzate per rimuovere grandi quantità di materiale fino a raggiungere la forma più simile a quella finale
- **Finitura**: vengono utilizzate per completare il pezzo e raggiungere la dimensione, le tolleranze dimensionali e la finitura superficiale richiesta.

Modello di taglio libero ortogonale

Sebbene il processo è in tre dimensioni questo modello semplificato ne considera solo due



Ipotesi:

- Tagliante rettilineo e ortogonale alla direzione di taglio
- Utensile più largo del pezzo (truciolo non vincolato lateralmente)
- Spessore del truciolo indeformato $h_D \ll b$

Parametri e angoli (ISO 3002/3-1984):

- Spessore di taglio (spessore del truciolo indeformato) h_D
- Spessore del truciolo h_{ch}
- Larghezza di taglio b
- Sezione del truciolo $A_D = b \cdot h_D$
- Angolo di spoglia superiore γ_0 ($-15^\circ < \gamma_0 < 30^\circ$)
- Angolo di spoglia inferiore α_0 ($2^\circ < \alpha_0 < 15^\circ$)
- Angolo solido $\beta_0 = 90^\circ - \alpha_0 - \gamma_0$

Man mano che il truciolo scorre sul petto dell'utensile il suo spessore aumenta per cui possiamo definire un ulteriore parametro chiamato **fattore di ricalcamento** o rapporto di compressione dello spessore del truciolo.

$$r_c = \frac{h_D}{h_{ch}}$$

Esprime una misura dello stato di deformazione del truciolo ed è sempre minore di uno dato che h_{ch} è sempre maggiore di h_D

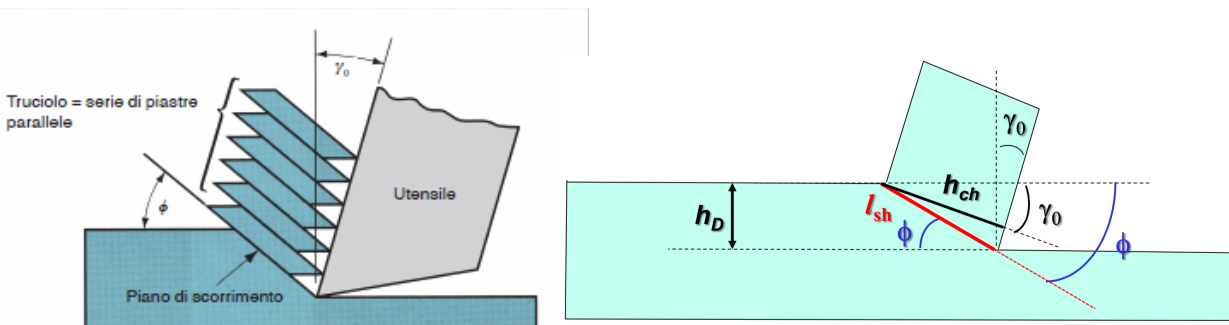
r_c può essere ricavato sperimentalmente attraverso misure di lunghezza e di massa del truciolo e sfruttando la costanza del volume e della larghezza.

$$h_D \cdot b_D \cdot l_D = h_{ch} \cdot b_{ch} \cdot l_{ch} \quad r_c = \frac{h_D}{h_{ch}} = \frac{b_{ch} \cdot l_{ch}}{b_D \cdot l_D} = \frac{l_{ch}}{l_D} \quad (b_D = b_{ch} = b)$$

$$l_D = \frac{M}{\rho h_D b_D}$$

Però c'è da tenere in considerazione che l'incertezza sperimentale è molto elevata

Determinazione dell'angolo ϕ

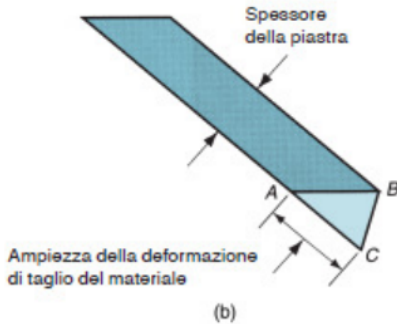


Conoscendo r_c è possibile ricavare l'angolo del piano di scorrimento. Sia l_{sh} la lunghezza del piano di scorrimento è possibile fare le seguenti sostituzioni: $h_D = l_{sh} \sin \phi$ $h_{ch} = l_{sh} \cos(\phi - \alpha)$

$$r_c = \frac{h_D}{h_{ch}} = \frac{l_{sh} \sin \phi}{l_{sh} \cos(\phi - \gamma_0)} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma_0)} \quad \rightarrow \quad \tan \phi = \frac{r_c \cdot \cos \gamma_0}{1 - r_c \cdot \sin \gamma_0}$$

Possiamo approssimare la deformazione di taglio come una serie di piastre scorrevoli una sull'altra fino a formare il truciolo come nella figura sopra.

Deformazione per sforzi di taglio $\gamma = \delta/a$ con



α_0 è fatto per evitare il riscaldamento dell'utensile e quindi lo strisciamento, che dipende dal materiale.

γ_0 è negativo per materiali fragili (ghisa), e positivo per quelli duttili (acciaio).

Se ϕ è l'arcotangente del fattore di ricalcamento, e quindi all'aumentare di ϕ , il fattore di ricalcamento aumenta, e quindi la deformazione diminuisce. Mentre se diminuisce, diminuisce anche r_c e diminuisce?? la deformazione, e quindi stiamo

facendo una lavorazione più blanda.

Il triangolo in basso è riportato come ABC e la distanza dello scorrimento è AC, quindi se calcoliamo il rapporto tra AC e BD, abbiamo per definizione di scorrimento, come detto nella lezione precedente. AC è difficile da calcolare, quindi conviene scomporlo nella somma di due segmenti.

Angoli del triangolo tutti noti, per cui FORMULA DX

Per cui più **piccolo è l'angolo di scorrimento, più sarà**

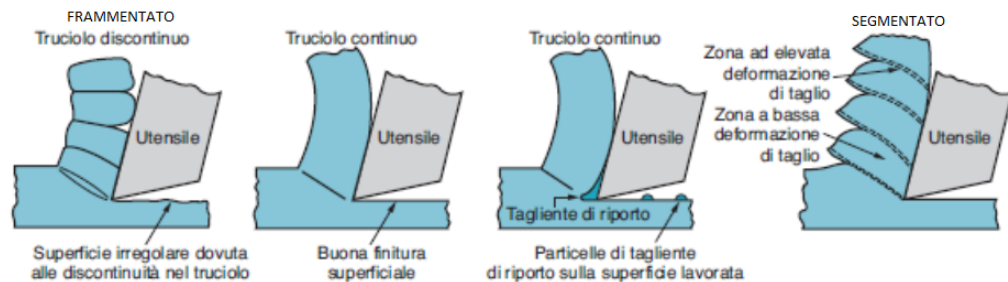
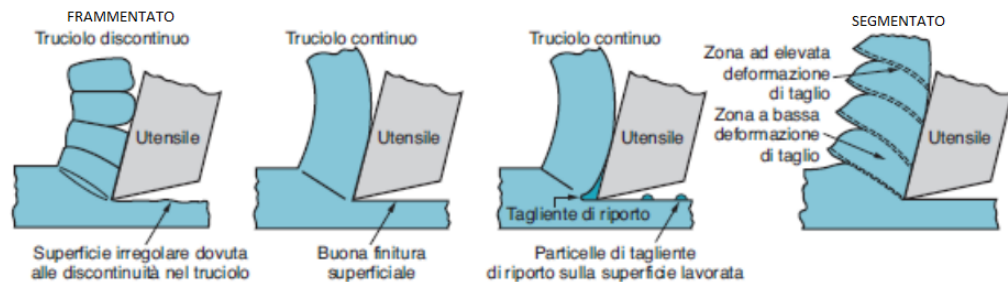
grande la deformazione

gamma.

Formazione del truciolo

Si possono distinguere quattro tipi di trucioli:

- **Discontinuo:** Materiali più fragili avranno truciolo più



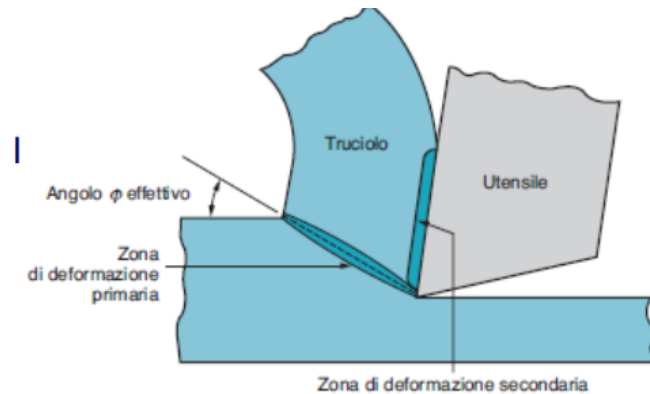
discontinuo secondo ϕ , e possono essere piani completi o incompleti se si frammentano. Sono lavorati a basse velocità e danno una struttura irregolare alla superficie lavorata. Causati da attriti elevati, da grandi valori di avanzamento e profondità di taglio.

- **Continuo:** Si possono avere dei trucioli continui con spessore uniforme e regolare per materiali duttili, lavorati con velocità, avanzamenti e profondità basse. Lavorazione che da origine ad una buona finitura: si formano per tagliente affilato e poco attrito tra utensile e truciolo. Possono avere problemi di smaltimento \rightarrow rompitruciolo.
- **Continuo con tagliante di riporto:** materiali duttili lavorati con velocità di taglio medio-bassa, l'attrito fa aderire il materiale al petto, formando il tagliante di riporto (built-up edge, BUE), che è una cosa ciclica: si forma, si ingrandisce e si stacca, portando via a volte anche pezzi dell'utensile, riducendone la durata. Parti dell'utensile possono attaccarsi alla superficie lavorata rendendola ruvida.
- **Segmentato (o a taglio localizzato):** una condizione intermedia fra questi due intermedi, che il truciolo continuo segmentato, che ha la tendenza a cambiare spessore, con piani inclinati secondo ϕ . Questo tipo di truciolo è del titanio (o nichel, acciai inossidabili austenitici) per esempio, o tutti i metalli lavorati a velocità elevate, che sono materiali ne duttili ne fragili, e anche in questo caso bisogna usar il rompitruciolo. È un truciolo semicontinuo con aspetto a denti di sega a causa delle tensioni di deformazioni variabili. Istantaneamente continua a cambiare istantaneamente la velocità di taglio e gli angoli, per cui cambiano anche le forze, e se ho un profilo sinusoidale delle forze di taglio ho delle vibrazioni, e se il macchinario va in risonanza con il truciolo si ha il chatter, che è un fenomeno catastrofico per il macchinario, quindi il truciolo segmentato è il più pericoloso dal punto di vista meccanico.

Dal punto di vista delle lavorazioni noi preferiamo un truciolo frammentato, perché quello continuo si attorciglia e si incastra, generando dei problemi. Se è naturalmente continuo le forze di tagli sono costanti, non ci sono innesti di intaglio e viene una superficie molto liscia -> dal punto di vista meccanico è conveniente che sia continuo, ma non lo è dal punto di vista della macchina per l'ingombro. Il petto allora ad un certo punto in poi cambia inclinazione, con in gamma che diventa istantaneamente da positivo a negativo, così da far rompere il truciolo -> il cambio di gamma è chiamato p: **rompitruciolo**.

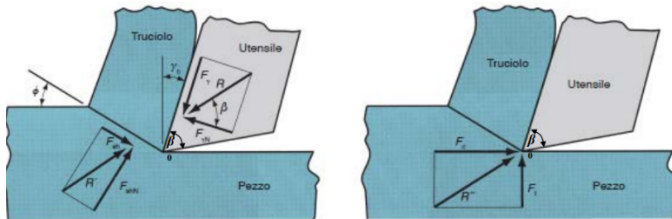
L'idea che la deformazione si trova tutta sul piano di scorrimento è ideale, rispetto ad un modello ortogonale, la deformazione si verifica in una zona e non lungo un piano. La zona deformata inoltre è di pochi centesimi di millimetro, quindi non si ha una grande perdita di precisione. In realtà si hanno tre zone di deformazione principale.

L'utensile sollecita il materiale davanti a sé finché quest'ultimo si deforma plasticamente in una **zona primaria** di deformazione. Nel taglio ortogonale si ipotizza che la zona primaria sia così stretta da essere approssimata da un piano. La deformazione si spinge fino alla separazione fra sovrametallo e pezzo. Il sovrametallo da origine al truciolo che scorre sull'utensile. Nella **Zona secondaria** avviene lo strisciamento fra truciolo e petto del tagliente. Nella **Zona terziaria** avviene lo strisciamento del dorso sulla superficie lavorata (non indicata in figura).



La zona primaria che è quella di cui abbiamo parlato fino adesso. Si ha anche una deformazione secondaria dovuta allo sforzo tau di attrito diretto come il petto dell'utensile e tende a creare della deformazione e attrito con sforzi molto elevati.

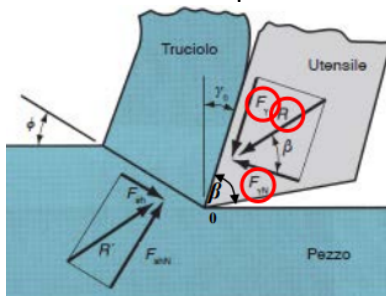
Abbiamo delle forze dovute all'attrito e allo strisciamento e si ha anche una zona terziaria perché la superficie lavorata si rigonfia e striscia sul dorso.



Tutte e tre le zone generano delle forze di tagli che hanno come **risultante R**.

R essendo un vettore possiamo scomporlo su due direzioni perpendicolari. Ne esistono tre tipiche direzioni di interesse per **scomporla nelle sue componenti**:

- PETTO: sono la direzione γ_0 del petto, ottenendo F_y e nascerà anche la sua componente normale F_{yN} .



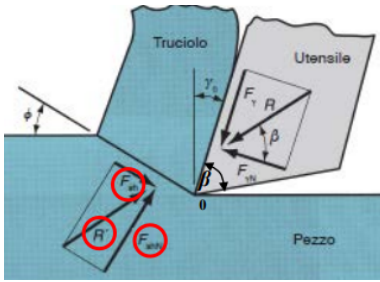
L'angolo fra R e F_{yN} è β (diverso da β_0) che dipende dall'attrito sul petto dell'utensile: **ANGOLO DI ATTRITO**

La relazione fra attrito e angolo è data dal *coefficiente di attrito coulombiano* $\mu = \tan\beta = F_y / F_{yN}$. Quindi questa coppia ci serve per **studiare l'usura** dell'utensile sul petto.

$$F_y = R \sin\beta$$

$$F_{yN} = R \cos\beta$$

- **PIANO DI SCORRIMENTO:** Secondo ϕ , come il piano di scorrimento: avremo quindi F_{sh} , e una componente normale F_{shN}



Conoscendo l_{sh} , e quindi la **sezione del truciolo deformata** $A_{sh} = \frac{b \cdot h_D}{\sin \phi}$ che è inversamente proporzionale a ϕ .

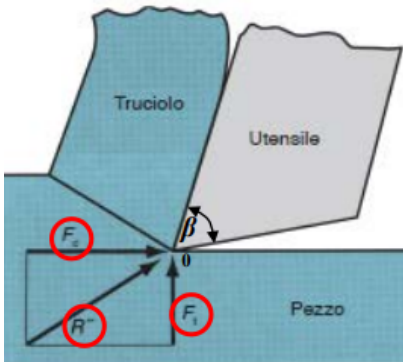
Questa visione ci serve per determinare lo sforzo di taglio $\tau = \frac{F_{sh}}{A_{sh}}$.

Da $\frac{F_{shN}}{A_{sh}} = \sigma_{sh}$ che è la tensione normale -> ci serve per

studiare la meccanica del taglio, quindi per stimare le potenze delle macchine, e quindi quelle dissipate.

NB: sono diverse da τ e σ sul petto a causa di temperatura e deformazione a taglio diverse

- **DIREZIONE DI TAGLIO:** Dal punto di vista pratico la più interessante perché è misurabile, è secondo la direzione di taglio: avremo **Fc (taglio)** e **Ff (feed)** che è **lungo la direzione di avanzamento** (perpendicolare al moto di taglio).

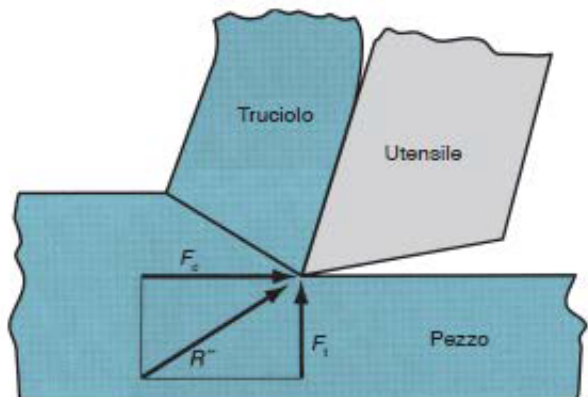
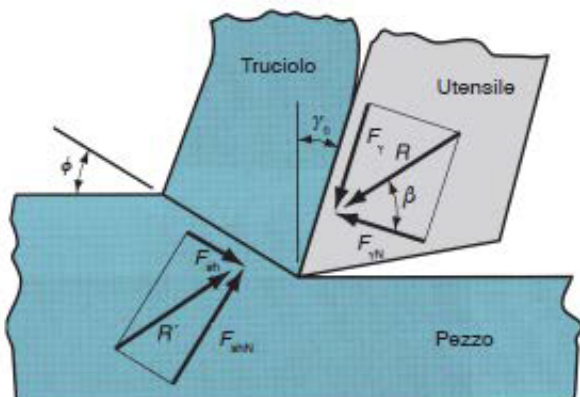


Componenti utili perché si possono misurare, sapendo la potenza dei motori elettrici, visto che sono parallele e perpendicolari alle direzioni di avanzamento e taglio. Da qui posso trovare R, ma per trovare F_y/F_{yN} devo trovare anche β , anche perché non conosciamo il coefficiente di attrito.

Tutte le macchine delle lavorazioni sono CNC (controllo numerico computerizzata) -> posizione assi nota deterministicamente->

conosco la velocità. Per conoscere la forza dovrei mettere dei sensori di forza (celle di carico), ma nessuno li mette perché si rompono. La misuro attraversamento la potenza impiegata dai motori attraverso l'energia elettrica, oltre ai rendimenti. Noti i ragionamenti trigonometrici si ricavano le alte forze.

Forze di taglio



PETTO

F_γ è la forza tangente al petto dell'utensile e descrive la forza di attrito che si oppone al movimento del truciolo lungo il petto dell'utensile.

$F_{\gamma N}$ è la forza perpendicolare alla forza di attrito e queste due forze possono essere utilizzate per definire il coefficiente di attrito tra il truciolo e il petto. $\mu = \frac{F_\gamma}{F_{\gamma N}}$

Se sommiamo vettorialmente le forze otteniamo la risultante **R** che è orientata di un angolo β che chiamiamo angolo di attrito e vale la relazione $\mu = \tan \beta$

PIANO DI SCORRIMENTO

Oltre alle forze del petto ci sono altre due forze che agiscono sul truciolo e sono le forze lungo il piano di scorrimento e ortogonali al piano di scorrimento.

F_{sh} è la forza lungo il piano di scorrimento e causa la deformazione del truciolo

F_{shN} forza normale al piano di scorrimento

quindi possiamo definire lo sforzo di taglio che agisce lungo il piano di scorrimento tra il pezzo e il truciolo che è definito come:

$$r_{sh} = \frac{F_{sh}}{A_{sh}} \text{ dove } A \text{ è l'area del piano di scorrimento che può essere calcolata come } A_{sh} = \frac{h_0 b}{\sin \phi}$$

questo parametro è importante perché descrive il livello di sforzo richiesto per eseguire la lavorazione e quindi questo sforzo sarà uguale alla resistenza al taglio del materiale da lavorare nelle stesse condizioni in cui avviene il taglio: ($\tau_{sh} = \tau_{max}$)

La forza risultante dalle due forze si chiama R' che dovrà essere in modulo uguale a R affinché le forze le forze che agiscono sul truciolo siano in equilibrio.

Nessuna delle quattro forze sopra descritte può essere misurata direttamente dalla lavorazione ma è possibile usare un dinamometro per poter misurare altre due componenti di forza che agiscono sull'utensile.

AVANZAMENTO

F_c **forza di taglio** nella direzione del moto di taglio, ovvero nella stessa direzione della velocità di taglio

F_f **forza di avanzamento** che è perpendicolare alla forza di taglio e dipende dallo spessore del truciolo indeformato h_0

queste due forze sono note e possono essere misurate allineando in modo adeguato i dinamometri durante la lavorazione e di conseguenza possiamo ricavare le altre forze in modo indiretto solo con l'uso della trigonometria.

$$F_\gamma = F_c \sin(\gamma_0) + F_f \cos(\gamma_0)$$

$$F_{\gamma N} = F_c \cos(\gamma_0) - F_f \sin(\gamma_0)$$

$$F_{sh} = F_c \cos \phi - F_f \sin \phi$$

$$F_{shN} = F_c \sin \phi + F_f \cos \phi$$

da queste relazione capiamo che la forza di taglio e la forza di avanzamento sono legate alla resistenza del materiale lavorato e quindi in modo più diretto possono essere definite utilizzando la formula $F_{sh} = \tau_{sh} A_{sh}$:

$$F_c = \frac{F_{sh} \cos(\beta - \gamma_0)}{\cos(\phi + \beta - \gamma_0)}$$

$$F_t = \frac{F_{sh} \sin(\beta - \gamma_0)}{\cos(\phi + \beta - \gamma_0)}$$

$$F_c = R \cos(\beta - \gamma_0) \rightarrow F_c = \frac{F_{sh} \cdot \cos(\beta - \gamma_0)}{\cos(\phi + \beta - \gamma_0)} \rightarrow F_c = \tau_{sh} \cdot \frac{A_D \cdot \cos(\beta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}$$

Dipendenza della risultante dalla forza lungo il piano di scorrimento

Dipendenza della forza lungo il piano di scorrimento dalla τ_{sh}

$$\rightarrow F_c = \tau_{sh} \cdot \frac{h_D b \cos(\beta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}$$

$$\rightarrow F_f = \frac{F_{sh} \sin(\beta - \gamma_0)}{\cos(\phi + \beta - \gamma_0)} = \tau_{sh} \cdot \frac{h_D b \sin(\beta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}$$

Possiamo sapere quale è lo sforzo di taglio del materiale?

Si è la resistenza allo snervamento del taglio per cui τ_{sh} è una proprietà del materiale che sarà variabile con la velocità di taglio e con la temperatura.

L'equazione di Merchant (per stima di ϕ)

Merchant è stato un ricercatore che ha trovato un modello per calcolare ϕ conoscendo la minima energia del materiale.

Minima energia dissipata vorrà dire la minima forza di taglio perché la velocità è imposta. La potenza assorbita nel taglio è assorbita principalmente da F_c . Per minimizzare questo valore dobbiamo derivare questa funzione rispetto a ϕ e vedere dove è uguale a zero.

Ipotesi:

- modello di formazione del truciolo a piano di scorrimento, taglio ortogonale, assenza attrito sul dorso, attrito a coefficiente costante sul petto
- τ_{sh} costante e tipica del materiale (effetti trascurati: temperatura, def. angolare, velocità di def. angolare (τ_{sh} ottenibile da esperimenti specifici)
- giacitura del piano di scorrimento (luogo dove si raggiunge il valore massimo della τ_{sh}) disposta in modo tale che l'energia assorbita nel taglio sia minima

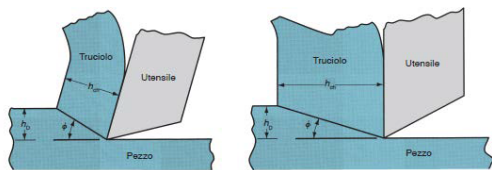
$$\tau_{sh} = \frac{F_{sh}}{A_D / \sin \phi} = \frac{F_c \cos \phi - F_f \sin \phi}{h_D b / \sin \phi}$$

Inizia con la definizione di tensione tangenziale di taglio sul piano di scorrimento. C'è un angolo ϕ che predomina: questo angolo sarà tale per cui la tensione di taglio è pari alla resistenza al taglio del materiale, per tutti gli altri angoli possibili la tensione di taglio è inferiore alla resistenza al taglio per cui non si può verificare la formazione del truciolo. In effetti il materiale lavorato segue un angolo del piano di taglio piano che minimizza l'energia.

Dalla **minimizzazione dell'energia** richiesta si ottiene la relazione:

$$\phi = 45 + \frac{\gamma_0}{2} - \frac{\beta}{2}$$

Conseguenze dell'equazione di Merchant:



definisce la relazione tra angolo di spoglia superiore ortogonale, l'attrito con l'utensile e l'angolo del piano di scorrimento del truciolo. E da qui ricaviamo che l'angolo del piano di scorrimento può essere

aumentato (1) aumentando l'angolo di spoglia superiore (2) diminuendo l'angolo di attrito o il coefficiente di attrito tra utensile e pezzo.

L'importanza di aumentare l'angolo del piano di scorrimento è che questo causa un'area del piano minore E poiché la resistenza al taglio si applica su quest'area la forza di taglio per formare il truciolo diminuisce a ridursi di tale area. Per cui serve una potenza minore per la lavorazione.

Relazioni di potenza ed energia nella lavorazione per asportazione di truciolo

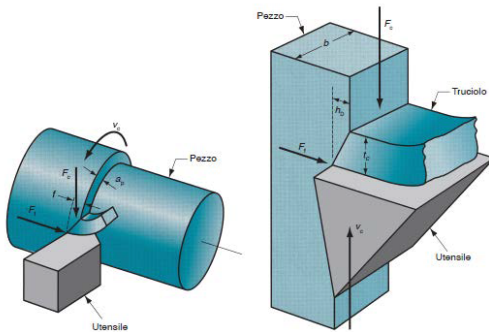


TABELLA 13.1 Conversioni tra tornitura e taglio ortogonale.

Operazione di tornitura	Modello di taglio ortogonale
Avanzamento $f =$	Spessore del truciolo
Profondità di passata $a_p =$	Larghezza di taglio indeformato h_D
Velocità di taglio $v_c =$	Velocità di taglio v_c
Forza di taglio $F_c =$	Forza di taglio F_c
Forza di avanzamento $F_f =$	Forza di avanzamento F_f

(approssimazione a tornitura e taglio ortogonale)
Una lavorazione richiede potenza che è data dal prodotto tra forza di taglio e velocità di taglio.

$$P_c = F_c v_c + F_f v_f$$

Il termine a sinistra indica la potenza di taglio mentre il termine a destra indica la potenza di avanzamento. In generale il secondo termine risulta trascurabile perché è molto più piccolo del primo quindi non lo consideriamo nel calcolo.

In generale ci sono sempre anche delle perdite di potenza dovute ad attriti e rendimenti delle macchine quindi $P_g = P_c / \eta$

Di solito il rendimento di queste lavorazioni si aggira intorno al 90%

Spesso è utile convertire la potenza in potenza per unità di volume di materiale asportato E questa grandezza viene chiamata pressione di taglio k_c .

$$k_c = \frac{P_c}{Q} = \frac{F_c v_c}{v_c h_D b} = \frac{F_c}{h_D b}$$

k_c dimensionalmente è una pressione ma fisicamente non è una pressione ma una potenza fratto unità di volume asportato nel tempo in quanto non è F_c che agisce su questa sezione ma è $F_c h$ che ci agisce per cui non è una pressione.

la **pressione di taglio** k_c non è costante, ma dipende:

- spessore di truciolo indeformato
- dall'area della sezione del truciolo indeformato A_D
- dalle proprietà meccaniche del materiale in lavorazione (carico di rottura, durezza, struttura cristallina (v. trattamenti termici))
- dal materiale dell'utensile e dalla geometria del tagliente (in particolare da γ_0)
- dalla velocità di taglio v_c
- dalle condizioni di lubrificazione della zona di taglio



I valori di k_c ottenuti attraverso misure della F_c sono validi solo per le condizioni adottate nella sperimentazione

Definizione di Kronenberg

$$k_c = \frac{F_c}{A_d} \quad (\text{UNI ISO 3002/4})$$

Kronenberg ha ricavato un'espressione in funzione di h e b che è fatta così:

$$k_c = \frac{k_{cs}}{h_D^x b^y}$$

- k_{cs} pressione di taglio specifica per asportare una sezione di truciolo di 1 mm^2 con $h_D = 1 \text{ mm}$ e $b = 1 \text{ mm}$ (dipende dal materiale da lavorare)

- x costante dipendente dal materiale dell'utensile

Con gli attuali materiali per utensili $y=0$ per cui la formula si semplifica

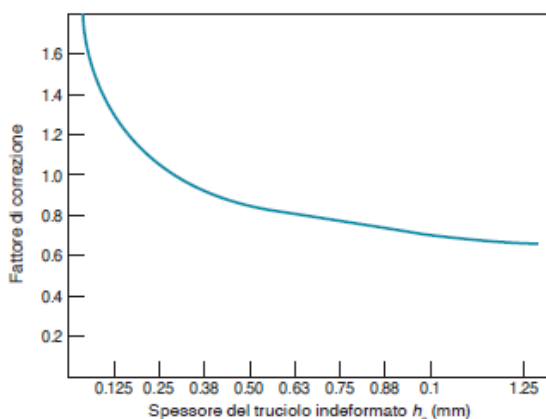


TABELLA 13.2 Valori di potenza di taglio per unità di volume e pressione di taglio per alcuni materiali lavorati con utensili da taglio a spigolo vivo e con uno spessore del truciolo indeformato pari a 0.25 mm.

Materiale	Durezza Brinell	Pressione di taglio k_c o potenza di taglio per unità di volume p_c
		N/mm ²
Acciaio al carbonio	150-200	1600
	201-250	2200
	251-300	2800
Leghe di acciaio	200-250	2200
	251-300	2800
	301-350	3600
	351-400	4400
Ghise	125-175	1100
	175-250	1600
Acciaio inossidabile	150-250	2800
Alluminio	50-100	700
Leghe di alluminio	100-150	800
Ottone	100-150	2200
Bronzo	100-150	2200
Leghe di magnesio	50-100	400

Fonti [6], [8], [11] e altre.

Se ad esempio lo spessore del truciolo indeformato è diverso da 0.25mm allora ci sarà un fattore di conversione da applicare

In questo modello ignoriamo la dipendenza da altri fattori come ad esempio l'angolo di spoglia frontale.

Metodi analitici di calcolo delle temperature di taglio

Dell'energia totale consumata nella lavorazione per asportazione di truciolo quasi tutta viene convertita in calore (98%) che provoca temperature molto elevate sulla superficie di contatto tra l'utensile e la superficie lavorata spesso oltre i 600°. Il restante dell'energia residua viene trattenuta dal truciolo sotto forma di energia elastica (2%).

Se la lavorazione è ad alte temperature si riduce la durata dell'utensile, causa una dilatazione termica del materiale lavorato con conseguenti imprecisioni dimensionali e può creare microsaldature sul materiale lavorato.

Metodo di Cook

L'equazione di Cook viene utilizzata per calcolare la temperatura di taglio, questa equazione deriva dall'analisi sperimentale di vari materiali lavorati.

L'equazione seguente si può usare per calcolare l'aumento di temperatura sulla superficie tra l'utensile e truciolo.

$$\Delta T = \frac{0.4 k_c}{\rho C} \left(\frac{v_c h_D}{K} \right)^{0.333}$$

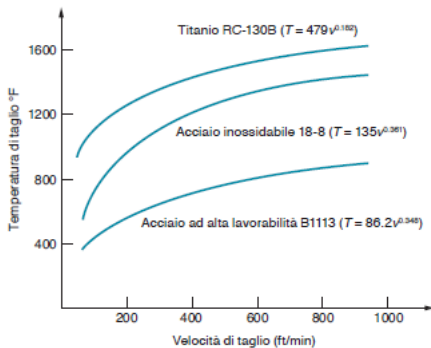
dove C è la capacità termica del materiale, K la diffusività termica e ρ la densità del materiale Cook inoltre dice che l'aumento di temperatura dipende molto di più dalla velocità di taglio più che dalla velocità di avanzamento.

Relazione di Trigger

Ha determinato la relazione tra velocità di taglio e temperatura compattando tutti gli altri fattori in un unico fattore m.

$$T = K v_c^m$$

K e m dipendono da tutti gli altri parametri di taglio esclusa v_c



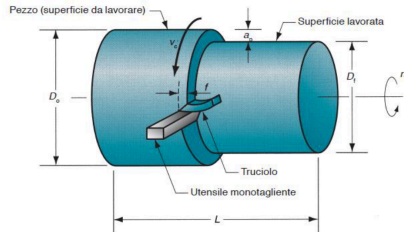
l'alluminio sarebbe anche più basso perché è più tenero ha k_c più basso e conducibilità termica maggiore.

Il titanio non conduce molto calore per cui si surriscalda facilmente ed è molto duro da lavorare.

Tornitura

È un processo di lavorazione per asportazione di truciolo in cui un utensile mono tagliente asporta del materiale dalla superficie di un pezzo in rotazione. Viene effettuata su una macchina utensile chiamata tornio che fornisce la potenza necessaria per ruotare il pezzo a una certa velocità di rotazione e per muovere l'utensile ad una determinata velocità di avanzamento e profondità di passata.

Condizioni di taglio



$$n = \frac{v_c}{\pi D_0}$$

n velocità di rotazione (giri/min)
 v_c velocità di taglio (m/min)
 D_0 diametro iniziale del pezzo (mm)

L'operazione di tornitura riduce il diametro del pezzo dal suo diametro iniziale D_0 a un diametro finale D_f , come determinato dalla profondità di passata a_p

$$D_f = D_0 - 2a_p$$

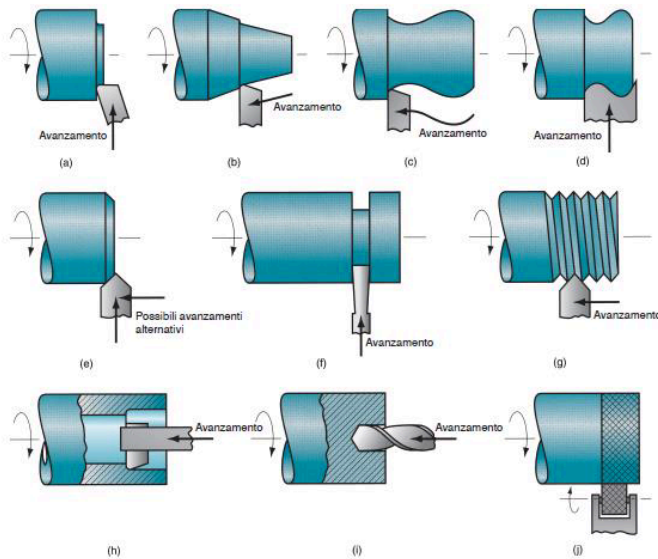
$v_f = nf$ L'avanzamento f (mm/giro) può essere convertito in una velocità di movimento lineare (velocità di avanzamento) v_f (mm/min)

$$T_m = \frac{L}{v_f} \quad \rightarrow \quad T_m = \frac{\pi D_0 L}{f v_c} \quad \begin{array}{l} T_m \text{ tempo di lavorazione (min)} \\ L \text{ lunghezza da lavorare (mm)} \end{array}$$

Nella pratica si aggiunge a L una piccola distanza (extracorsa) sia all'inizio sia alla fine del pezzo per consentire l'approccio e l'uscita dell'utensile

$$Q = v_c f a_p \quad Q \text{ tasso di asportazione del materiale (mm}^3\text{/min) (detto anche MRR, Material Removal Rate)}$$

Operazioni di tornitura

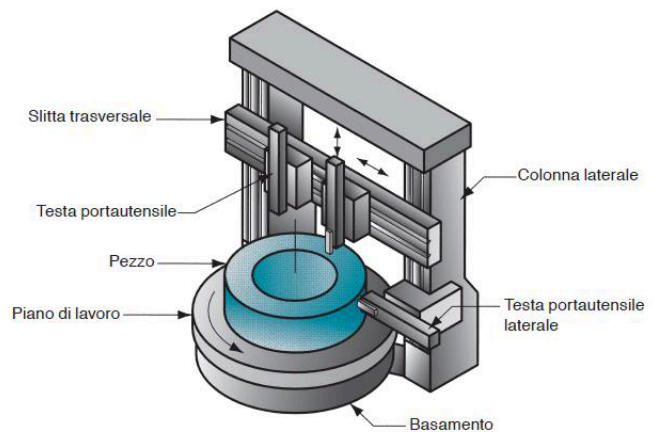
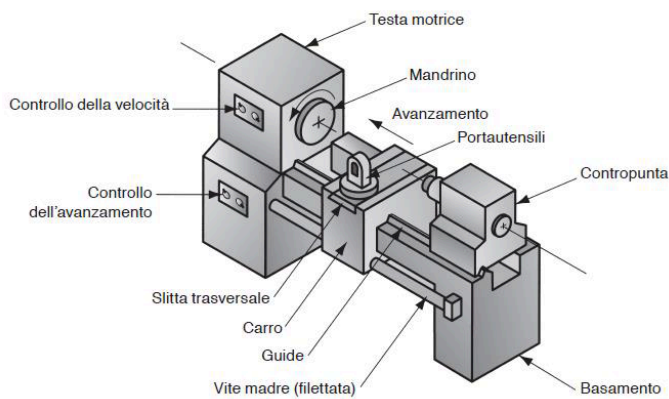


- a) **Sfacciatura**: l'utensile avanza radialmente per creare una superficie piana
- b) **Tornitura conica**: l'utensile avanza secondo la direzione angolata rispetto al pezzo creando una forma conica.
- c) **Contornatura**: l'utensile segue un contorno sagomato
- d) **Tornitura di forma (formatura)**: l'utensile impartisce la propria forma al pezzo mediante un moto radiale
- e) **Smussatura**: si usa lo spigolo tagliente per eliminare l'angolo sul bordo
- f) **Troncatura (cut off)**: serve per tagliare un'estremità
- g) **Filettatura**
- h) **Barenatura**: l'utensileria avanza

linearmente sul diametro interno di un foro preesistente

- i) **Foratura**: si fa avanzare una punta forare le pezze rotazione
- j) **Godronatura**: usata per produrre zigrinatura sulla superficie del pezzo

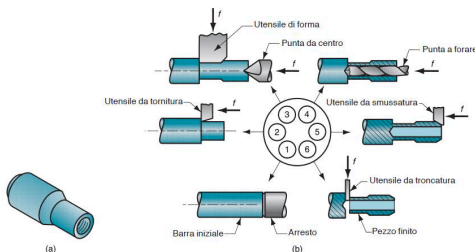
Tornio in parallelo



La **testa motrice** contiene l'unità che aziona il **mandrino** che a sua volta ruota il pezzo. L'utensile viene posizionato in un porta utensili posizionato sulla **slitta trasversale** che è fissata al **carro**. Il carro può scorrere lungo le guide per far avanzare l'utensile parallelamente all'asse di rotazione. Solitamente il carro è azionato da una vite che ruota alla velocità corretta per ottenere la velocità di avanzamento desiderata.

Solitamente i **torni sono orizzontali** ovvero hanno l'asse del mandrino orizzontale; questa è la soluzione più appropriata per la maggior parte dei pezzi che sono di lunghezza molto superiore rispetto al diametro. Per operazioni in cui il diametro maggiore della lunghezza si tende ad utilizzare **torni verticali**.

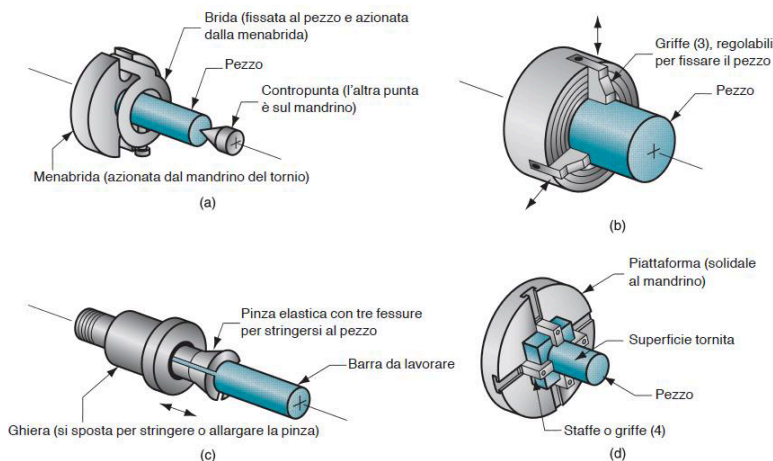
Le dimensioni del tornio si indicano utilizzando due valori ovvero il massimo diametro di tornitura e la distanza tra le punte che indica la massima lunghezza del pezzo che si può lavorare.



Tornio multimandrino

Queste macchine hanno più mandrini così che i pezzi possano essere lavorati contemporaneamente da utensili diversi

Metodi di bloccaggio sul tornio



Montare il pezzo **tra le punte** si riferisce all'uso due punte montate una sulla testa motrice e l'altra sulla **contropunta** questo permette di lavorare pezzi molto lunghi senza rischiare una considerevole flessione. In questo caso sul mandrino viene montato un dispositivo chiamato **menabrida** utilizzato per spingere un altro dispositivo chiamato **brida** che viene invece fissato al pezzo. Invece la **punta** può essere

viva o morta ovvero viva quando ruota all'interno del cuscinetto evitando un moto relativo tra il

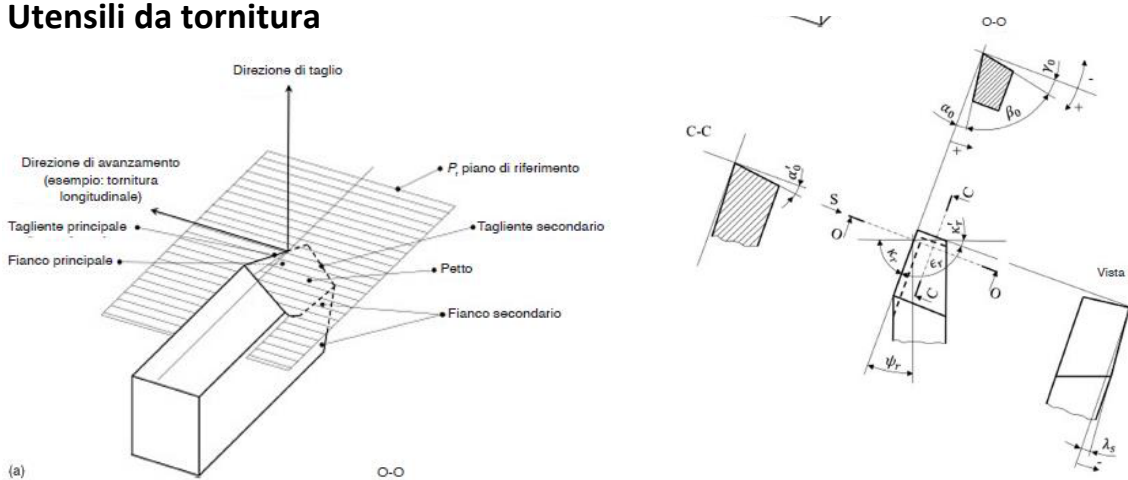
pezzo e la punta invece morta quando rimane fissa questa configurazione viene utilizzata solo a basse velocità di rotazione a causa dell'attrito E dell'accumulo di calore.

La **pinza** è disponibile in diverse versioni con tre o quattro **griffe** per afferrare il diametro esterno di un pezzo cilindrico o il diametro interno di un pezzo tubolare e spesso sono **autocentranti** per poter centrare il pezzo sull'asse del mandrino. La pinza può essere usata con o meno contro punta ovvero per pezzi più lunghi serve la contropunta.

La **pinza elastica** è costituita da una **boccola tubolare** con fessure longitudinali lungo metà della sua lunghezza e uniformemente distribuite lungo la circonferenza. Grazie alle fessure il diametro della pinza può essere ridotto per garantire un afferraggio sicuro del pezzo.

Una **piattaforma** è un dispositivo di bloccaggio che si fissa al mandrino del tornio E viene utilizzato per afferrare pezzi di forma irregolare. Spesso le griffe sono progettate per la forma specifica del pezzo.

Utensili da tornitura



Angoli della sezione normale:

- γ_0 angolo di spoglia superiore ortog.
- α_0 angolo di spoglia inferiore ortog.
- α_0' angolo di spoglia inferiore sec.
- β_0 angolo di taglio

Angoli del profilo:

- ψ_r angolo di direzione complementare del tagliente
- ϵ_r angolo della punta dell'utensile
- λ_s angolo di inclinazione tagliente princ.

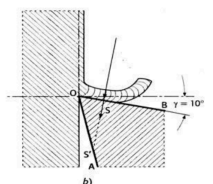
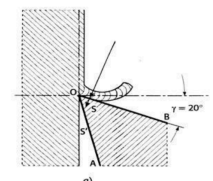
Angoli di registrazione:

- κ_r angolo di direzione del tagliente principale
- κ_r' angolo di direzione del tagliente secondario

γ_0 angolo di spoglia superiore ortogonale

Influisce sul meccanismo di formazione del truciolo γ_0 maggiori determinano:

- minori deformazioni
- minori pressione di taglio
- minori forze (a parità di forze, aumentare il γ_0 permette di aumentare i parametri di processo f e/o a_p)
- minore potenza assorbita
- minore attrito di scorrimento
- minori temperature di esercizio
- minore resistenza dello spigolo tagliente

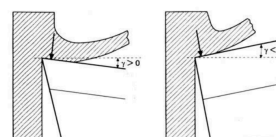


γ_0 angolo di spoglia superiore ortogonale

- materiali in lavorazione meno resistenti (meno duri) consentono angoli γ_0 maggiori
- materiali dell'utensile duri e fragili non resistono bene a azioni interne di taglio e flessione, mentre resistono bene a azioni di compressione quindi richiedono γ_0 piccoli o negativi

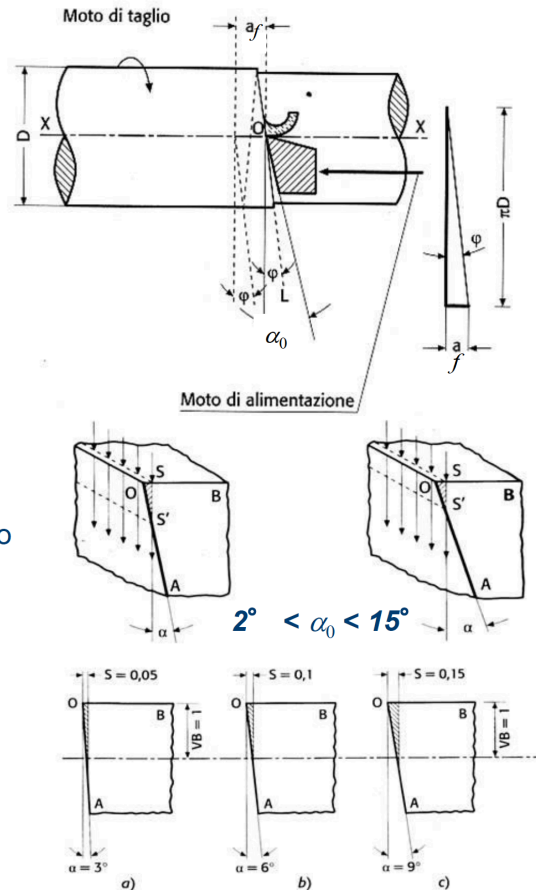
γ_0 negativi determinano:

- aumento delle forze, delle temperature e della potenza assorbita



α_0 angolo di spoglia inferiore ortogonale

Durante la lavorazione l'utensile descrive un'elica di passo f e diametro D . La traccia OL è inclinata di un angolo φ che riduce l'ampiezza di α_0 . $\alpha_0 - \varphi$ deve essere positivo per evitare lo strisciamento del fianco principale sulla superficie lavorata.



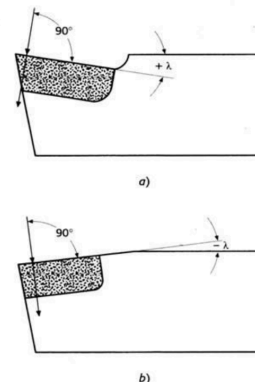
- Se troppo elevato diminuisce la sezione resistente
- Angoli troppo bassi determinano un più veloce raggiungimento della usura dorsale
- Dipende dal materiale da lavorare (maggiore è la pressione di taglio minore deve essere α_0)
- Dipende dal materiale dell'utensile (se poco tenace, minori valori di α_0)

ε_r angolo della punta dell'utensile

- Influenza la robustezza della punta

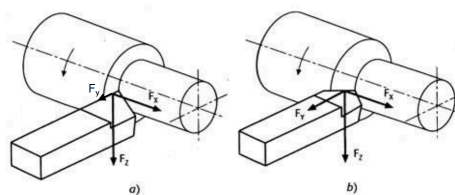
λ_s angolo di inclinazione del tagliente principale

Angoli negativi consentono di ottenere utensili più robusti e di passare da sollecitazioni di taglio a sollecitazioni di compressione. In questo caso agiscono forze più elevate (problema delle vibrazioni).



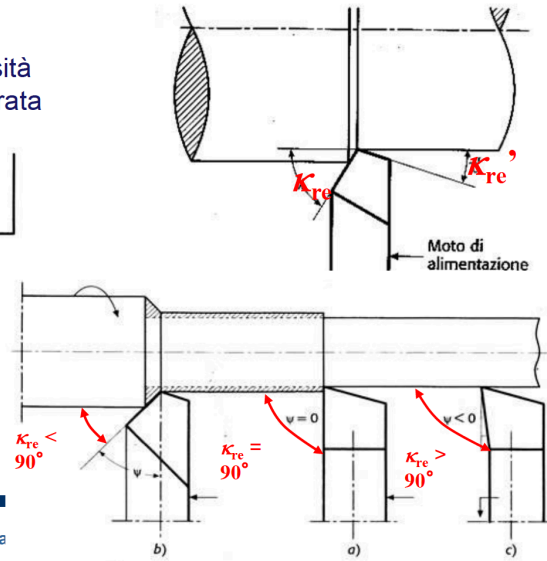
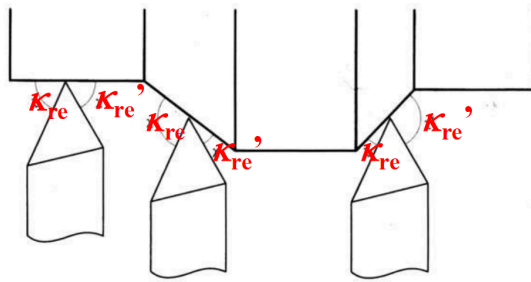
κ_r angolo di direzione del tagliente principale

- Influenza le componenti della forza di taglio
- κ_r ridotti consentono maggiori durate del tagliente, ma determinano un aumento della forza di taglio e della forza di repulsione
- Si consigliano:
 - $\kappa_r = 90^\circ$ per la realizzazione di spallamenti
 - $\kappa_r < 90^\circ$ in condizioni di lavoro normali e con sistemi macchina-pezzo-utensile rigidi



κ_{re} angolo di direzione del tagliente principale in lavoro
 κ_{re}' angolo di direzione del tagliente secondario in lavoro

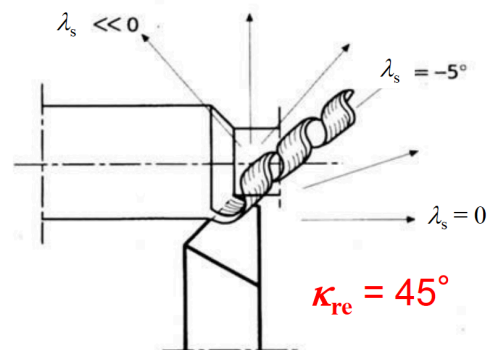
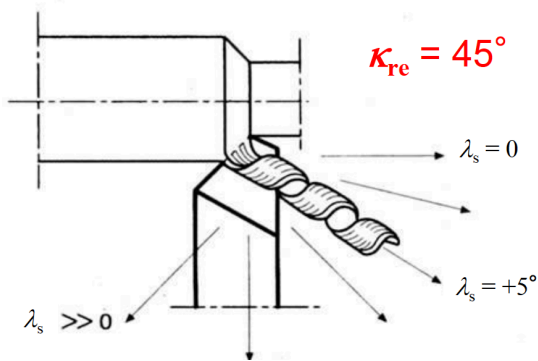
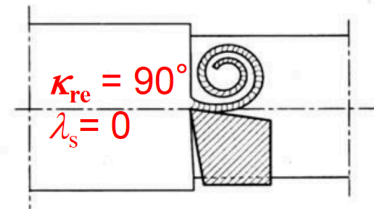
Assieme all'avanzamento e al raggio di punta dell'utensile determinano la rugosità superficiale teorica della superficie lavorata



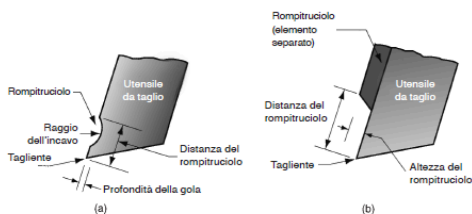
TECNOLOGIA MECCANICA 1

La

Influenza di λ_s e κ_{re} sull'allontanamento del truciolo dalla superficie lavorata



Tipo di utensile



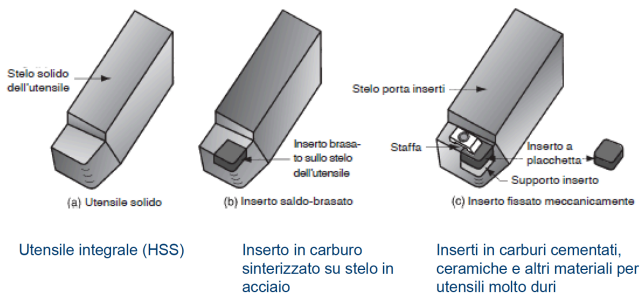
Sagoma rompitruciolo ricavata direttamente nell'utensile (inserto) (materiale dell'utensile tenace (HSS, metallo duro), spoglie positive o poco negative)

Piastrina rompitruciolo (materiale dell'utensile duro (metallo duro, ceramiche), spoglie negative (compressione))

Dall'equazione di Merchant si può notare che l'angolo di spoglia positivo è preferibile perché riduce le forze di taglio, la temperatura e il consumo energetico. Infatti di solito gli utensili in HSS hanno angolo di spoglia compreso tra 5° e 20°.

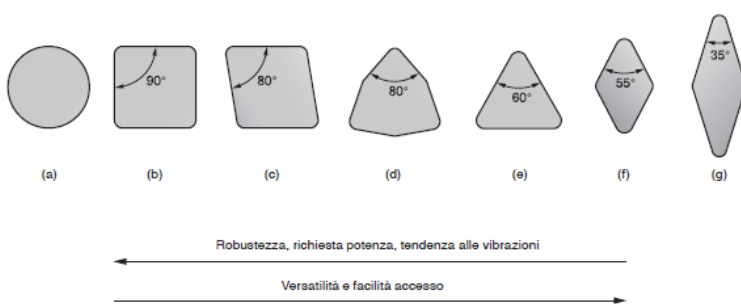
Questi utensili sono di solito realizzati in un unico pezzo con trattamenti termici che tendono a mantenere l'esterno duro e l'interno dell'utensile tenace. Con lo sviluppo dei materiali

carburi sinterizzati più duri e più costosi questi utensili devono essere progettati con angoli che vanno da -5° a 10° in modo che l'utensile sia sottoposto a compressione invece che a taglio.



il **bloccaggio meccanico** viene utilizzato per carburi sinterizzati, ceramiche e altri materiali duri e il vantaggio significativo di questo modo di fissaggio è che permette di sfruttare i diversi taglienti presenti nell'insetto. Quindi quando il tagliente si consuma viene sbloccato, indicizzato e ruotato sul lato successivo e ribloccato nel portautensile.

Forme degli inserti



Gli inserti rotondi hanno angoli di punta di grandi dimensioni per cui devono essere più robusti degli altri e hanno anche meno probabilità di rompersi durante il taglio. Però richiedono una potenza di taglio più elevata e hanno maggiore probabilità di dare origine a

vibrazioni. Il grande vantaggio economico è che possono essere indicizzati più volte per più tagli per inserto.

Gli inserti quadrati presentano quattro taglienti quelli triangolari tre e quelli a rombo due quindi il numero dei taglienti a disposizione è doppio.

Gli inserti a forma di rombo sono caratterizzati da angoli molto acuti e vengono solitamente utilizzati in spazi ristretti o tornitura di profili.

Parametri di lavorazione

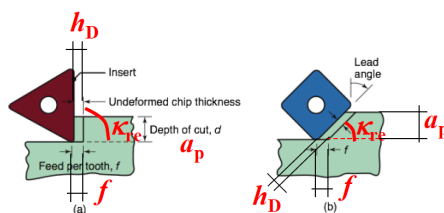
- D [mm] diametro in lavorazione
- n [giri/min] numero di giri
- v_c [m/min] velocità di taglio
- f [mm/giro] avanzamento
- a_p [mm] profondità di passata
- h_D [mm] spessore di truciolo indeformato
- A_D [mm²] sezione di truciolo
- v_f [mm/min] velocità di avanzamento

$$v_c = \frac{\rho D_0 n}{1000}$$

$$v_f = nf$$

$$A_D = fa_p$$

Definitions turning



Pressione di taglio

Per definizione (ISO 3002/4), la pressione di taglio si definisce dalla:

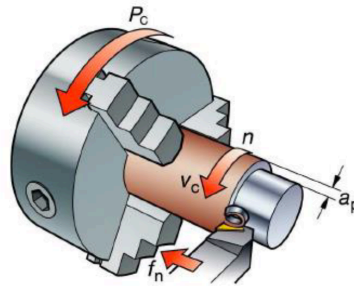
$$k_c \stackrel{\text{def}}{=} \frac{F_c}{A_D}$$

dove:

F_c forza di taglio
 k_c pressione di taglio
 $A_D = f a_p = h_D b$ area della sezione del truciolo indeformato

con:

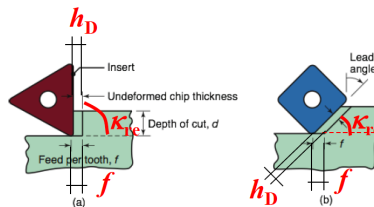
F avanzamento
 a_p profondità di passata
 h_D spessore di truciolo
 b larghezza di taglio (o larghezza del truciolo)



$$k_c = \frac{k_{cs}}{h_D^x}$$

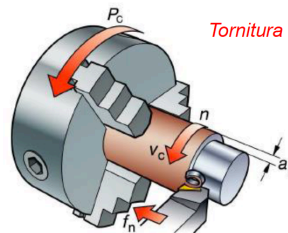
di solito non si conoscono h_D e b ma l'avanzamento al giro f e la profondità di passata a_p :

$$h_D = f \sin \kappa_{re}$$



$$k_c = \frac{k_{cs}}{h_D^x} = \frac{k_{cs}}{f^x (\sin \kappa_{re})^x} = \frac{k_{cs}}{f^x} \frac{1}{\sin^x \kappa_{re}}$$

$$F_c = k_c A_D = k_c f a_p = k_{cs} f^{1-x} a_p \frac{1}{\sin^x \kappa_{re}}$$



Sui cataloghi non si trova k_{cs} ma $k_{c0,4}$ (pressione di taglio per $f = 0,4$ mm/giro e per $\kappa = 90^\circ$), da cui si può ricavare k_{cs} :

$$k_{c0,4} = \frac{k_{cs}}{0,4^x} \frac{1}{\sin^x 90^\circ} = \frac{k_{cs}}{0,4^x} \quad \Rightarrow \quad k_{cs} = k_{c0,4} 0,4^x$$

così, sostituendo, si ottiene infine:

$$F_c = k_{c0,4} 0,4^x f^{1-x} a_p \frac{1}{\sin^x \kappa_{re}}$$

Se ci si discosta dalle condizioni standard indicate dal produttore di utensili, devono essere applicati coefficienti correttivi alla formula del k_c e della forza

Forze di taglio

ISO 3002/4-1984

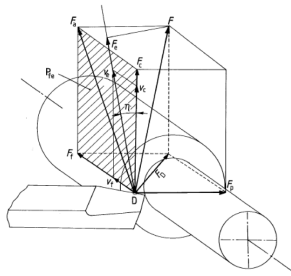


Figure 2 — Resolution of forces in cylindrical turning

F_c = Forza di taglio F_p = Forza di repulsione
 F_D = Thrust force F_f = Forza di avanzamento

Potenza di taglio

$$P_c = F_c \times v_c + F_f \times v_f + F_p \times v_p$$

v_p esiste solo in caso di vibrazioni radiali

Considerando che tipicamente:

$$v_f \ll v_c \quad F_f < F_c$$

$$\Rightarrow P_c = F_c \times v_c$$

$$\left. \begin{aligned} F_c &= k_c A_D = k_c f a_p \\ P_c &= F_c \times v_c \end{aligned} \right\} P_c = F_c \cdot v_c = k_c \cdot (f \cdot a_p \cdot v_c) = k_c Q$$

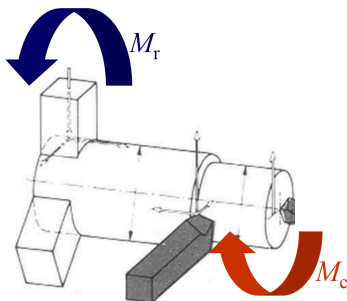
$\Rightarrow k_c$: Potenza nell'unità di volume nell'unità di tempo
 = Energia per unità di volume

Verifiche in tornitura

Affinché una lavorazione in tornitura sia realizzabile è necessario verificare che:

- la profondità di passata considerata sia compatibile con l'utensile selezionato
- l'avanzamento selezionato sia ammissibile per il tornio
- la velocità di taglio e, quindi, il numero di giri selezionato sia compatibile con le caratteristiche del tornio
- la potenza necessaria alla lavorazione sia effettivamente erogabile dal tornio considerato
- i parametri di taglio siano compatibili con la finitura superficiale richiesta
- i parametri di taglio siano compatibili con le tolleranze dimensionali e geometriche imposte
- l'attrezzatura selezionata sia in grado di afferrare saldamente il pezzo in lavorazione

Verifica dell'autocentrante



Momento di taglio: $M_c = F_c D / 2$

Momento resistente: $M_r = z \mu p A D^* / 2$

dove:

- z = numero di griffe dell'autocentrante
- p = pressione di contatto griffa-pezzo
- A = area di contatto griffa-pezzo
- μ = coefficiente di attrito statico
- D = diametro del pezzo in corrispondenza dell'utensile
- D^* = diametro del pezzo in corrispondenza delle griffe

$$\mu = \begin{cases} 0.15 & \text{per griffe in acciaio dolce} \\ 0.25 & \text{per griffe con profilo ondulato} \\ 0.35 \div 0.8 & \text{per griffe rigate in acciaio temprato} \end{cases}$$

Affinchè la lavorazione sia eseguibile, si deve verificare che:

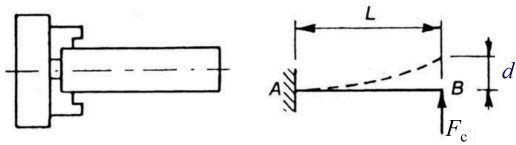
$$M_c = F_c D / 2 \leq M_r = z \mu p A D^* / 2$$

N.B.

- Se i dispositivi dell'autocentrante sono di tipo meccanico, la pressione di contatto p varia con la velocità di rotazione n : se n aumenta, p diminuisce!
- Attenzione alla pressione di contatto in quanto potrebbe indentare il pezzo

Verifica inflessione del pezzo

Caso 1) autocentrante



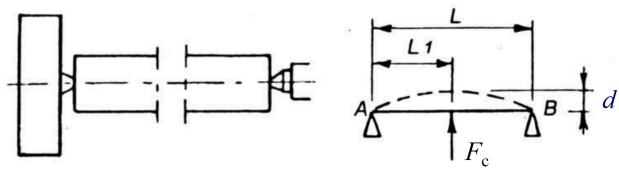
N.B.

La freccia d è massima quando la forza è applicata all'estremità libera.

$$d = \frac{1}{3} \times \frac{F_c \times L^3}{E \times J}$$

J : momento di inerzia

caso 2) tra le punte

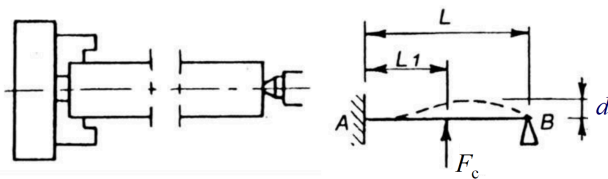


N.B.

La freccia d è massima quando $L_1 = L/2$

$$d = \frac{1}{48} \times \frac{F_c \times L^3}{E \times J}$$

Caso 3) autocentrante contropunta



N.B.

La freccia d è massima quando $L_1 \approx 0,6 L$

$$d \gg \frac{1}{107} \times \frac{F_c \times L^3}{E \times J}$$

- Caso 1: a sbalzo (autocentrante)

$$d = \frac{1}{3} \times \frac{F_c \times L^3}{E \times J}$$

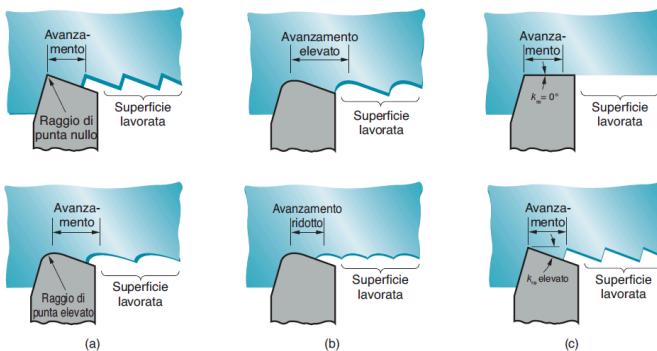
- Caso 2: tra le punte (punta - contropunta)

$$d = \frac{1}{48} \times \frac{F_c \times L^3}{E \times J}$$

- Caso 3: autocentrante - contropunta

$$d \gg \frac{1}{107} \times \frac{F_c \times L^3}{E \times J}$$

Rugosità superficiale



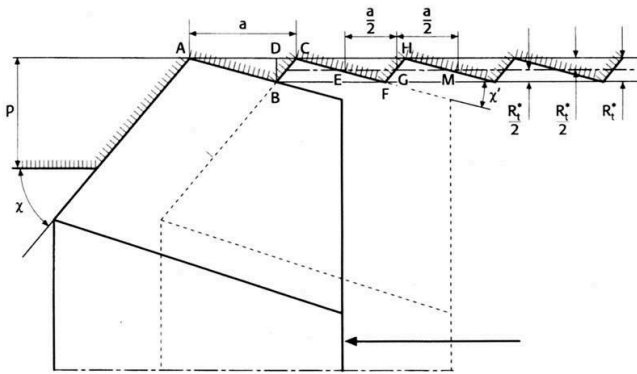
Siccome spesso le lavorazioni per asportazione di truciolo determinano la forma finale del pezzo determinano anche la trama della superficie del pezzo e quindi la rugosità superficiale e le finiture superficiali. Per cui la rugosità superficiale finale dipende da molti fattori:

- 1) fattori geometrici
- 2) fattori relativi al materiale da lavorare
- 3) fattori relativi alle vibrazioni della macchina utensile

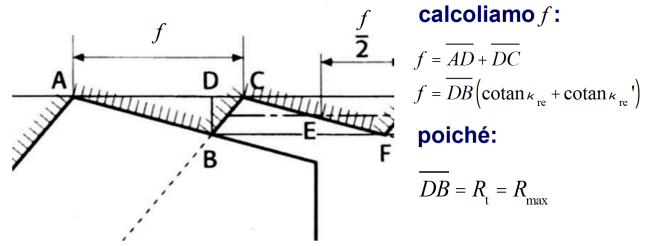
Fattori geometrici

- tipo di lavorazione
- forma dell'utensile (raggio di punta)
- avanzamento

il tipo di lavorazione si riferisce al tipo di processo usato e quindi ad esempio la fresatura periferica, frontale o piallatura producono tutte superfici piane tuttavia la rugosità superficiale risultante sarà diversa per ogni tipo di lavorazione.



Rugosità Teorica: utensile con raggio di punta nullo



calcoliamo f :

$$f = \overline{AD} + \overline{DC}$$

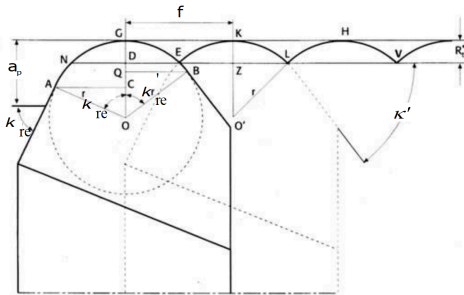
$$f = \overline{DB}(\cotan \kappa_{re} + \cotan \kappa'_{re})$$

poiché:

$$\overline{DB} = R'_t = R_{\max}$$

si ottiene: $R_{\max} = \frac{f}{\cotan \kappa_{re} + \cotan \kappa'_{re}} \times 10^3 \text{ (mm)}$ $R_a = \frac{R_{\max}}{4}$

Rugosità Teorica: utensile con raggio di punta $r_{\epsilon} \neq 0$



poiché: $\overline{ND} \leq \overline{AC}$

$$\overline{DE} \leq \overline{QB}$$

$$\overline{ND} = \overline{DE} = \frac{f}{2}$$

$$\Rightarrow \frac{f}{2} < r_{\epsilon} \times \text{sen} \kappa_{re}$$

$$\frac{f}{2} < r_{\epsilon} \times \text{sen} \kappa'_{re}$$

Formula approssimata di **Schmaltz**

quindi si ottiene:

$$R_{\max} = R_t = \overline{OG} - \overline{OD} = \overline{OG} - \sqrt{\overline{ON}^2 - \overline{ND}^2} = \frac{a}{\text{sen} \kappa_{re}} - \sqrt{r_{\epsilon}^2 - \frac{f^2}{4}} \times 10^3 \gg \frac{f^2}{8 \times r_{\epsilon}} \times 10^3 \text{ (mm)}$$

possiamo notare che a parità di avanzamento, un raggio di punta maggiore fa sì che le tracce dell'avanzamento siano meno marcate determinando in tal modo una finitura superficiale migliore. A parità di raggio invece possiamo notare che un avanzamento maggiore fa aumentare la distanza tra le tracce dell'avanzamento aumentando il valore della rugosità superficiale.

Fattori relativi al materiale da lavorare

- 1) Formazione ciclica del tagliente di riporto
- 2) Danni causati dal truciolo che si arriccchia
- 3) Strappamento della superficie del pezzo durante la formazione del truciolo in caso di materiali duttili
- 4) Cricche superficiali causate dalla formazione del truciolo discontinuo nel caso di materiali fragili
- 5) Attrito tra il fianco dell'utensile e la superficie lavorate

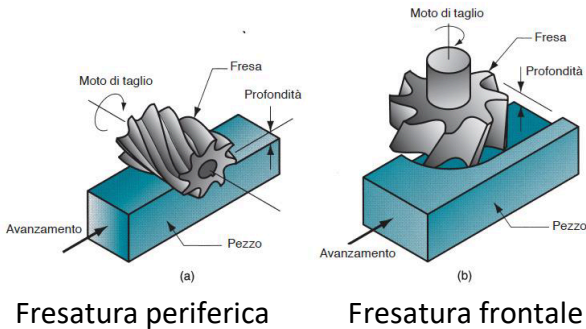
Fattori relativi alle vibrazioni e alle macchine utensili

Per ridurre al minimo le vibrazioni che causano giochi nel meccanismo di avanzamento sono:

- 1) Aumentare la rigidità o lo smorzamento del sistema
- 2) Eseguire l'operazione a velocità che si avvicinano alla frequenza naturale del sistema macchina/utensile mandando il sistema in chatter (vibrazione autoeccitata)
- 3) Ridurre le forze di taglio quindi avanzamento e profondità di passata oppure geometria dell'utensile

In generale sezioni sottili tendono ad aumentare la probabilità che si verifichino vibrazioni e richiedono dei supporti ulteriori per evitare il fenomeno

Fresatura

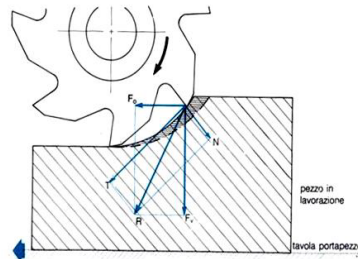
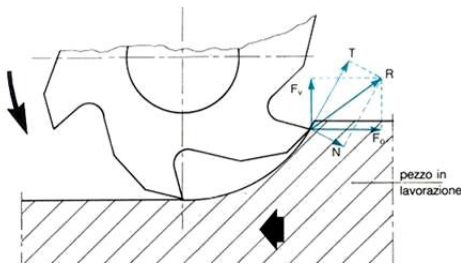


la distinguiamo in due tipi diversi: In quella frontale l'asse di rotazione è normale alla superficie lavorata mentre nella fresatura periferica l'asse di rotazione è parallelo al profilo della fresa. Con determinati utensili si possono fare entrambe le fresature con la stessa macchina. Il numero tipico di denti dell'utensile da fresatura è 8

Fresatura periferica

- a) Fresatura periferica convenzionale
- b) Fresatura di scanalature
- c) Fresatura laterale
- d) Fresatura simultanea
- e) Fresatura di forma

fresatura periferica convenzionale serve per spianare grandi piastre e di solito si tende a volere la fresa più grande del pezzo; mentre con la fresa più piccola si fanno fresature di forma e ricopia quello che vorrei avere nel pezzo come scanalature, ecc...



Di solito è il pezzo che ha il moto di avanzamento del pezzo e non la fresa

Ci sono notevoli differenze dal punto di vista della meccanica del processo e dal punto di vista

delle forze di taglio. Possiamo usare due sistemi di riferimento secondo F_f o secondo F_c

A sinistra la fresatura è in discordanza mentre a destra in concordanza:

le condizioni sono molto diverse ad esempio sulla **forma del truciolo** che sarà più corto nella fresatura in concordanza e più lungo in quella in discordanza.

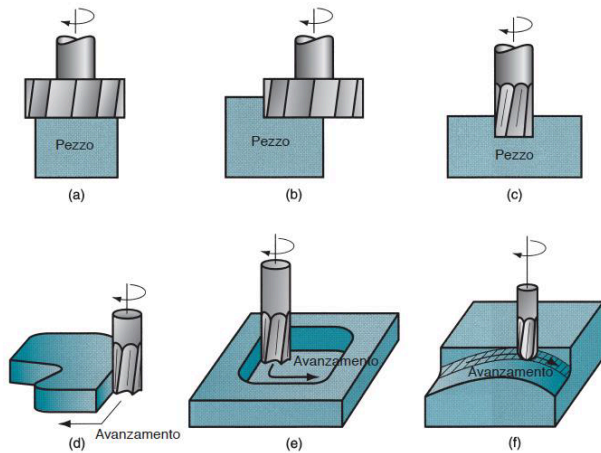
Nel caso a sinistra c'è maggiore **dispensio di calore** perché c'è tallonamento all'inizio della lavorazione in quanto il truciolo è più spesso e tende a non staccarsi e quindi si crea strisciamento. Le due tipologie tendono a spingere il pezzo contro l'attrezzatura di bloccaggio in modo diverso: quella in discordanza tende a sollevare il pezzo dal piano di lavoro quindi servirà un sistema di bloccaggio adeguato mentre quella a destra tende a spingere il pezzo verso il piano di lavoro e verso la direzione di rotazione del pezzo. È necessario che il bloccaggio sia ben fatto in quanto si possono rischiare forti vibrazioni che influenzano la qualità della lavorazione.

A sinistra il vantaggio è la gradualità delle forze di taglio e la stabilità del pezzo mentre lo svantaggio è il tallonamento.

A destra il vantaggio è che non c'è strisciamento o tallonamento ma l'utensile si trova ad urtare maggiore materiale e quindi non si possono usare utensili fragili. L'utensile subisce urti continui per cui ha bisogno di maggiore tenacità.

Sintomo del taglio interrotto (fresatura) perché il dente sta in presa con il materiale per un periodo piccolissimo e quindi l'utensile subisce un sacco di cicli termici di riscaldamento e raffreddamento subendo un elevato stress termico.

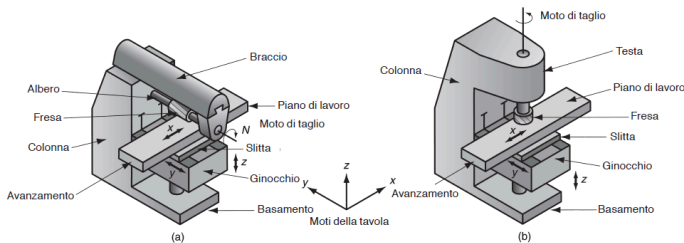
Fresatura frontale



- a) Fresatura frontale convenzionale
- b) Fresatura frontale parziale
- c) Fresatura a candela
- d) Fresatura di contornatura
- e) Fresatura di tasche
- f) Contornatura di una superficie

Per fare contornatura di una superficie in una sola direzione serve una fresatrice a 4 assi, se la superficie ha la doppia curvatura serve una fresatrice a 5 assi

Fresatrici

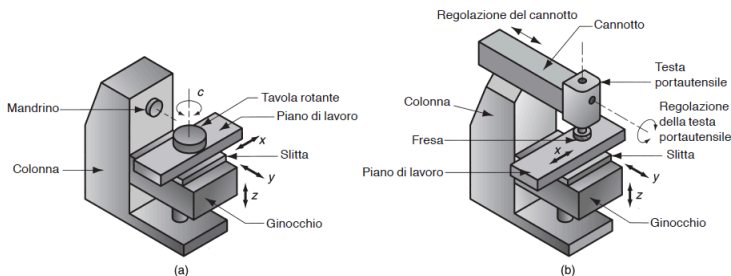


Fresatrici a ginocchio e colonna orizzontale e verticale

L'aggettivo orizzontale o verticale è legato all'asse del mandrino

Quella orizzontale è più adatta alla fresatura periferica mentre quella ad asse verticale è

più adatta ad una fresatura ad asse verticale. Ci possono essere fresatrici a 3 assi e tutti e 3 gli assi di avanzamento sono conferiti al pezzo.



- a) Fresatrice universale
- b) Fresatrice a cannotto

Se l'asse della tavola rotante può essere interpolato in modo sincrono agli altri 3 assi diventa a 4 assi se no a 3 assi e mezzo a destra la testa è inclinabile che compone l'asse b come

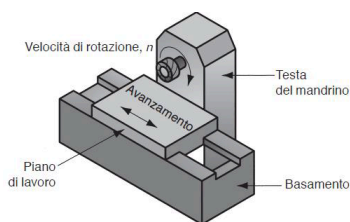
4 assi

I nomi degli assi della fresatrice sono convenzionali e hanno questi nomi:

rotazione su z → c

rotazione su x → a

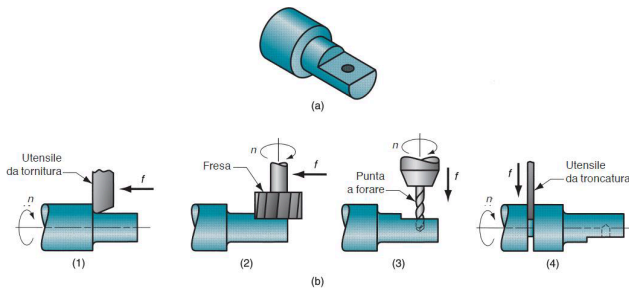
rotazione su y → b



Fresatrice a banco fisso simplex con mandrino orizzontale

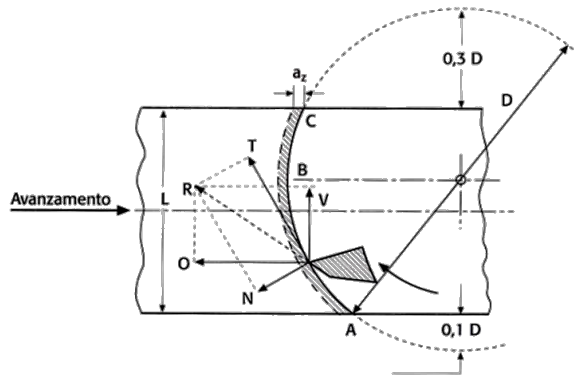
Di solito in azienda non si hanno macchine dedicate solo alla fresatura ma hanno delle macchine che si chiamano **centri di lavoro universale**.

Nei centri di lavoro universale si possono fare pezzi che richiedono più processi insieme come ad esempio tornitura, fresatura e foratura



- 1 -> tornitura del secondo diametro
- 2 -> fresatura di un piano con il pezzo nella posizione angolare programmata
- 3 -> foratura con il pezzo nella medesima posizione angolare programmata
- 4 -> tronatura

Scomposizione delle forze fresatura frontale



la forza di taglio la possiamo rappresentare sia come la somma vettoriale tra vettori ortogonali sia come la somma tra vettori non ortogonali. Consideriamo un singolo dente: Fc diretta come la traiettoria e una componente ad essa normale Fcn.

Il singolo dente descrive la traiettoria di diametro D che definisce il diametro della fresa. Solitamente il diametro della fresa è più grande di quello del pezzo e il centro è disassato

rispetto il centro del pezzo.

Disassiamo l'asse della fresa perché se lo avessimo in mezzaria avremmo mediamente lo stesso numero dei denti nell'arco in ingresso e nell'arco in uscita e quindi la risultante media complessiva di tutti i denti sarà nulla (ovvero un valore variabile intorno allo zero) quindi il pezzo non risulterebbe spinto contro l'attrezzatura di bloccaggio per cui si creerebbero delle vibrazioni.

In fresatura il dente entra nel pezzo con un urto che può causare una scheggiatura del pezzo o del dente che è sottoposto a cicli di urti meccanici durante l'intera lavorazione. Inoltre i denti della fresa sono sottoposti a shock termici dovuti al surriscaldamento nella fase di lavoro e raffreddamento nella parte di non lavoro.

Condizioni o parametri di taglio in fresatura

$$n = \frac{v_c}{\pi D}$$

n velocità di rotazione (giri/min)
 v_c velocità di taglio (m/min)
 D diametro della fresa (mm)

$$v_f = nZf_z$$

L'avanzamento al dente f_z (mm/(giro*dente)) può essere convertito in velocità di avanzamento v_f (mm/min) tenendo conto della velocità del mandrino e del numero di taglienti della fresa Z

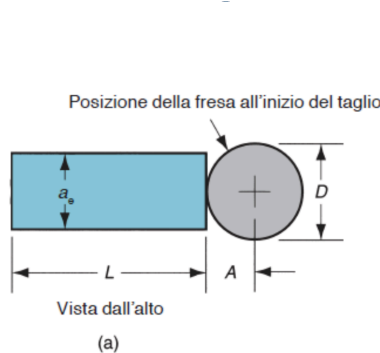
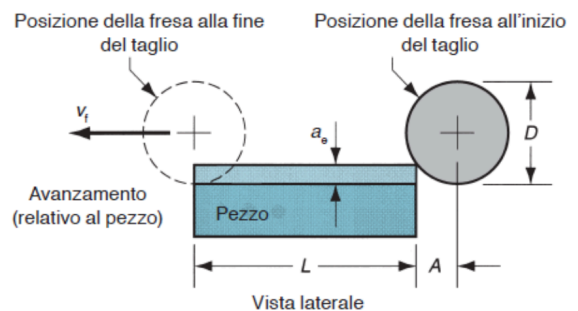
$$Q = a_p a_e v_f$$

Q tasso di asportazione del materiale (mm³/min)
 a_p profondità di passata assiale
 a_e profondità di passata radiale

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

T_m tempo di lavorazione (min)
 L lunghezza del pezzo (mm)
 A extracorsa in ingresso

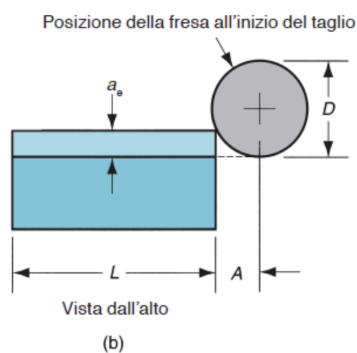
$$A = \sqrt{a_e(D - a_e)}$$



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

Ipotesi: centro fresa sull'asse del pezzo.
 Attenzione: A è la lunghezza minima del transitorio di ingresso.

Se D è minore o uguale rispetto alla larghezza del pezzo, allora $a_e = D$ e $A = 0,5D$



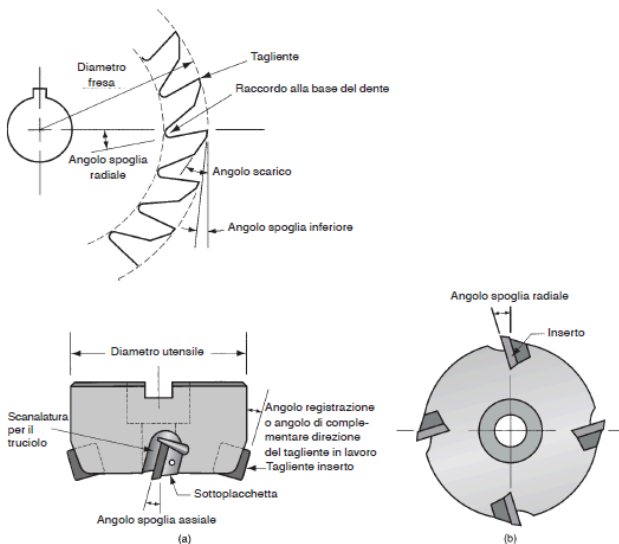
$$A = \sqrt{a_e(D - a_e)}$$

L'asse della fresa dovrà distare dal pezzo $0,5D$ poi dovremo percorrere tutta la lunghezza da fresare L e se vogliamo ben vedere forse non siamo obbligati a percorrerla tutta ma possiamo sottrarre questo segmento ovvero è il punto dove il diametro è già massimo.

Abbiamo una fresatura periferica con un affondamento radiale a_e oppure potrebbe essere una fresatura frontale di contornitura e questo segmento sarebbe l'affondamento radiale di

fresatura frontale. Quanto vale la nostra corsa complessiva in questo caso? $L + A$ non ci fermiamo prima questa volta perché l'asse della fresa deve essere allineato con la fine del pezzo, ma al contrario all'ingresso che possiamo ridurre l'accostamento che però sarà un po' più piccolo. Queste sono due configurazioni tipiche ma non sono le uniche che esistono perché gli affondamenti possono essere anche in altre direzioni e posso entrare in modi diversi a seconda degli ingombri. Nei pezzi tridimensionali complicati questi conti non si fanno a mano ma li fa un software che si chiama CAM (computer aided manufacturing) che è collegato ad un modulo collegato ad un CAD. Il CAM fa la sottrazione dei volumi tra il grezzo e il finito e calcola le traiettorie di lavoro e può simulare da un punto di vista cinematico calcolare anche il tempo.

Geometrie fondamentali



Avremmo un angolo di spoglia radiale dove nella rappresentazione a sinistra è positivo.

Le tre rotazioni indentificano 3 angoli diversi.

Se il raggio è perfettamente allineato con il petto dell'inserto l'angolo di spoglia radiale sarà uguale a 0.

Altro **angolo di spoglia** che si chiama **assiale**. Se il petto è in asse con l'asse dell'utensile gamma sarà 0.

Inoltre c'è l'angolo di registrazione alfa che non è un gamma ma in questo caso lo

chiamiamo χ (chi)

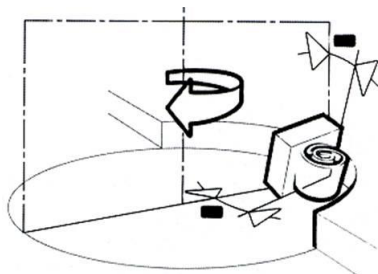
Quindi in generale possiamo avere geometrie doppio positive o doppio negative ovvero in senso assiale e radiale o situazioni miste.

La parte più calda che assorbe più calore è il truciolo che quindi è più caldo dell'utensile, se ho un utensile che tiene al suo interno più trucioli tiene al suo interno anche il calore quindi dobbiamo cercare asportare truciolo velocemente e romperlo velocemente.

Gli spazi tra un dente e l'altro servono per raffreddare il dente e per evacuare il truciolo. Gli angoli gamma contribuiscono a capire da che lato viene sputato il truciolo dalla fresa.

Geometrie fondamentali fresatura frontale

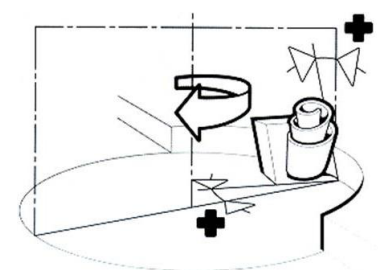
- Geometria doppio negativa



- materiali e condizioni che richiedono notevoli sollecitazioni
- acciai e ghise ad elevata durezza
- macchine ad elevata potenza e stabilità

se ho una spoglia doppio negativa cosa succede al truciolo? aumenta lo spessore del truciolo diminuisce il fattore di ricalcamento maggiore deformazione maggiore forze di taglio lo facciamo per materiali fragili che si comporterebbero male con un angolo di spoglia positivo l'utensile stabilizza l'attrezzatura perchè tende a schiacciare il pezzo sulla tavola e l'utensile schiaccia il mandrino inoltre serve una macchina molto rigida.

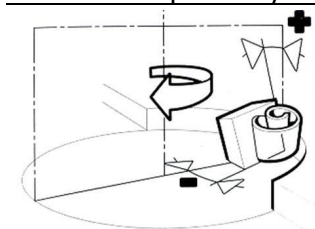
- Geometria doppio positiva



- materiali e condizioni "dolci" (alluminio, acciai duttili, ...)
- macchine a limitata potenza e stabilità

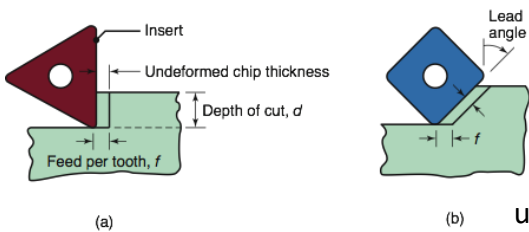
al contrario con l'angolo di spoglia positiva l'utensile tende ad essere strappato dal mandrino e il pezzo si solleva dalla tavola per cui è necessario fissare bene il pezzo

- Geometria positivo/negativa



- potenze intermedie
- γ_{pe} positivo: favorisce l'evacuazione del truciolo
- γ_{fe} negativo: elevati avanzamenti e profondità di taglio

Effetto dell'angolo di registrazione dell'inserto



In linea generale se l'angolo di registrazione diminuisce anche lo spessore del truciolo diminuisce per cui per la costanza del volume aumenta la larghezza del truciolo.

Quando l'angolo di registrazione è a 90 gradi abbiamo una identità tra f_z e la sezione del truciolo hD e ci serve per calcolare la forza di taglio e la sezione del truciolo. Quando il dente è inclinato la sezione del truciolo diventa sghemba e hD sarà diverso da f_z e i due parametri sono legati dal seno dell'angolo di registrazione.

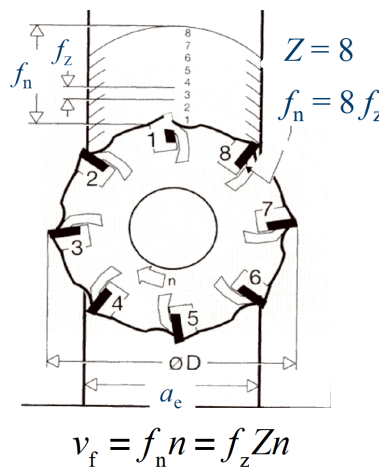
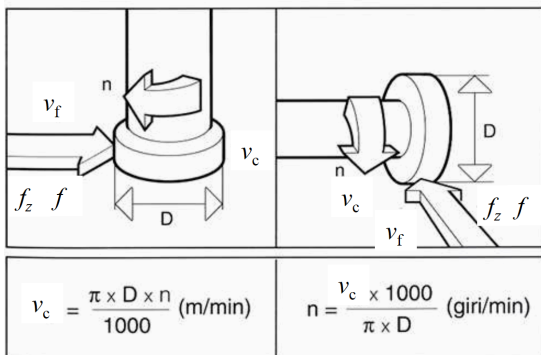
Se diminuisce l'angolo di registrazione lo spessore diventa sempre più piccolo ma aumenta la lunghezza del truciolo.

Parametri di lavorazione

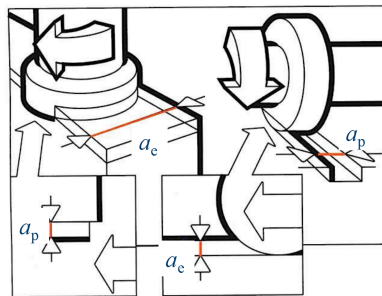
- D [mm] diametro della fresa
- n [giri/min] velocità di rotazione
- v_c [m/min] velocità di taglio
- f_n [mm/giro] avanzamento al giro
- v_f [mm/min] velocità di avanzamento
- f_z [mm/(giro*dente)] avanzamento al dente
- h_D [mm] spessore di truciolo indeformato
- A_D [mm²] area della sezione di truciolo

f_n avanzamento complessivo in direzione dell'avanzamento dell'intero giro della fresa.

Ciascun dente è passato più volte a lavorare la superficie quindi in un giro ogni dente avrà asportato 1/8 del materiale totale di un giro.

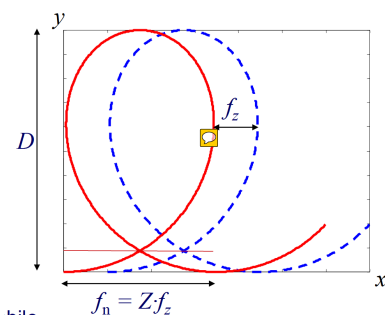


Nomenclatura: ISO 3002/1-1982



- a_p [mm] profondità di passata assiale (rispetto alla fresa)
- a_c [mm] profondità di passata radiale (rispetto alla fresa)

Moti nella fresatura periferica



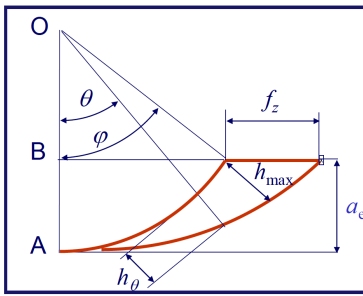
CICLOIDE: Il punto immediatamente vicino a P seguirà la stessa traiettoria ma spostata della quantità f_z

Quale è la superficie che vede asportare il materiale?

È una superficie che deriva dall'insieme di tutti i cicloidi quindi avrà tutte cuspidi.

La finitura superficiale dipenderà da f_z e quindi ci saranno delle formule che stimano R_a partendo da f_z .

Spessore del truciolo



Lo spessore del truciolo istantaneo vale:

$$h_\theta \cong f_z \sin \theta$$

siccome lo spessore varia a seconda dell'angolo θ allora anche la sezione per dente varia con l'angolo

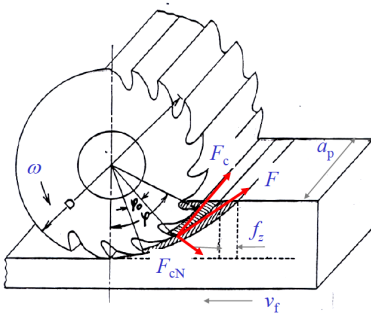
$$A_\theta = h_\theta b$$

$$\theta = \omega \cdot t$$

$$K_{re} = 90^\circ \rightarrow b = a_p$$

Se abbiamo il materiale in lavorazione che si muove da destra verso sinistra e l'utensile che entra dal unto A (inizio della lavorazione con strisciamento e spessore istantaneo del truciolo nullo) lo spessore man mano aumenta fino a raggiungere un valore massimo sulla superficie che dipende da f_z e dall'angolo φ che dipende dall'affondamento. In funzione dell'arco di contatto φ avremo un valore di spessore massimo del truciolo.

b larghezza del truciolo terza dimensione, se abbiamo l'angolo di registrazione a 90 grandi $b = a_p$ se l'angolo di registrazione è più piccolo allora b è più grande.



Considerando l' i -esimo tagliente in presa:

$$F_{c,i} = k_{c,i} \cdot A_{\theta_i} = k_{c,i} \cdot h_{\theta_i} \cdot a_p \quad \text{con:} \quad k_{c,i} = k_{cs} \cdot h_{\theta_i}^{-x}$$

$$\rightarrow F_{c,i} = k_{cs} \cdot h_{\theta_i}^{-x} \cdot h_{\theta_i} \cdot a_p = k_{cs} \cdot h_{\theta_i}^{1-x} \cdot a_p \cong k_{cs} \cdot (f_z \cdot \sin \theta_i)^{1-x} \cdot a_p$$

$$M_{c,i} = F_{c,i} \cdot \frac{D}{2} \quad \rightarrow \quad M_c = \sum_i M_{c,i} = \sum_i \left(F_{c,i} \cdot \frac{D}{2} \right) \quad \rightarrow \quad P_c = \frac{M_c \cdot \omega}{\eta}$$

In questo caso abbiamo 3 denti in presa e un quarto che sta entrando ma che ha spessore nullo. Se abbiamo un numero piccolo di denti in presa ovvero 1 o 2 avremo una forza di taglio variabile nel tempo e quindi anche una potenza di taglio variabile istante per istante.

Il problema di questa formula è che cambia istante per istante e dipende dal tempo e non ci piace ci risulta scomodo.

sarebbe ingegneristicamente saggio calcolare il valore medio o il valore massimo (ragionare in sicurezza) che non è semplice.

Se numero medio di taglienti in presa > 2 \rightarrow

Approccio allo spessore medio di truciolo

$$z: \text{numero medio di taglienti in presa} \quad z = \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{Z}{2\pi} \varphi$$

$$\text{Lo spessore medio } (h_m) \text{ del truciolo vale:} \quad h_m = \frac{1}{\varphi} \int_0^\varphi h_\theta \cdot d\theta = \frac{1}{\varphi} \int_0^\varphi f_z \cdot \sin \theta d\theta = \frac{f_z}{\varphi} (1 - \cos \varphi)$$

$$\text{Dato che } OB = \frac{D}{2} - a_c = \frac{D}{2} \cos \varphi \quad \text{si ha} \quad \cos \varphi = 1 - \frac{2a_c}{D}$$

$$\text{Spessore di truciolo medio} \quad h_m = \frac{2f_z a_c}{\varphi D}$$

NB:
• h_m NON dipende dal tempo
• φ in radianti

$$\text{Sezione di truciolo media} \quad A_m = h_m \cdot a_p = \frac{2f_z a_c a_p}{\varphi D}$$

Cerchiamo di calcolare lo spessore di truciolo medio in modo che non dipenda più dal tempo. Su uno spessore truciolo medio lo possiamo fare se abbiamo almeno 3 denti in presa perché se ne abbiamo 1 o 2 è più difficile calcolare questo valore medio. Se abbiamo un elevato numero di denti in presa riusciamo ad ottenere una buona approssimazione.

Calcolo della potenza

$$k_{re} = 90^\circ \rightarrow b = a_p$$

$$h_m = \frac{2f_z a_e}{\varphi D} \quad A_m = h_m \cdot b = \frac{2f_z a_e a_p}{\varphi D}$$

Possiamo dimostrare che non dipende dall'angolo di registrazione

$$z = \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{Z}{2\pi} \varphi \quad \omega = \frac{2\pi n}{60}$$

Considerando la forza media esercitata da un tagliente:

$$F_{c,m} = k_{c,m} \cdot A_m = k_{c,m} \cdot h_m \cdot a_p \quad \text{con:} \quad k_{c,m} = k_{cs} \cdot h_m^{-x}$$

$$\rightarrow M_{c,m} = F_{c,m} \cdot \frac{D}{2} \rightarrow M_c \cong z \cdot M_{c,m} \rightarrow P_c = \frac{M_c \cdot \omega}{\eta}$$

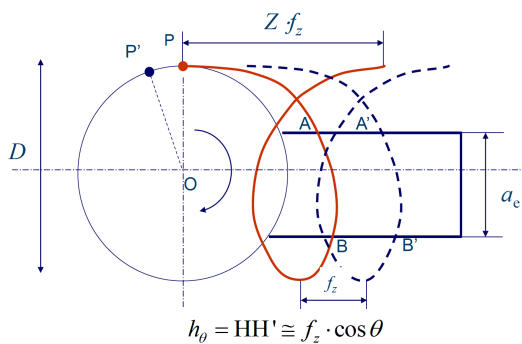
$$\rightarrow P_c = \frac{z \cdot M_{c,m}}{\eta} \cdot \frac{2\pi n}{60} = \frac{z \cdot F_{c,m} \cdot D}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{2\pi n}{60} = \frac{z \cdot k_{c,m} \cdot h_m \cdot a_p \cdot D}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{2\pi n}{60}$$

$$\rightarrow P_c = \frac{Z}{2\pi} \varphi \cdot \frac{k_{c,m} \cdot a_p \cdot D}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{2f_z a_e}{\varphi D} \cdot \frac{2\pi n}{60} \rightarrow P_c = \frac{k_{c,m} \cdot Z \cdot f_z \cdot n \cdot a_p \cdot a_e}{60 \cdot \eta}$$

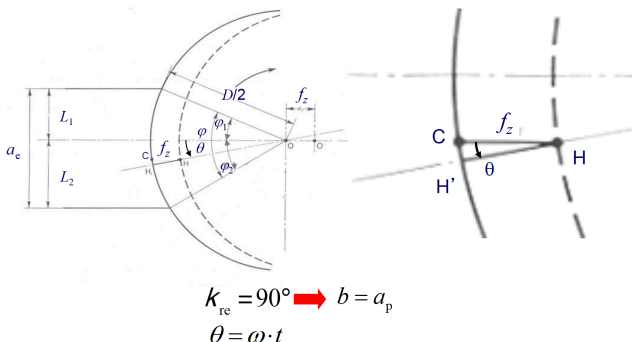
$$P_c = \frac{K_{c,m} v_f a_p a_e}{60 * 1000 * \eta} \Rightarrow P_c = \frac{K_{c,m} Q}{\eta}$$

dove **Q** è il tasso di asportazione del materiale (MRR materiale removal rate)

Moti nella fresatura periferica



Considerando i valori di f_z , D e a_e , si possono approssimare le curve AB e $A'B'$ con archi di circonferenze di raggio $D/2$.



$$k_{re} = 90^\circ \rightarrow b = a_p$$

$$\theta = \omega \cdot t$$

nella fresatura frontale ci sarà l'arco di ingresso in cui la forza di taglio sarà diretta come l'avanzamento mentre nell'arco di uscita la forza di avanzamento si inverte. Quando il diametro della fresa è più grande si preferisce disassare l'asse della fresa in modo che l'affondamento è diviso in l_1 e l_2 non uguali tra loro e quindi si evitano vibrazioni in quanto le forze non si annullano tra loro essendo opposte.

Se numero medio di taglienti in presa ≤ 2 (v. fresatura periferica):

$$F_{c,i} = k_{cs} \cdot h_{\theta_i}^{-x} \cdot h_{\theta_i} \cdot b = k_{cs} \cdot h_{\theta_i}^{1-x} \cdot a_p \cong k_{cs} \cdot (f_z \cdot \cos \theta_i)^{1-x} \cdot a_p$$

$$M_{c,i} = F_{c,i} \cdot \frac{D}{2} \rightarrow M_c = \sum_i M_{c,i} = \sum_i \left(F_{c,i} \cdot \frac{D}{2} \right) \rightarrow P_c = \frac{M_c \cdot \omega}{\eta}$$

$$\theta = \omega \cdot t$$

NB:

- P_c dipende dal tempo
- quando un tagliente non è in presa, $h_{\theta_i} = 0$

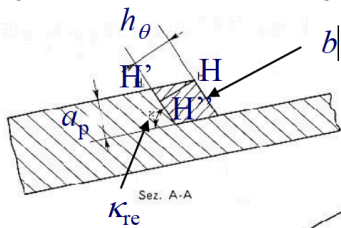
Se numero medio di taglienti in presa > 2 \rightarrow

Approccio allo spessore medio di truciolo

$$h_m = \frac{1}{\varphi} \int_{-\varphi_2}^{\varphi_1} h_{\theta} \cdot d\theta = \frac{1}{\varphi} \int_{-\varphi_2}^{\varphi_1} f_z \cdot \cos \theta d\theta = \frac{f_z}{\varphi} [\sin \varphi_1 - \sin(-\varphi_2)] = \frac{f_z}{\varphi} (\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2)$$

$$\text{ma: } a_e = \frac{D}{2} (\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2) \rightarrow h_m = \frac{f_z}{\varphi} \cdot \frac{2a_e}{D} = \frac{2f_z a_e}{\varphi D}$$

(fresatura frontale)

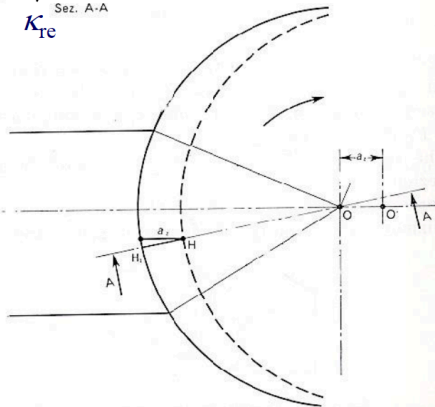


$$\kappa_{re} \neq 90^\circ \rightarrow b = \frac{a_p}{\sin \kappa_{re}}$$

$$h_q = HH'' = HH' \times \sin \kappa_{re} @ f_z \times \cos \varphi \times \sin \kappa_{re}$$

$$h_m = \frac{2f_z a_e}{j D} \times \sin \kappa_{re}$$

NB: h_m CAMBIA con κ_{re}



$$h_{ex} = f_z \times \sin \kappa_{re}$$

Spessore massimo di truciolo

$$A_m = h_m \times b = \frac{2f_z a_e}{j D} \times \sin \kappa_{re} \times \frac{a_p}{\sin \kappa_{re}} = \frac{2f_z a_e a_p}{j D}$$

NB: A_m NON cambia con κ_{re}

Considerando la forza media esercitata da un tagliente:

$$F_{c,m} = k_{c,m} \cdot A_m = k_{c,m} \cdot h_m \cdot b \quad \text{con: } k_{c,m} = k_{cs} \cdot h_m^{-x}$$

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

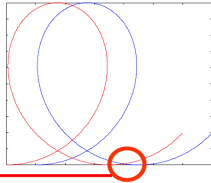
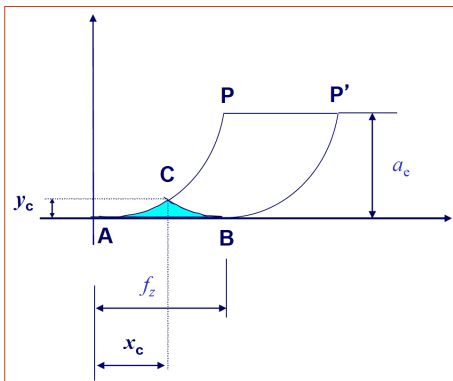
con Q tasso di asportazione di truciolo (MRR material removal rate)

Effetto dell'angolo di registrazione sulla potenza

Se si riduce l'angolo κ_r (a parità degli altri parametri):

- diminuisce lo spessore massimo del truciolo hex quindi è possibile aumentare l'avanzamento a parità di resistenza della fresa
- aumenta la potenza richiesta per l'operazione
- aumenta la spinta assiale
- diminuisce la spinta radiale

Rugosità superficiale nella fresatura periferica



Ci rimane da stimare la rugosità superficiale e utilizziamo la stessa formula della tornitura ma al posto del raggio di curvatura dell'utensile mettiamo il diametro della fresa perché è quella che spiana la superficie del pezzo.

$$R_t \cong 1000 \cdot \frac{f_z^2}{4D}$$

Con:

f_z [mm]
 D [mm] diametro fresa
 R_t [μm] rugosità totale

È una formula empirica che sottostima la rugosità superficiale per questo spesso si preferisce mettere f (avanzamento totale) al posto di f_z

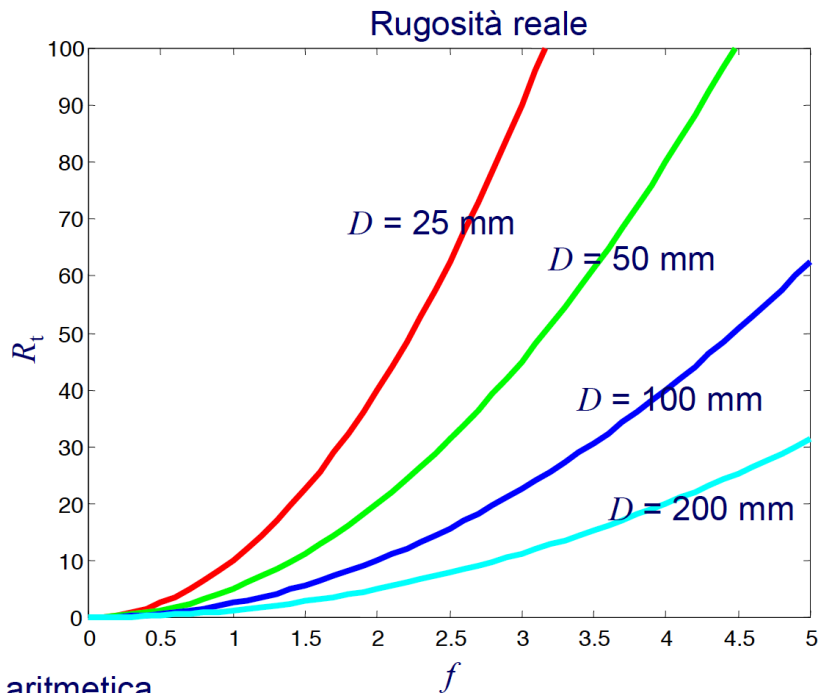
$$f_z \Rightarrow f$$

$$R_t \cong \frac{1000 \cdot f^2}{8R}$$

$$R_a \cong \frac{1}{4} R_t$$

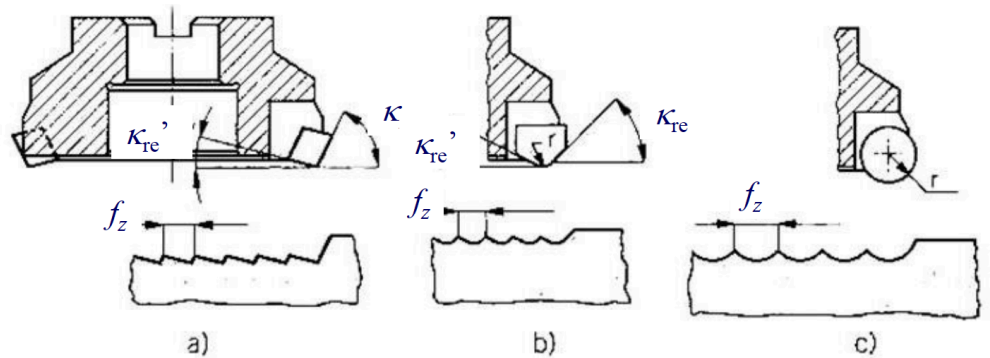
Con:

R [mm] raggio fresa
 R_t [μm] rugosità totale
 R_a [μm] rugosità media aritmetica



Rugosità superficiale nella fresatura frontale

La rugosità teorica in questo caso dipende dalla presenza del raggio di punto dell'utensile



$$R_t = f_z \frac{\tan \kappa_{re} \tan \kappa'_{re}}{\tan \kappa_{re} + \tan \kappa'_{re}} 10^3$$

$$R_t = \frac{f_z^2}{8r_e} 10^3$$

$$R_a \cong \frac{1}{4} R_t$$

Con:

f_z [mm]

avanzamento
dente

r_e [mm]

raggio di punta
inserto

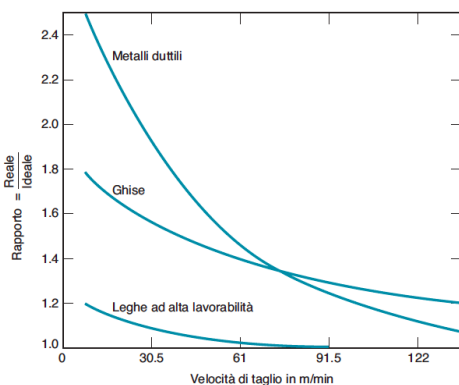
R_t [μ m]

rugosità totale

R_a [μ m]

rugosità media
aritmetica

Rugosità ideale vs rugosità reale



Cause di differenza tra rugosità ideale e reale:

- Tagliante di riporto
- Impatto del truciolo contro il pezzo
- Strappamento del truciolo in materiali duttili
- Cricche superficiali su materiali fragili
- Strisciamento del dorso sulla superficie lavorata
- Chatter (vibrazioni autoeccitate)

La formula per la rugosità in fresatura e tornitura sono formule discretamente accurate, la finitura effettiva che poi otteniamo potrà discostarsi dalla linea teorica per vari motivi:

• **tagliante di riporto**: accumulo di truciolo magari a velocità bassa che non scorre e rimane attaccato alla superficie dell'utensile: tipico del titanio e dell'alluminio. Per cui in questo caso chi sta tagliando non è l'utensile ma il truciolo e la geometria diventa irregolare e la rugosità superficiale ne risente.

Questo truciolo si accumula e si stacca poi si riaccumula e si stacca. Ogni volta che si stacca erode l'utensile distruggendo i denti e genera una finitura superficiale orrenda: **evitare basse velocità**.

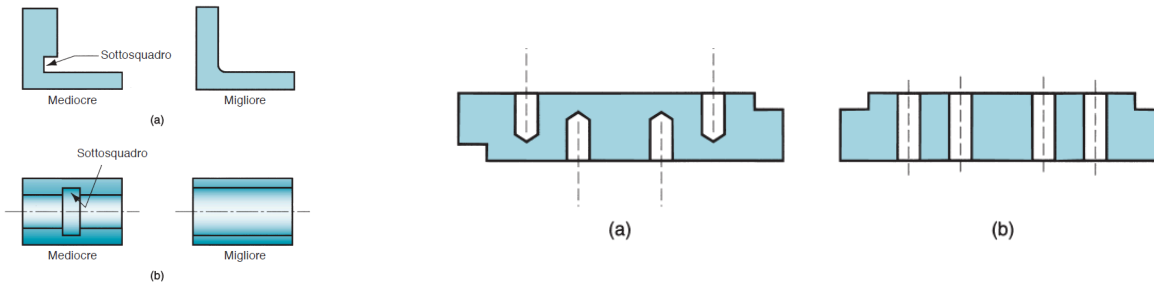
• la **velocità di taglio** ha un effetto sulla finitura superficiale, all'aumentare di v_c velocità di taglio migliora la finitura superficiale.

Esiste una velocità di taglio che ottimizza la finitura superficiale. Quando gira troppo veloce però c'è un surriscaldamento troppo elevato che causa maggiore usura sull'utensile.

• in fresatura periferica concorde abbiamo un **urto** e quindi un pezzo fragile può fratturarsi. Il momento di ingresso del dente può generare una frattura fragile. Questo fenomeno non c'è nella tornitura.

- il materiale **ritorna elasticamente** sul dorso dell'utensile quindi l'angolo alfa può modificare la finitura superficiale non modellato da quella formula.
- **vibrazioni** che possono essere innescate dal processo stesso. Inoltre c'è una forzante naturale del processo e se la variabilità naturale manda in risonanza il pezzo e la struttura (frequenze proprie) partono delle vibrazioni autoeccitate e questo è chiaramente negativo ai fini della finitura superficiale. Capita piuttosto spesso per alte velocità e alti affondamenti assiali.

Design for machining

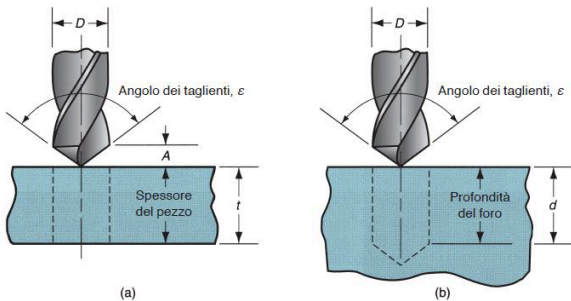


- Quando è possibile, i pezzi dovrebbero essere progettati in modo tale che non prevedano una lavorazione per asportazione di truciolo (usare processi net shape o near net shape)
- Applicare l'asportazione di truciolo per ottenere buone tolleranze e finiture o feature particolari (es. filettature, fori di precisione, elevata circolarità in sezioni cilindriche)
- Progettare le tolleranze per la funzionalità del pezzo tenendo conto della capacità del processo
- Evitare angoli acuti e spigoli vivi (causa di rotture utensili, bave, ecc.)
- Evitare fori profondi
- Partire da grezzi standard
- Progettare i pezzi per essere sufficientemente rigidi da resistere alle forze (evitare pezzi lunghi e sottili)
- I progettisti dovrebbero scegliere materiali a elevata lavorabilità (per esempio, materiali che consentono vc elevata)
- Ridurre il numero di piazzamenti (al limite uno solo) per esempio facendo in modo che le feature si trovino sullo stesso lato del pezzo
- Usare il più possibile utensili standard
- Usare meno utensili possibile (esempio raggi di raccordo per spallamenti)

Foratura

La foratura è un processo che si usa per creare un foro circolare in un pezzo e viene generalmente eseguita con un utensile rotante cilindrico dotato di due taglienti sulla faccia frontale e si chiama **punta a forare**. La macchina che si usa per fare questa lavorazione è il **trapano a colonna**.

Condizioni di taglio



$$n = \frac{v_c}{\rho D}$$

n velocità di rotazione (giri/min)
 v_c velocità di taglio (m/min)
 D diametro della punta (mm)

$$v_f = n f$$

L'avanzamento f (mm/giro) può essere convertito in velocità di avanzamento v_f (mm/min) usando la stessa equazione della tornitura

In generale i fori possono essere **passanti** o fori **cechi**.

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

T_m tempo di lavorazione (min)
 t spessore del pezzo (mm)
 A extracorsa in ingresso

t diventa d
 (profondità del foro)
 nel caso del foro
 cieco

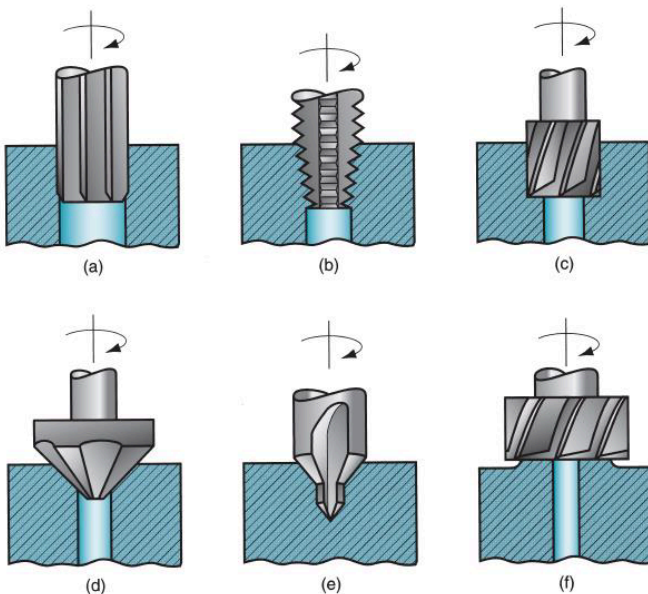
$$A = 0.5 D \tan\left(90^\circ - \frac{\varepsilon}{2}\right)$$

ε angolo dei taglienti della punta
 (o angolo di punta)

$$Q = \frac{\pi D^2 v_f}{4}$$

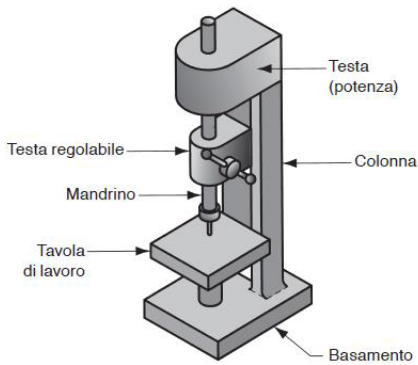
tasso di asportazione del materiale (mm³/min)
(sia foro cieco sia foro passante)

Operazioni di foratura



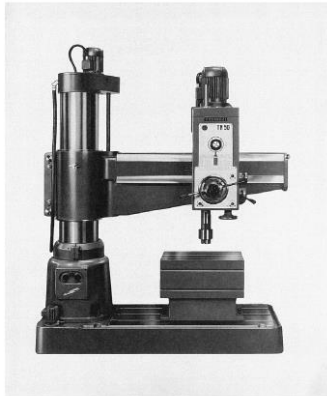
- a) **Alesatura**: si usa per allargare leggermente un foro per avere maggiori tolleranze dimensionali e maggior finitura superficiale.
- b) **Maschiatura**: utilizzata per filettare internamente dei fori
- c) **Lamatura**: serve per produrre un foro a gradini e di solito viene usato per inserire la testa di un bullone.
- d) **Svasatura**: produce un gradino a forma di cono per le viti
- e) **Centrinatura**: realizza un foro di partenza per stabilire con precisione la posizione di un successivo foro
- f) **Sfacciatura**: simile alla fresatura frontale e viene usata per ottenere una superficie piana in una zona precisa del pezzo.

Macchine per foratura



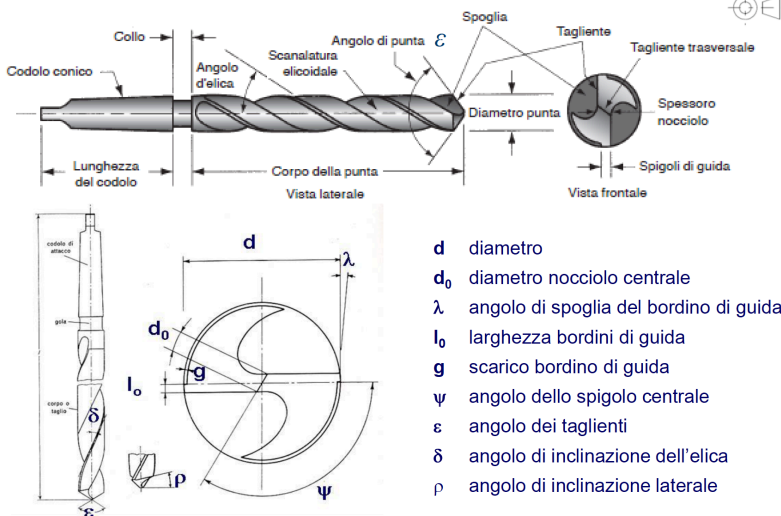
Il trapano è l'utensile standard per forare.

Il **trapano a colonna** si appoggia su un basamento a terra. I pezzi vengono generalmente montati su una morsa che li tiene fermi e in posizione e il mandrino fa ruotare la punta a forare del trapano.



Il **trapano radiale o a bandiera** è un trapano molto grande progettato per fare fori su pezzi di grandi dimensioni. Ha un braccio radiale sul quale si può muovere e bloccare la testa di foratura. Per questo la testa può essere anche posizionata distante dalla colonna per lavorare pezzi grandi.

Utensili per foratura



punta elicoidale per foratura il suo diametro va da circa 0.15mm a 75mm e si usano spesso per fare fori in modo veloce e a basso costo.

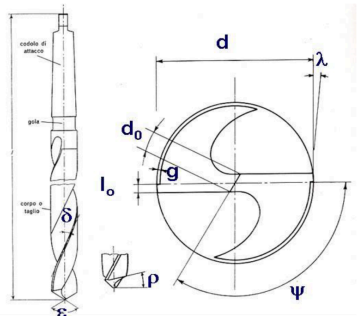
La forma standard presenta due **scanalature a spirale** che servono per espellere il truciolo rimosso del materiale rimosso dal pezzo lavorato. L'**angolo di elica** è l'angolo delle scanalature a spirale solitamente di 30°.

Anche se le scanalature ampie sarebbero utili per asportare meglio il truciolo la dimensione del **nocciolo** è importante per sostenere la punta e garantire una buona resistenza meccanica alla punta per far sì che non si rompe.

La parte finale della punta elicoidale ha una forma conica con un **angolo di punta** di 118°.

Il modo più comune per configurare la punta è a **tagliante trasversale**.

La velocità di taglio del tagliante varia in base alla distanza dall'asse e



- d** diametro
- d₀** diametro nocciolo centrale
- λ** angolo di spoglia del bordino di guida
- l₀** larghezza bordini di guida
- g** scarico bordino di guida
- ψ** angolo dello spigolo centrale
- ε** angolo dei taglianti
- δ** angolo di inclinazione dell'elica
- ρ** angolo di inclinazione laterale

$$g = g_0 + f$$

$$a = a_0 - f$$

Si ha tallonamento se:

$f > a_0$

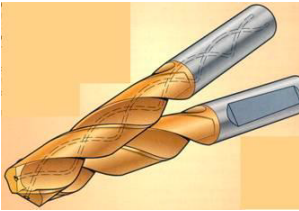
con:

$$\operatorname{tg} r = \frac{f}{\rho \times d} = \frac{f \times n}{\rho \times d \times n}$$

quindi il taglio è più efficace nel diametro esterno rispetto a quello interno. Siccome la velocità relativa del punto centrale è praticamente nulla servirà una forza assiale molto elevata per far penetrare la punta all'interno del pezzo.

Il **tagliente trasversale** della punta incrudisce il materiale man mano che la punta penetra nel foro e anche questa azione richiede una elevata forza di spinta.

In foratura l'asportazione del truciolo risulta un problema perché intanto le scanalature devono fornire uno spazio sufficiente per tutta la lunghezza della punta. Inoltre l'attrito ostacola l'evacuazione del truciolo in due modi: sia per l'attrito che si verifica tra il truciolo e la faccia



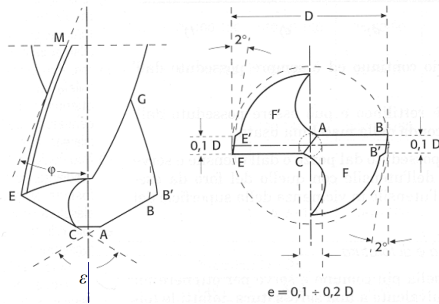
inclinata dell'utensile ma anche perché c'è **attrito** tra la superficie esterna della punta e quella del foro appena formata. Questo porta ad un forte aumento della temperatura del pezzo e della punta. Per arginare questo problema o si usano delle punte che possono erogare del liquido lubrificante oppure si con la procedura di beccata ovvero estraendo e riinserendo la punta più volte per fare lo stesso foro.

Parametri di lavorazione

- D [mm] diametro della punta
- n [giri/min] velocità di rotazione
- v_c [m/min] velocità di taglio
- f_n [mm/giro] avanzamento al giro
- v_f [mm/min] velocità di avanzamento

$$v_c = \frac{v D n}{1000}$$

$$v_f = n f_n$$

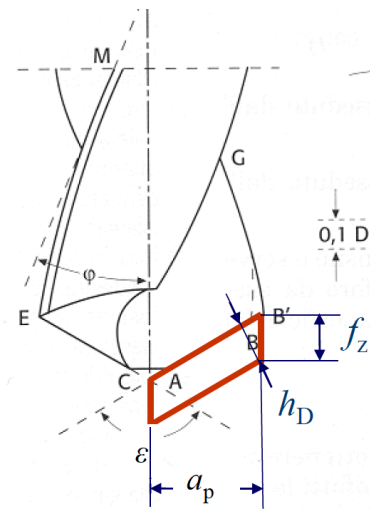


Valori indicativi:

$$f_n = 0,01 \div 0,8 \text{ mm/giro}$$

$$D = 1 \div 50 \text{ mm}$$

$$v_c = 5 \div 300 \text{ m/min}$$



- f_z [mm/(giro*dente)] avanzamento al dente

- a_p [mm] profondità di passata

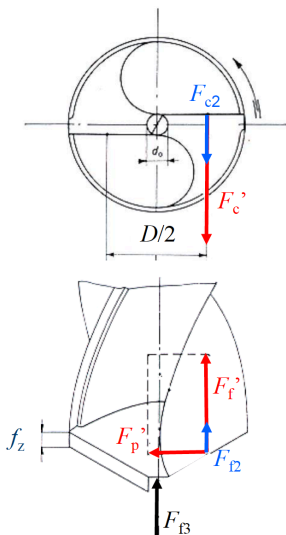
- h_D [mm] spessore di truciolo indeformato

- A_D [mm²] area della sezione di truciolo

$$f_z = \frac{f_n}{2}$$

$$h_D = f_z \text{sen} \frac{\alpha_e}{2} \frac{\sigma}{\sigma_c}$$

$$A_D = f_z a_p = \frac{f_n}{2} \frac{D}{2} = \frac{f_n D}{4}$$



1 Componenti della forza di taglio

2 Forze dovute all'attrito dorsale (tallonamento)

3 Forza sullo spigolo centrale

F_c' = Forza di taglio

F_f' = Forza di avanzamento

F_p' = Forza di repulsione (bilanciata dall'analoga componente dell'altro tagliente)

$F_c = F_c' + F_{c2}$ Forza di taglio complessiva

$F_f = F_f' + F_{f2} + F_{f3}$ Forza di avanzamento complessiva (carico di punta)

NB: forze applicate dal pezzo all'utensile

Anche in foratura si può usare il metodo della pressione di taglio.

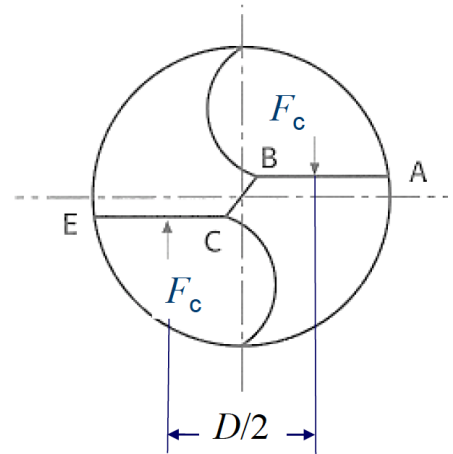
Identifichiamo la sezione di truciolo A_D

La forza di taglio F_c è data da:

$$F_c = k_c \times A_D \quad [\text{N}]$$

e quindi la coppia di taglio è data da:

$$M_c = \frac{F_c \times D}{2 \times 1000} = \frac{k_c \times A_D \times D}{2 \times 1000} \quad [\text{Nm}]$$



La potenza assorbita dalla foratura è data da:

$$P_c = \frac{M_c \cdot \omega}{1000} \quad [\text{kW}]$$

dato che:

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

si ha:

$$P_c = \frac{M_c \cdot \omega}{1000} = \frac{k_c \cdot A_D \cdot D \cdot n \cdot \pi}{60 \cdot 10^6} \quad [\text{kW}]$$

con:

$$k_c = \frac{k_{cs}}{h_D^x}$$

$$h_D = f_z \cdot \text{sen} \frac{\alpha_e}{2} \cdot \frac{v_c}{v_c}$$

Rettifica

Serve a portare in tolleranza un pezzo che può essere o assial-simmetrico (proviene da una tornitura) o prismatico (proviene da una lavorazione di fresatura) durante le quali non abbiamo ottenuto le tolleranze o le rugosità superficiali scritte sul disegno. Di solito è economicamente più conveniente spezzare la lavorazione in più passate (minimo due sgrossatura e finitura) di solito si utilizzano anche grani differenti per sgrossatura e finitura.

Inoltre le lavorazioni di materiali duri offre tolleranze finali più precise in quanto il materiale resiste meglio agli urti dell'utensile con la superficie.

Caratteristiche della lavorazione:

- Vasta gamma di materiali lavorabili
- Tolleranze dimensionali molto strette
- Finiture Superficiali molto spinte

Tolleranze dimensionali

Processo	Tolleranza tipica in mm
Colata in sabbia:	
Ghisa	±1.3
Acciaio	±1.5
Alluminio	±0.5
Pressofusione	±0.12
Stampaggio plastica:	
Polietilene	±0.3
Polistirene	±0.15
Asportazione:	
Foratura, 6 mm (0,25 in)	±0.08/-0.03
Fresatura	±0.08
Tornitura	±0.05
Abrasioni:	
Rettifica	±0.008
Lappatura	±0.005
Levigatura	±0.005

Finiture (Rugosità)

Processo	Finitura superficiale tipica	Intervallo di rugosità
Asportazione:		
Barenatura	Buona	0.5-6
Foratura	Media	1.5-6
Fresatura	Buona	1-6
Alesatura	Buona	1-3
Piallatura/Limatura	Media	1.5-12
Segatura	Scarsa	3-25
Tornitura	Buona	0.5-6
Rugosità [µm]		
Processo		
Rettifica con grani di dimensione media		0.4-1.6
Rettifica con grani di dimensione piccola		0.2-0.4
Levigatura		0.1-0.8
Lappatura		0.025-0.4
Superfinitura		0.013-0.2
Lucidatura		0.025-0.8
Brillantatura		0.013-0.4

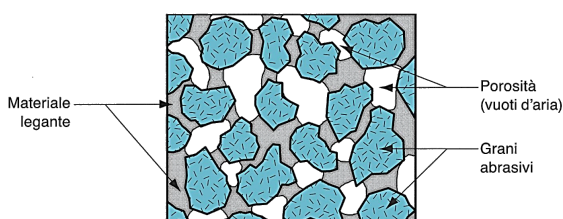
il valore indicato a fianco delle lavorazioni ovviamente indica il valore minimo ottenibile

Utensile da taglio: Mola

Un utensile a geometria indefinita dove i grani abrasivi sono tenuti insieme da un legante che conferisce di solito proprietà meccaniche alla mola come la rigidità e la resistenza all'usura.

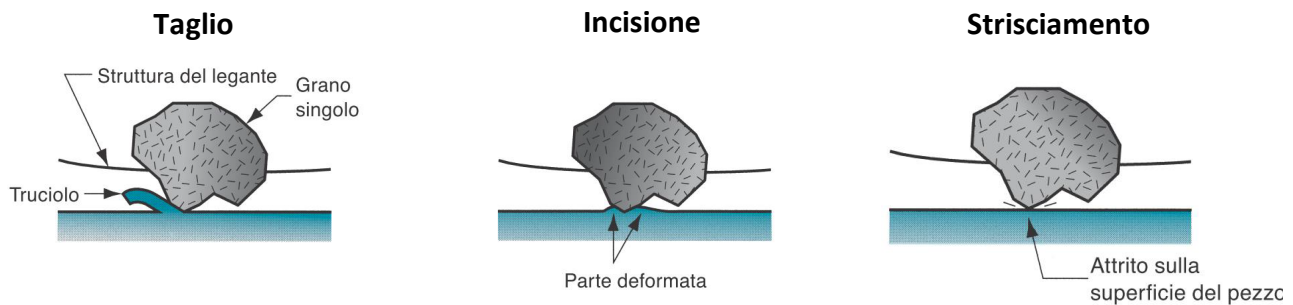
- 1) **Abrasivo** ha il compito di asportare il truciolo
- 2) **Legante** (costituisce la matrice della mola) tiene agglomerati i grani abrasivi, conferisce alla mola le necessarie caratteristiche di resistenza e di rigidità e consente il distacco dei grani abrasivi quando si sono usurati.

- Tipo di abrasivo (i grani devono essere il più possibile spigolosi e convessi)
- Grana
- tipo di agglomerante
- durezza
- porosità in quanto la matrice più i grani non riescono a riempire completamente il volume della mola ma in parte sarà occupato da aria 20/30%



- Volume abrasivo 30/40%
- Volume legante 30/40%
- Volume porosità 20/30%

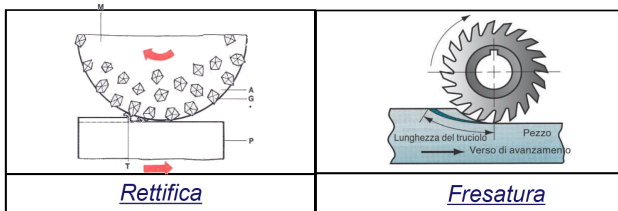
Siccome la posizione dei grani non è nota ogni singolo grano farà una lavorazione differente dagli altri e in generale compie **tre tipi di lavorazione**:



La meccanica dell'azione di taglio è molto simile al comportamento della meccanica della fresatura.

Ma il grano potrebbe anche non asportare ma incidere il materiale (deformarlo plasticamente senza rimuovere il materiale)

Oppure potrebbe strisciare generando un ricalcamento della superficie stesso che lascia una tensione di compressione residua che non fa male alle caratteristiche meccaniche del pezzo. Ma lo strisciamento inoltre genera molto calore.



- grani abrasivi molto piccoli e numerosi
- velocità di taglio rettificazione molto elevata
- grani abrasivi orientati casualmente
- con angoli spoglia negativi (-30° / -60°)
- mola è spesso auto-affilante (grani si smussano, fratturano, staccano, creando nuovi taglienti/grani)

è un utensile mutevole che man man che passa il tempo cambia il suo diametro in modo progressivo. Il diametro verrà a ridursi per il tasso di asportazione e a quel punto basta riposizionare la mola. Il singolo grano si usura e si arrotonda, ma sarebbe meglio, invece, se si rompe in modo da creare nuovi grani taglienti. Per migliorare questa proprietà si usano grani di materiali molto dura ma anche molto fragili.

Tipologie di abrasivi

Abrasivo	Descrizione	Durezza Knoop
Ossido di alluminio (Al_2O_3)	Il materiale abrasivo più comune, usato per rettificare acciaio e altre leghe di ferro ad alta resistenza.	2100
Carburo di silicio (SiC)	Più duro dell' Al_2O_3 , ma non altrettanto tenace. Le sue applicazioni includono i metalli duttili, come l'alluminio, l'ottone, l'acciaio inossidabile e i materiali fragili, come alcune ghise e ceramiche. Non può essere utilizzato per la rettificazione dell'acciaio a causa della forte affinità chimica tra il carbonio nel SiC e il ferro nell'acciaio.	1800
Nitrato di boro cubico (cBN)	Quando viene utilizzato come abrasivo, il cBN è prodotto sotto il nome commerciale Borazon dalla General Electric Company. Le mole in cBN sono utilizzate per materiali duri come gli acciai per utensili anche dopo trattamenti termici e le leghe aerospaziali.	5000
Diamante	I diamanti abrasivi sono presenti in natura o sono prodotti sinteticamente. Le mole diamantate di solito vengono utilizzate in applicazioni di rettificazione su materiali duri e abrasivi, come la ceramica, i carburi cementati e il vetro.	7000

I **primi due** materiali in elenco sono i più utilizzati in quanto sono molto economici e funzionali. Il **nitrato di boro cubico** è usato per alcune applicazioni speciali. Il vantaggio è che è molto molto più duro dei precedenti.

Il materiale più duro mi serve quando devo lavorare materiali ancora più duri. Al massimo della scala della durezza possiamo usare mole diamantate ma non sono affondate in un agglomerante che si usura ma il legante è metallico per garantire maggiore durata della mola.

Tipologie di leganti

Materiale legante	Descrizione
Legante vetrificato o ceramico	È composto prevalentemente da argilla cotta e materiali ceramici. La maggior parte delle mole comuni hanno un legante vetrificato. Sono robuste e rigide, resistenti alle alte temperature, e relativamente immuni all'acqua e agli oli che potrebbero essere utilizzati nei fluidi da taglio.
Legante al silicio	È composto da silicato di sodio (Na_2SO_3). Le sue applicazioni sono in genere limitate alle situazioni in cui serve ridurre al minimo la generazione di calore, come nella rettifica degli utensili da taglio.
Legante in gomma	È il più flessibile dei materiali leganti e viene utilizzato come materiale legante nelle mole da taglio.
Legante resinoidi	È costituito da varie resine termoindurenti, come il fenolo-formaldeide. Ha una resistenza molto elevata e viene utilizzato per operazioni di sgrossatura e di taglio.
Legante in gommalacca	Abbastanza resistente ma non particolarmente rigido; viene usato spesso in applicazioni che richiedono una buona finitura.
Legante metallico	I metalli, specialmente il bronzo, sono i materiali leganti più comuni per le mole diamantate e di cBN. Per legare il metallo e i grani abrasivi sulla superficie della mola si usano le tecniche di lavorazione di particolato, per risparmiare i costosi materiali abrasivi.

I più comuni li possiamo dividere in due sottocategorie:

- 1) **Leganti vetrificati** (vetri o ceramici) composti da argilla cotta e materiali ceramici
- 2) **leganti gommosi** che possono essere anche di resina

hanno applicazioni differenti, se volete comprare una mola vi conviene conoscere quale è il materiale del grano abrasivo che volete comprare e il legante e le caratteristiche che stabilite che vi servono e queste caratteristiche fanno riferimento ad un codice NORTON:

30	A	46	H	6	V	XX
						Simbolo del produttore della mola (opzionale). Tipo di legante: B = in resinoidi, BF = in resina rinforzata, E = in gommalacca, R = in gomma, RF = in gomma rinforzata, S = silicato, V = vetrificato. Struttura: La scala varia da 1 a 15: 1 = struttura molto chiusa, 15 = struttura molto aperta. Grado: La scala va da A a Z: A = molto morbida, M = media M, Z = dura. Dimensione dei grani: Grossa = grani da 8 a 24, Media = grani da 30 a 60, Fine = grani da 70 a 180, Molto fine = grani da 220 a 600. Tipo di abrasivo: A = ossido di alluminio, C = carburo di silicio. Prefisso: Simbolo del costruttore per l'abrasivo (opzionale).

Indicazioni tecnologiche

1) Granulometria

dipende dalla finitura che vogliamo ottenere, se aumenta la granulometria diminuisce la qualità della finitura che otteniamo. C'è anche una correlazione con la duttilità -> materiali duttili meglio granulometria grossa perché i materiali duttili si impastano e la mola così ci mette meno ad impastarsi.

2) Legante

passando da uno elastico a uno vetrificato aumenterà la resistenza agli urti della mola e di conseguenza anche la finitura e la velocità della mola. Per questo motivo

tendenzialmente usiamo spesso leganti vetrificati. Perché non li usiamo sempre allora? Perché c'è anche l'usura il legante elastico tiene meglio il tasso di usura.

Gli urti derivano dalla geometria del pezzo ovvero dall'impegno e dal disimpegno della mola. Una mola vetrificata resiste meglio nel senso che non si deforma e quindi tiene meglio la tolleranza

invece una mola elastica rispetto ad un urto si comprime e quindi rischia di generare delle tolleranze cattive e precisioni minori e anche di andare in vibrazione.

3) Durezza



Capacità di trattenere i grani abrasivi.
Quando voglio trattenerli di più?
Quando il singolo brano abrasivo si

usura più lentamente.

Se l'impasto è più dura avrò la mole che si deforma di meno, superficie di contatto minore, minore attrito e minore calore.

4) Struttura



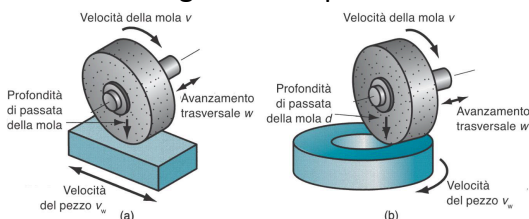
una struttura più chiusa tende a peggiorare la finitura superficiale e tende ad aumentare la superficie di contatto e quindi ad aumentare le forze di taglio.

Riassunto linee guida selezione di una mola

Problema applicativo e obiettivo	Linee guida e raccomandazioni
Rettifica di acciaio e ghise	Usare l'ossido di alluminio come abrasivo
Rettifica di metalli non ferrosi	Usare il carburo di silicio come abrasivo
Rettifica di acciaio per utensili induriti e alcune leghe aerospaziali	Usare il nitrato di boro cubico come abrasivo
Rettifica di materiali duri abrasivi come ceramiche, carburi cementati e vetro	Usare il diamante come abrasivo
Rettifica di materiali morbidi	Usare dei grani di dimensione più grossa e un grado della mola più duro
Rettifica di materiali duri	Usare dei grani di dimensione più piccola e un grado della mola più morbido
Ottimizzazione della finitura superficiale	Usare dei grani di dimensione più piccola e una struttura della mola più chiusa, delle velocità della mola (v) maggiori e delle velocità del pezzo (vw) minori
Massimizzazione della velocità di rimozione del materiale	Usare dei grani di dimensione più grossa, una struttura della mola più aperta e un legante vetrificato
Minimizzazione delle problematiche legate alle alte temperature, delle cricche e della deformazione della superficie del pezzo	Mantenere la mola affilata e ravvivarla frequentemente, utilizzare delle profondità di taglio (d) più piccole, delle velocità della mola (v) più basse e delle velocità dei pezzi (vw) più alte
Se la mola si impasta e si brucia	Usare una mola con un grado più morbido e una struttura più aperta
Se la mola si frattura troppo rapidamente	Usare una mola con un grado più duro e una struttura più chiusa

Lavorazioni

- Rettifica tangenziale in piano

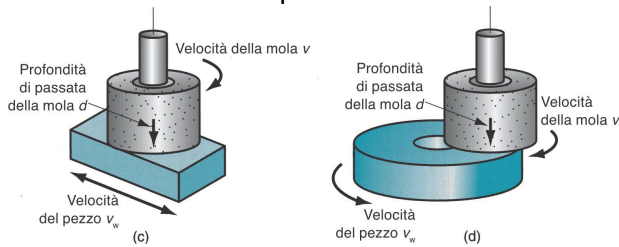


rettifica in piano quindi per superfici piane e pezzi prismatici. tangenziale e frontale in base all'asse di rotazione parallelo o ortogonale alla superficie.

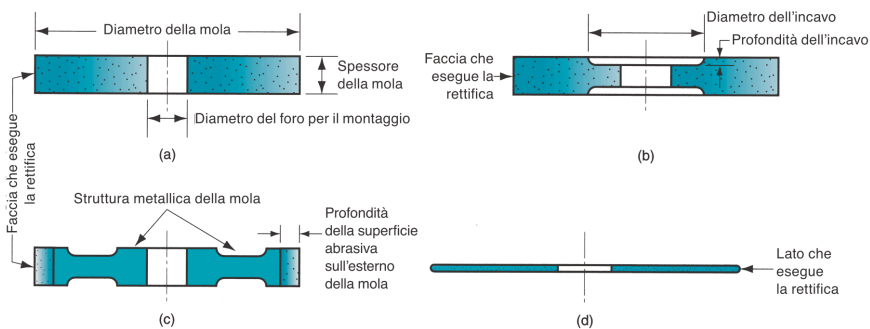
Abbiamo un moto di taglio che è sempre dato dalla velocità di rotazione della mola e sempre abbiamo moti

di spostamento che possono essere dati alla mola o al pezzo

- Rettifica frontale in piano



Geometria della mola per rettifica esterna

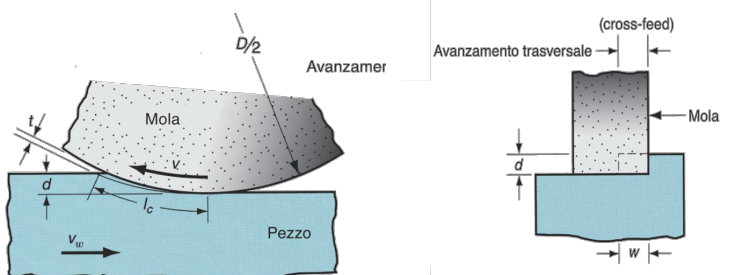


- a) Diritta
- b) A due incavi
- c) A struttura metallica
- d) Da taglio (per troncare)

Le mole ad incavi o con struttura metallica servono per poter inserire una

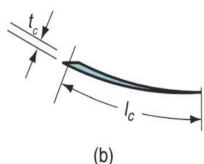
struttura metallica che irrigidisce la mola in modo da poter essere utilizzata a velocità di rotazione superiori.

Parametri della lavorazione



- D = diametro della mola [mm]
- d = profondità di passata/taglio [mm]
- v_w = velocità del pezzo [mm/min]
- v = velocità della mola [m/min]
- n = numero di giri mandrino [rpm]
- w = avanzamento trasversale [mm]

Sezione del truciolo



Sezione a virgola come quella della fresatura periferica. Avrà una sua lunghezza, un suo spessore massimo in uscita e una sua larghezza. La larghezza dipende dalla dimensione del grano

- w' = larghezza del truciolo [mm]
- t_c = spessore del truciolo [mm]
- rg = rapporto di forma del truciolo
- l_c = lunghezza arco di contatto e lunghezza media del truciolo [mm]

$$r_g = \frac{w'}{t_c}$$

$$l_c = \sqrt{Dd} \quad \text{rg dipende dalla combinazione dei parametri e dalla granulometria.}$$

Grandezze di lavoro

- *velocità periferica della mola:*

$$v = \pi \cdot D \cdot n$$

- tipo di operazione;
- materiale in lavorazione.
- velocità angolare massima indicata sulla mola dal costruttore.

- *tasso di rimozione del materiale:*

$$R_{MR} = v_w w d$$

- da massimizzare produttività

- n_c = numero di trucioli generati nell'unità di tempo (grani/min)

$$n_c = 1000 \cdot v \cdot w \cdot C_g$$

- C_g = numero di grani per unità di superficie sulla mola [grani/mm²]

- N = numero di grani mola in presa totali

$$N = C_g \cdot l_c \cdot w$$

- F'_c = forza di taglio singolo grano [N/grano]

$$F'_c = K_1 \left(\frac{r_g v_w}{v C_g} \right)^{0.5} \left(\frac{d}{D} \right)^{0.25}$$

- F_c = forza di taglio totale [N]

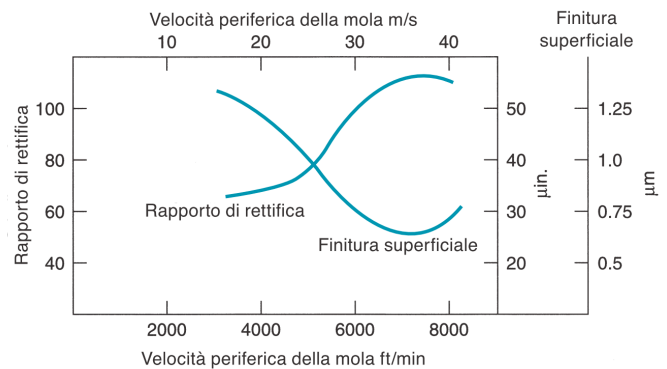
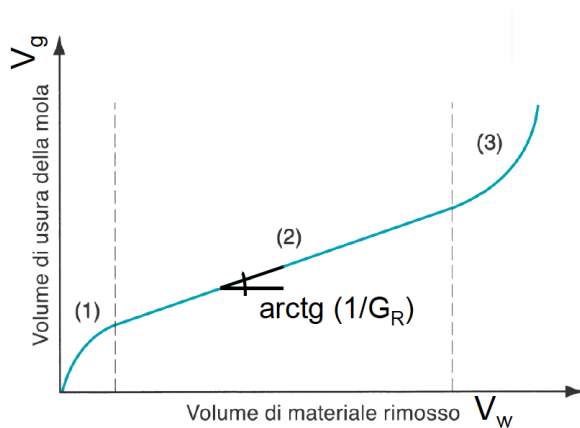
$$F_c = N \cdot F'_c$$

- U_v = energia specifica [J/mm³]

$$U_v = \frac{F_c v}{v_w w d}$$

$$T_s = K_2 d^{0.75} \left(\frac{r_g C_g v}{v_w} \right)^{0.5} D^{0.25}$$

Usura della mola



$$GR = \frac{V_w}{V_g} \quad \text{Valori tipici } 95 < GR < 125$$

Ci sono tre principali meccanismi per cui la mola si usura:

- 1) Rottura dei grani (friabilità)
- 2) Usura per attrito (smussamento dei grani)
- 3) La rottura del legante

Inoltre quando i trucioli vanno a chiudere i pori della mola si dice impastamento della mola e si verifica principalmente nella zona 3. Questo causa un indebolimento dell'azione di taglio della mola e un aumento del calore e della temperatura superficiale del pezzo.

Il **rapporto di rettifica GR** è usato per indicare la pendenza della curva ovvero quanto veloce si usura nella parte a regime. Questo rapporto di solito aumenta all'aumentare della velocità della mola. La ragione di questo effetto è che la dimensione dei trucioli formati da ogni grano è più piccola per velocità elevate e quindi la quantità di rottura dei grani è ridotta.

Ma siccome la finitura superficiale migliora all'aumentare della velocità e quindi si tende a lavorare a velocità elevate.

Ma quando la velocità diventa troppo alta l'usura per attrito e la temperatura superficiale aumentano in modo elevato. Effetto studiato da **Krabacher** illustrato nel grafico.

Quando la mola raggiunge la terza regione ha bisogno della **ravvivatura** che consente di:

- 1) Rimuovere i grani smussati sulla periferia esterna della mola in modo da far apparire dei nuovi grani affilati
- 2) Rimuovere i trucioli che hanno impastato la mola.

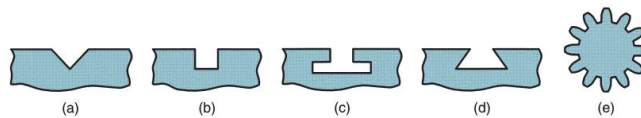
Oltre la ravvivatura va fatta la **centratura** che consente di ripristinare la forma cilindrica della mola stessa.

Lavorazioni a moto di taglio rettilineo

- Limatura (limatrice)
- Piallatura (piallatrice)
- Stozzatura (stozzatrice)
- Brocciatura (brocciatrice)
- Segatura (segatrice)

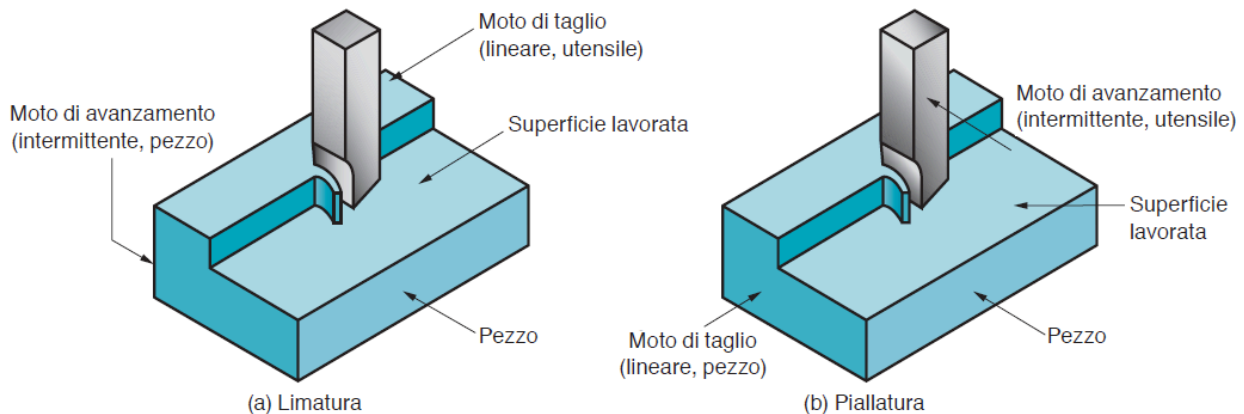
Sono tutte lavorazioni semplici dal punto di vista cinematico perché abbiamo un moto di taglio lineare quindi anche la meccanica delle forze di taglio è semplice si avvicina di più al taglio ortogonale. L'utensile trasla in un'unica direzione.

Limatura e piallatura

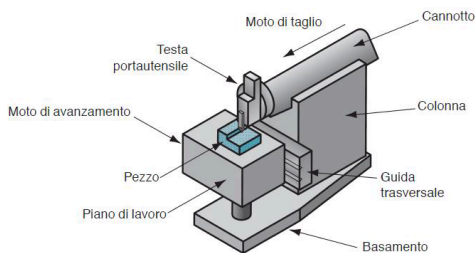


Entrambe le lavorazioni utilizzano un utensile mono tagliente in movimento relativo lineare rispetto al pezzo, l'unica differenza è che nella limatura il moto di taglio è posseduto dall'utensile mentre nella piallatura dal pezzo.

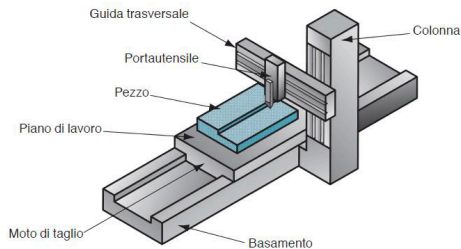
Solitamente si ricorre a questi tipi di lavorazione quando il pezzo è particolarmente lungo sopra i 100 o 200 mm.



Sono macchine più semplici e più economiche rispetto ai centri di lavoro come i torni. Non c'è mandrino e sono delle macchine normalmente a 2 assi, 2 assi e mezzo o 3 assi ma durante il taglio si usa una sola direzione mentre le altre servono solo per posizionare il pezzo o per magari per modificare il taglio durante il movimento.



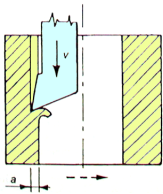
La limatrice è composta da un canotto che si muove e compie una corsa di andata dove viene asportato il truciolo e una corsa di ritorno di solito molto più rapida dove l'utensile viene leggermente alzato e il pezzo viene riposizionato per la passata successiva. Per questo motivo è una lavorazione particolarmente lenta.



Nella piallatrice il moto del taglio è eseguito da un piano di lavoro che si muove sottoponendo il pezzo alla lavorazione di asportazione. Di solito le piallatrici permettono di lavorare pezzi molto più lunghi rispetto alla limatrice.

La piallatura e la limatura possono essere anche utilizzate per creare forme diverse dalle superfici piane. L'unica limitazione è che la superficie di taglio deve essere rettilinea in modo da permettere la creazione di scanalature, fessure, dentature o altre forme.

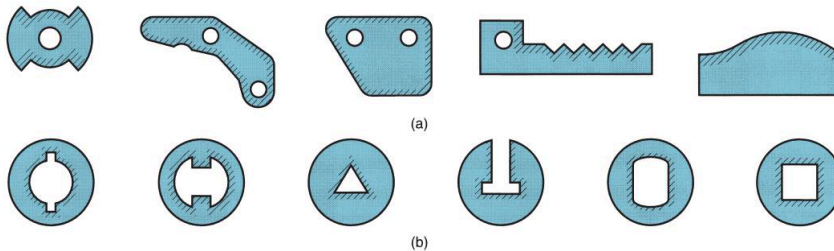
Stozzatura



Realizzazione di superfici interne a spigoli vivi come fori poligonali, cave per chavette e linguette, profili scanalati ecc...
A livello di moto dell'utensile è riconducibile alla limatura dove è l'utensile che si muove mentre il pezzo rimane fisso

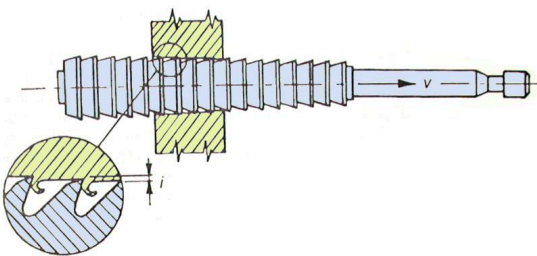
Brocciatura

È un'operazione che serve per ampliare, sagomare, modificare una cavità interna; oggi viene impiegata anche su superfici esterne. Il moto è rettilineo e tutta la lavorazione viene eseguita in una sola passata



Si usa quando abbiamo elevate profondità di passata ovvero tanto materiale da togliere e quindi si usano utensili pluritaglienti che lavorano sempre in modo traslante, in modo da rimuovere più velocemente il materiale in quanto ogni tagliente asporta parte del materiale da togliere.

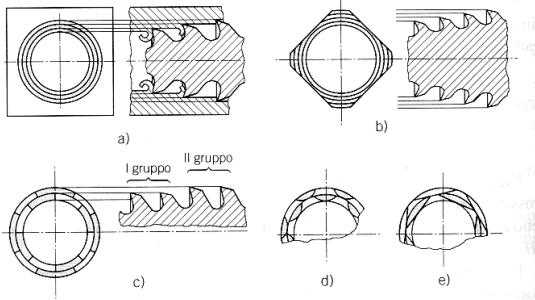
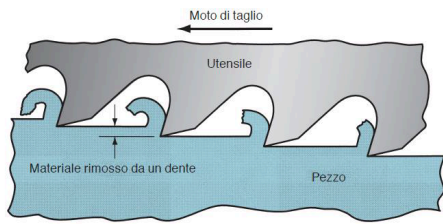
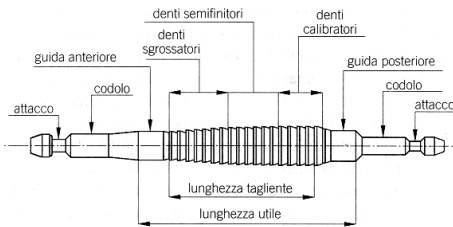
È una lavorazione molto produttiva e che ha numerosi vantaggi come una buona finitura superficiale, tolleranze ristrette e varietà di forme che si possono realizzare sul pezzo. Però è solitamente un'operazione molto costosa.



L'utensile (**broccia**) è costituito da vari denti disposti di seguito l'uno rispetto all'altro con incremento di diametro.

L'utensile molto lungo dotato di un numero di denti Z grande. La lunghezza dell'utensile deve essere molto più lunga di quella del pezzo da lavorare. Sono utensili speciali, specialmente progettati per quella lavorazione

(utensili di forma) ma molto grossi e quindi anche molto costosi.



Ciascun dente si fa carico di asportare una porzione della profondità di passata, il tagliente che passa per primo che si trova a diametro più piccolo fino a diventare più grande. Diventa critico per chi progetta l'utensile speciale (la broccia), è importante definire il numero di denti totali e la grandezza. Noto il perimetro, il valore dell'affondamento allora conosciamo il volume contenuto della cavità tra un dente e quello successivo. Il volume deve essere progettato per essere molto più grande del truciolo che si accumula all'interno della cavità in quanto verrà espulso solo quando il dente della broccia ha terminato la sua asportazione.

Le macchine per la brocciatura possono essere sia verticali che orizzontali, solitamente quelle orizzontali hanno maggiore corsa e sono anche più grandi.

Esempio di allargamento di un foro passante tramite brocciatura

Supponiamo di voler allargare un foro passante da $\phi 94$ a $\phi 100$

Supponiamo che la dimensione assiale del foro sia $l=200$

Supponiamo che $i=0.08$ mm/dente e che sia costante (i incremento radiale del dente)

$$Z = \frac{d}{i} = \frac{3}{0.08} \cong 38 \rightarrow i = 0.079 \text{ mm / dente}$$

Determinazione del passo $V_{vano} \geq kV_{truciolo}$ $k=13$ per la ghisa

$$V_{vano} \cong \frac{ptb}{2} \quad V_{truciolo} = ilb \quad \text{Rapporto di forma } m = \frac{p}{t} \in [2,3]$$

$$p \geq \sqrt{2mkil} \rightarrow p \geq \sqrt{2 * 3 * 13 * 0.079 * 200} = 35 \text{ mm}$$

Alcune di queste sono tutte regole empiriche ricavate sperimentalmente, inoltre non potendo avere un numero di denti con la virgola dobbiamo più volte ricalcolarli fino a trovare un compromesso.

Le velocità di lavorazione vanno da 1 a 20 m/min decisamente basse perché la lavorazione sul singolo dente è maggiore quindi è necessario andare più piano.

Numero medio di denti in presa

$$z = \frac{l}{p} = \frac{200}{35} \cong 6 \in [3, 9] \rightarrow \text{ok}$$

Lunghezza della parte dentata

$$L_{dent} = Zp = 38 * 35 = 1330mm \rightarrow L_{tot} = 1500mm$$

Potenza

$$k_c = 0.025 \frac{kW}{\text{cm}^3 / \text{min}} \quad v_c = 3 \text{ m / min}$$

$$P_m = \frac{z * k_c * i_b * v_c}{\eta} = \frac{6 * 0.025 * 0.0079 * \pi 10 * 300}{0.7} \cong 16kW$$

Tempo alla velocità di lavoro

$$t_m = \frac{L_{tot} + e + l}{v_c}$$

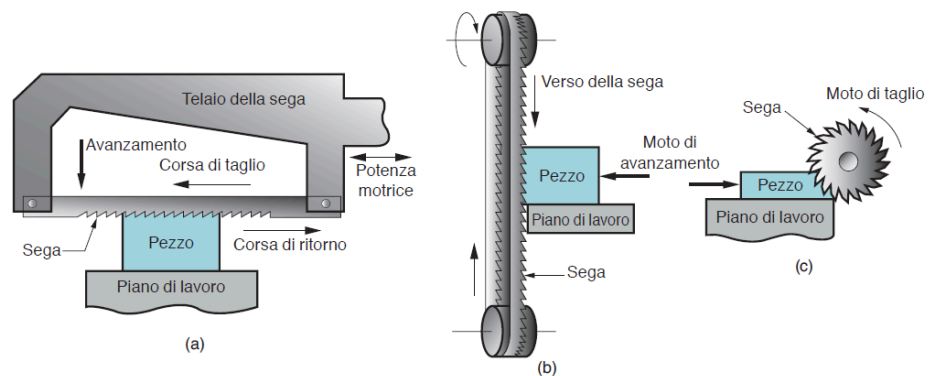
Segatura

È un processo utilizzato per produrre un taglio sottile nel pezzo per mezzo di un utensile costituito da una serie di denti vicini tra loro. È utilizzata di solito per dividere un pezzo in due parti o per tagliare una porzione non desiderata. Sono lavorazioni dette anche di troncatura.

Nella maggior parte delle lavorazioni il pezzo è mantenuto fermo mentre la sega avanza.

Ci sono principalmente tre tipi di segatura:

- Alternato
- A nastro
- Circolare



Usura degli utensili

Le forze e le temperature elevate originate dall'interazione tra l'utensile e il pezzo possono compromettere la funzionalità dell'utensile stesso ovvero se aumentano troppo l'utensile subisce danneggiamenti. Inoltre c'è anche l'usura progressiva dell'utensile che ne compromette la funzionalità rendendo necessaria la sostituzione.

Ci sono principalmente tre grandi modi attraverso i quali l'utensile da taglio può danneggiarsi durante la lavorazione:

1. **Danneggiamento da frattura o scheggiatura** che si verifica quando la forza di taglio sulla punta dell'utensile diventa eccessiva
2. **Deformazione plastica** che si verifica quando la temperatura di taglio è troppo alta e di conseguenza origina una riduzione delle proprietà meccaniche del materiale dell'utensile con una conseguente deformazione.
3. **Usura graduale** che modifica progressivamente la geometria iniziale dell'utensile compromettendone l'efficienza e la qualità del taglio

Mentre le prime due sono assolutamente da evitare in quanto rendono inutilizzabile l'utensile, l'usura graduale è quella meno critica in quanto permette comunque l'uso prolungato dell'utensile con conseguenti vantaggi economici e produttivi.

Esempio:



Due spigoli nuovi e uno pesantemente usurato, la placchetta cambia colore perché parte del materiale lavorato si attacca all'utensile e perché questi utensili hanno un rivestimento in materiali molto duri che hanno un colore diverso.

Si è usurato il petto dove c'è anche un avvallamento c'è il labbro di usura sui fianchi dell'utensile e infine c'è anche un rigonfiamento sullo spigolo dovuto alla deformazione plastica e anche fratturato.

scheggiature

fratture

deformazioni plastiche

avvallamento del petto

materiale dell'utensile che viene asportato

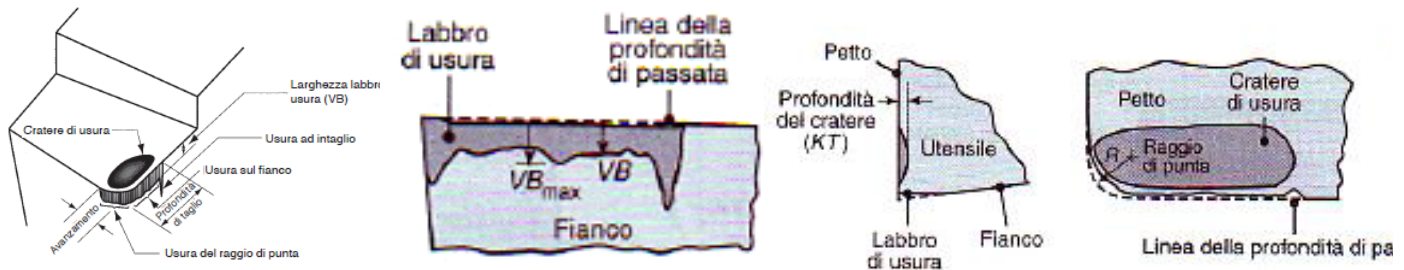
Meccanismi di usura:

- **Abrasione:** usura meccanica causata da particelle dure incluse nel materiale lavorato che incrinano e rimuovono piccole porzioni dell'utensile. Si manifesta principalmente sul fianco **originando il labbro d'usura** e la piccola parte determina la formazione del cratere sul petto.
- **Adesione:** avviene quando due metalli entrano in contatto e le pressioni e le temperature in gioco sono alte, si può originare una saldatura tra le relative superfici. Questa condizione si verifica tipicamente tra il truciolo e il petto dell'utensile ovvero mentre il truciolo scorre sul petto piccole particelle dell'utensile aderiscono al truciolo staccandosi dalla superficie dell'utensile.
- **Diffusione:** scambio di atomi sulla superficie di contatto tra due materiali, avviene sulla superficie di contatto tra truciolo e utensile. Man mano che questo fenomeno si sviluppa l'utensile diventa sempre più vulnerabile all'abrasione e adesione. È ritenuta la principale causa di **formazione del cratere**.

- **Reazioni chimiche:** a causa delle alte temperature nelle zone di contatto possono aver luogo delle reazioni chimiche l'esempio di ossidazione, lo strato di ossido essendo più morbido si stacca più facilmente riducendo la vita dell'utensile.
- **Deformazione plastica:** deformazione plastica del tagliente avviene quando le forze che agiscono abbinate ad alte temperature causano la deformazione plastica del bordo del tagliente

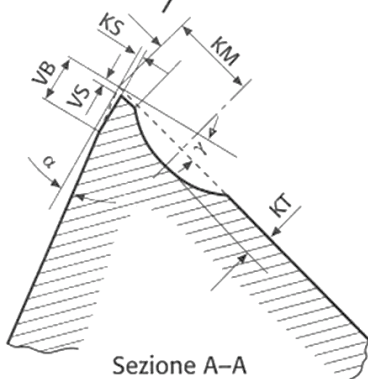
La maggior parte di questi meccanismi di usura vengono accelerati dall'incremento delle velocità di taglio e della temperatura.

Usura utensile



L'usura si concentra principalmente in due punti dell'utensile da taglio: sulla faccia superiore (petto) e sul fianco. Sul petto si forma il **cratere di usura** mentre sul fianco il **labbro di usura**. Solitamente il cratere è costituito da una cavità che si forma per l'azione del truciolo che scorre sulla superficie del tetto mentre il labbro è dovuto allo sfregamento tra la superficie lavorata del pezzo e il fianco dell'utensile.

Cratere sul petto



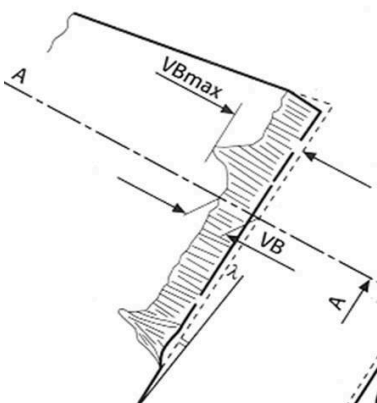
L'usura si misura con il microscopio, le aziende rilevano l'usura per mezzo della finitura superficiale.

La cosa migliore è prevedere la vita utile del modello, quindi dare un tempo medio di utilizzo prima di sostituirlo sia che sia usurato completamente sia che no.

In generale la dimensione del cratere è meno importante rispetto a quella del labbro in quanto incide meno sulla finitura superficiale del pezzo ma determina l'indebolimento del tagliente.

Si misura per mezzo di KM e KT

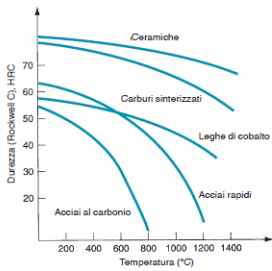
Labbro sul fianco



L'ampiezza del labbro di usura VB ma il punto di massimo non è molto rappresentativo ma si preferisce misurare un VB medio al microscopio.

Influenza principalmente la precisione dimensionale e la finitura superficiale, quindi incide di più sulla qualità della lavorazione.

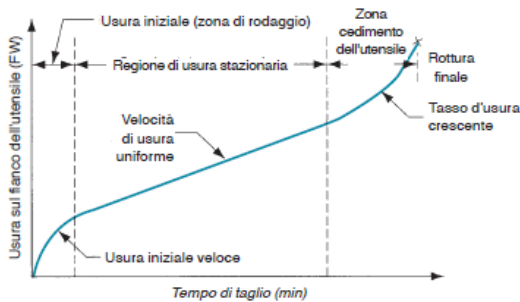
Effetto della temperatura sull'usura



Ci sono materiali più stabili termicamente come carburi sinterizzati carburo di tungsteno.

Ad esempio le ceramiche decadono ancora più lentamente con la temperatura addirittura all'aumentare della temperatura aumentano la tenacità per cui lavorano meglio se sono calde. (Durezza a caldo dipende dal materiale)

Usura dell'utensile in funzione del tempo di taglio



Regione di usura rapida iniziale -> dopo pochi secondi si forma subito un piccolo labbro di usura, dopo di che il tasso di usura si stabilizza (derivata della curva) la derivata nel tratto centrale potrebbe essere una curva anche meno pendenza.

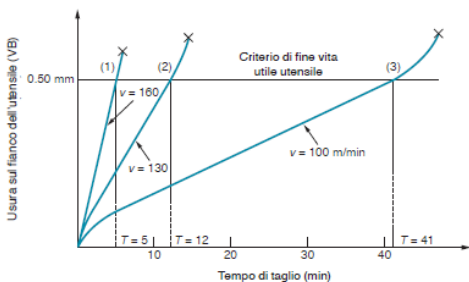
Il tratto finale in cui l'utensile sarà deceduto in cui il tasso di usura cresce rapidamente, dovremmo cercare di prevenire l'insorgenza della terza fase e

questo si fa fissando un tetto al labbro di usura. Quando VB ha raggiunto una certa soglia non è più ammissibile l'utilizzo dell'utensile

Nella zona di cedimento dell'utensile le temperature di taglio sono più elevate e l'efficienza generale del processo si riduce quindi se si continua ad utilizzare l'utensile è molto probabile che si va incontro ad un guasto.

Siccome durante un processo non si può portare un utensile a rottura allora si definisce un criterio di vita utile che è per esempio la larghezza del labbro di usura VB che quando raggiunge un determinato valore si deve terminare la lavorazione con quel tagliente.

Effetto della velocità di taglio sull'usura

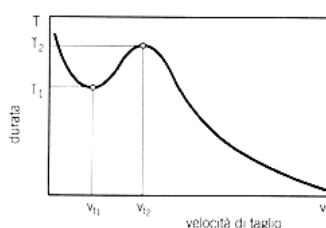
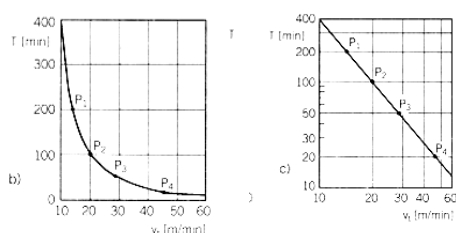


Ottenendo questa curva tramite esperimenti con vari utensili e controlli al microscopio, aumentando la velocità si rifanno gli esperimenti l'utensile sarà più caldo e quindi la durata sarà minore.

Possiamo ripetere quante volte vogliamo le prove ma il minimo è due per costruire una linea di taglio.

Si mostrano i valori di velocità e di durata dell'utensile fissando un criterio di fine vita dell'utensile, in questo caso corrispondente ad un labbro di usura pari a 0,50 mm.

Curve di durata dell'utensile



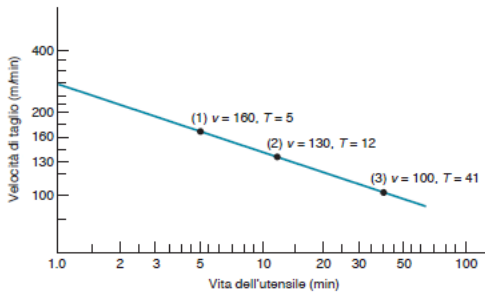
Nel punto di minimo è dove si forma il tagliente di riporto, nella zona dopo la formazione del tagliente di riporto possiamo linearizzare a funzione prima no

Relazione di vita utensile (Taylor)

È possibile esprimere la durata dell'utensile tramite questa relazione formulata da Taylor:

$$v_c T^n = C$$

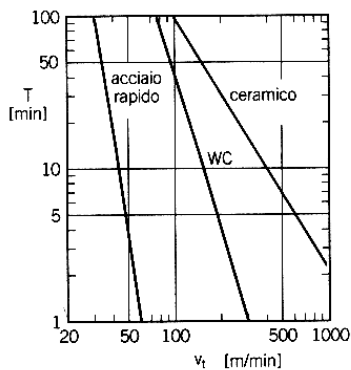
l'esponente n dipende dai materiali dell'utensile e del pezzo e anche da tutti gli altri parametri di lavorazione. Ogni combinazione di materiale del pezzo e dell'utensile, ogni condizione di lavorazione (avanzamento, profondità di passata) e ogni criterio di fine vita utilizzato produce diversi valori di n e C .



siccome le costanti da determinare sono n e C servono almeno due prove per determinarle in quanto una retta passa per due punti.

Mettendo a sistema due di queste equazioni con due variabili di due punti possiamo trovare le costanti n e C

$$\begin{aligned} \log v_c + n \log T &= \log C \\ n \log T &= -\log v_c + \log C \\ \log T &= (-\log v_c + \log C)/n \end{aligned}$$



materiale dell'utensile	C [m/min]	n
acciaio rapido	60	0,15
metallo duro	300	0,3
ceramico	1500	0,6

valori tipici delle costanti per i materiali

mentre a destra il grafico rappresentante la Legge di Taylor

Legge di Taylor generalizzata

Ci sono altre formule per determinare il secondo parametro importante che è l'avanzamento. Possiamo esplicitare l'avanzamento ottenendo così la legge di Taylor generalizzata. Possiamo complicare ulteriormente il modello considerando l'effetto del materiale a lavorare tramite la durezza del materiale. Da concludere la legge generalizzata

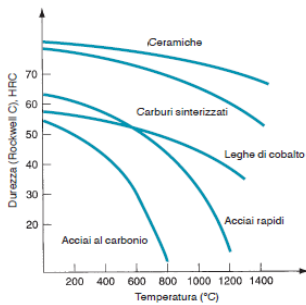
Materiali per utensili

Le principali caratteristiche dei materiali per utensili sono:

- durezza a freddo
- durezza a caldo (capacità di mantenere la durezza del materiale ad alte temperature)
- tenacità (capacità di assorbire energia meccanica prima di rompersi)
- resistenza all'usura (La durezza è la prop. più importante per resistere all'abrasione)
- conducibilità termica (smaltimento del calore)
- coefficiente di attrito
- costo

I materiali per utensili da taglio possiedono una combinazione di queste caratteristiche in vari gradi in base alle caratteristiche anche del materiale da lavorare e dai parametri della lavorazione.

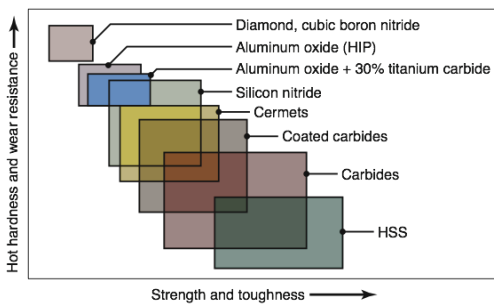
Durezza-temperatura



Andamenti tipici della durezza dei vari materiali in funzione della temperatura. Ad esempio l'acciaio al carbonio mostra una rapida perdita di durezza all'aumentare della temperatura. L'acciaio rapido ha un andamento sicuramente migliore in quanto perde meno durezza con la temperatura.

Con lo sviluppo dei materiali utilizzati per utensili ha anche permesso di raggiungere velocità di taglio molto più elevate e quindi di conseguenza di aumentare la produttività dei processi.

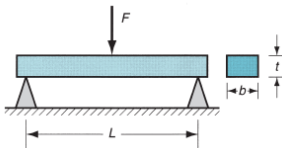
Durezza-tenacità



Durezza e tenacità sono legati da questo grafico e si può notare che il linea di massima materiali più duri sono meno tenaci e viceversa.

Il diamante sinterizzato è il materiale più duro.

Durezza e resistenza alla rottura trasversale (TRS Transverse rupture strength)



$$TRS = 1,5 \frac{F * L}{b * t^2}$$

Materiali	Durezza	Resistenza alla rottura trasversale (TRS) MPa
Acciaio al carbonio	60 HRC	5200
Acciaio rapido	65 HRC	4100
Leghe al cobalto	65 HRC	2250
Carburi di tungsteno sinterizzati (WC)		
Basso contenuto di Co	93 HRA, 1800 HK	1400
Alto contenuto di Co	90 HRA, 1700 HK	2400
Cermet (TiC)	2400 HK	1700
Allumina (Al ₂ O ₃)	2100 HK	400
Nitruro di boro cubico	5000 HK	700
Diamante policristallino	6000 HK	1000
Diamante naturale	8000 HK	1500

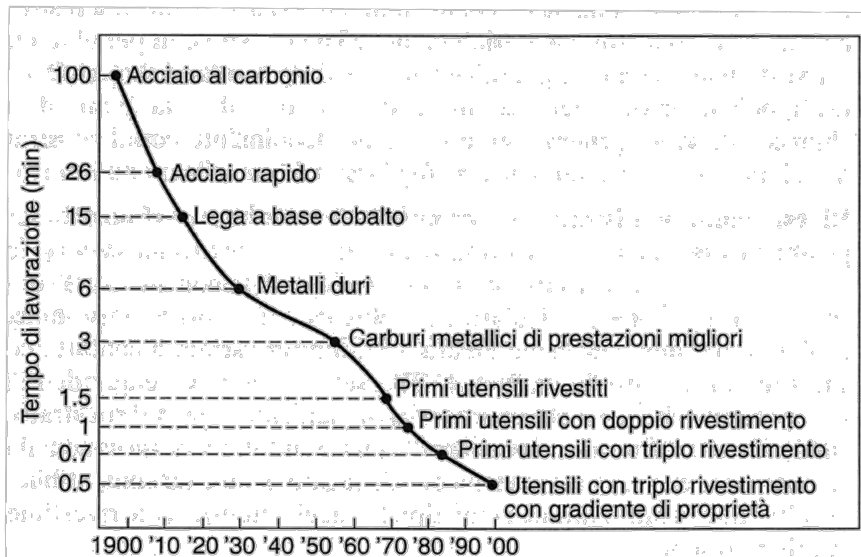
Fonti [7], [12], [20] e altri.
*I valori di durezza e TRS sono quelli tipici da usare per i confronti. Si possono verificare delle variazioni nei valori a seconda delle differenze nella composizione e nel processo di produzione primario.

la resistenza alla rottura trasversale è una proprietà usata per indicare la tenacità per i materiali duri. Sono valori tipici da usare per i confronti quindi vedere a parità di durezza come varia il valore di TRS (tenacità) per materiali diversi e viceversa.

Materiali per utensili:

- HSS (high speed steel) Acciai rapidi
- Leghe fuse (stelliti) come leghe di cobalto, cromo e tungsteno
- Carburi metallici sinterizzati
- Ceramici
- Cermet (ceramic metal)
- CBN (nitruro cubico di boro)
- Diamante

+ Vc
a parità di usura



Gli acciai al carbonio sono poco usati e devono essere trattati termicamente per poter ottenere una durezza tale da poter essere usate nelle macchine utensili. Inoltre date le basse concentrazioni di elementi di lega gli acciai al carbonio non possiedono una elevata durezza a caldo quindi non possono essere utilizzati con velocità di taglio elevate.

HSS (high speed steel)

Elemento della lega	Contenuto tipico in % di peso	Funzione dell'elemento
Tungsteno	T-type HSS: 12-20 M-type HSS: 1.5-6	Aumenta la durezza a caldo Migliora la resistenza all'abrasione attraverso la formazione di carburi duri
Molibdeno	T-type HSS: none M-type HSS: 5-10	Aumenta la durezza a caldo Migliora la resistenza all'abrasione attraverso la formazione di carburi
Cromo	3.75-4.5	Aumenta la profondità di tempra durante il trattamento termico Migliora la resistenza all'abrasione attraverso la formazione di carburi e la resistenza alla corrosione (effetto minore)
Vanadio	1-5	Combinato con il carbonio aumenta la resistenza all'usura Ritarda la crescita dei grani per una migliore tenacità
Cobalto	0-12	Aumenta la durezza a caldo
Carbonio	0.75-1.5	Principale elemento di indurimento nell'acciaio Fornisce carbonio per formare carburi con altri elementi leganti per aumentare la resistenza all'usura

È un acciaio fortemente legato in grado di mantenere una buona durezza a caldo per cui consente di usare velocità di taglio molto elevate. Esistono principalmente due tipi di HSS ovvero al tungsteno (T) o al molibdeno (M). Dal punto di vista economico è uno degli utensili più importanti ed utilizzati oggi.

L'HSS è particolarmente adatto per realizzare forme particolari e complicate degli utensili, come trapani, maschi, frese, barenì, broccie.

In particolare le punte a forare sono spesso rivestite di con uno strato sottile di nitruro di titanio per aumentare ulteriormente le prestazioni.

Carburi metallici sinterizzati (cermet)

TABELLA 15.6 Sistema R513-1975 ISO(E) "Applicazione dei Carburi nelle Lavorazioni di Asportazione di Truciolo".

Gruppo	Tipo di carburo	Materiali lavorati	Numerazione (Cobalto e Proprietà)
P (blu)	WC-TiC-TaC-Co alto legato	Acciaio, colate in acciaio, ghise duttili (metalli ferrosi a truciolo lungo)	Da P01 (basso contenuto di cobalto e durezza massima) a
M (giallo)	leghe di WC-TiC-TaC-Co	Acciaio facilmente lavorabile, ghisa grigia, acciaio inossidabile austenitico, superleghe	P50 (alto contenuto di cobalto e tenacità massima), da M10 (basso contenuto di cobalto e durezza massima) a
K (rosso)	Solo WC-Co	Metalli e leghe non ferrosi, ghise grigie (metalli ferrosi con trucioli corti), non metalli	M40 (alto contenuto di cobalto e tenacità massima), da K01 (basso contenuto di cobalto e durezza massima) a K40 (alto contenuto di cobalto e tenacità massima)

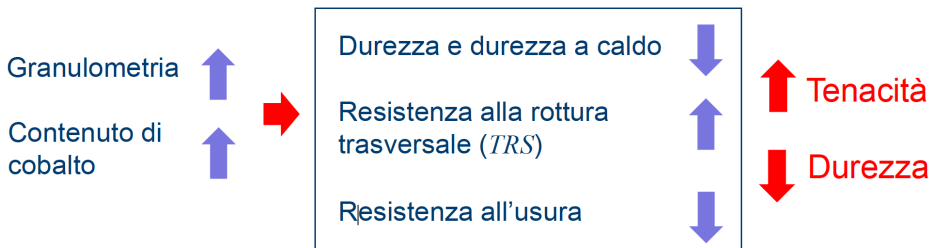
- alta resistenza alla compressione, ma da bassa a moderata resistenza alla trazione
- elevata durezza (90-95 HRA)
- buona durezza a caldo
- buona resistenza all'usura
- elevata conducibilità termica

- elevato coefficiente elastico, con valori di E fino a circa $600 \times 10^3 \text{MPa}$
- durezza inferiore a quella dell'acciaio rapido

Classificano i carburi in 3 classi, classe C, classe M e classe K (con composizione chimica differente) che sono adatti alla lavorazione di materiali differenti con durezza crescente. Le classi P M K hanno in comune il cobalto sinterizzato che funge da legante con i carburi di tungsteno.

Il carburo di tungsteno piace perchè è molto duro a caldo ed è anche abbastanza tenace buon compromesso tra durezza a caldo ed elevata tenacità. Se scegliamo materiali troppo duri e non tenaci dobbiamo stare attenti alla profondità di passata.

Granulometria tipica: $0,5 \div 5 \mu\text{m}$
 Contenuto tipico di cobalto: $3\% \div 12\%$



Nonostante il carburo di tungsteno rappresenta un buon compromesso tra durezza e tenacità, come si può aumentare durezza senza perdere tenacità?

Si può fare un **rivestimento** (materiali che si depositano con trattamenti al plasma (elettrolitici)) sono rivestimenti molto sottili 10 15 micron ma sono degli ossidi quindi

Sviluppi recenti: granulometrie ultrafini (dimensioni inferiori al micron) dei vari tipi di metallo duro presenti (WC, TiC, e TaC)

Granulometria ultrafine: in caso di dimensioni delle particelle inferiori al micron, la diminuzione del TRS si riduce o addirittura si elimina

➡ elevata durezza e buona tenacità

aggiungo dei livelli di durezza pari a quelli degli ossidi e la tenacità è garantita dal supporto. Ma le durezze devono essere paragonabili non troppo diverse se no effetto lastra di vetro su materasso. Di solito il rivestimento è il primo che salta ma in realtà il rivestimento mi interessa sul petto e non sullo spigolo.

Ottimizzazione delle condizioni di taglio

Economie delle lavorazioni per asportazione. Uno dei problemi principali è scegliere le condizioni di taglio e il tipo di processo affinché si massimizzi il profitto per l'azienda oppure si massimizzi il tempo di lavorazione.

SISTEMA

- Variabili decisionali X
- Costanti
- Relazioni
- Vincoli



Che cosa vogliamo ottimizzare?

Solitamente si vuole ottimizzare sempre il profitto del processo che spesso prende il sopravvento sulla qualità del prodotto.

Per noi la variabile su cui ottimizziamo sarà la velocità di taglio mentre nella realtà potranno esserne anche altre. E ottimizziamo imponendo dei vincoli come

per esempio la rugosità superficiale, tolleranze dimensionali o potenza della macchina che abbiamo a disposizione.

X_0 è la funzione obiettivo e dobbiamo trovare il valore che massimizzi o minimizzi tale funzione. Quindi è necessario creare un modello economico che è la parte più difficile e di conseguenza il risultato varierà in base al modello considerato.

Di solito le strategie usate sono numeriche, ma nel caso di quelle analitiche dovremo costruire un modello analitico derivarlo e trovare i massimi o i minimi mentre nel caso di prove sperimentali utilizzeremo la regressione dei dati con un approccio statistico.

Funzione obiettivo

1) Tempo di produzione

$$t_p = t_0 + \frac{V}{Q} + \frac{V}{QT} t_{cu} = t_0 + \frac{V}{Q} \left(1 + \frac{t_{cu}}{T} \right)$$

con

- $Q = A_D v_c = a_p f v_c \mathbf{1000}$

- t_0 -> tempi fissi indipendenti dai parametri di processo [min]

- T -> tempo di durata dell'utensile [min]

- t_{cu} -> tempo di cambio utensile (da moltiplicare per tutte le volte che cambiamo l'utensile ovvero V/Q quanto tempo passiamo a lavorare) (V/Q diminuisce con la velocità di taglio ma T è più presente per cui complessivamente c'è un aumento con la velocità di taglio) [min]

- V -> volume di materiale da asportare [mm³]

- Q -> MRR: tasso di asportazione [mm³/min]

2) Costo di produzione

$$C_p = C_0 + C_m \cdot t_p + C_{ut} \frac{V}{Q \cdot T} = C_0 + C_m \cdot \left[t_0 + \frac{V}{Q} \left(1 + \frac{t_{cu}}{T} \right) \right] + C_{ut} \frac{V}{Q \cdot T}$$

$$C_p = C'_0 + C_m \frac{V}{Q} \left[1 + \left(t_{cu} + \frac{C_{ut}}{C_m} \right) \frac{1}{T} \right]$$

Con:

- **C₀** -> costo fisso per l'accensione della macchina e per l'impegno dell'operaio, costo medio energia e stimare questo costo è compito dell'ufficio di gestione dell'azienda. [€]
- **C_m** -> costo orario macchina utensile [€/min]
- **C_{ut}** -> costo medio del tagliente [€/tagliente] costo delle placchette dell'utensile (costo vivo) ed è lo stesso approccio per calcolare il tempo di produzione, ovvero costo del singolo tagliente, siccome una placchetta girandola possiamo usarla 4 volte allora quello è un costo per tagliente

3) Tasso di profitto

$$P_r = \frac{R - C_p}{t_p}$$

con:

- **R** -> ricavo
- **T_p** e **C_p** calcolati sopra

$$t_p = t_0 + \frac{V}{Q} \left(1 + \frac{t_{cu}}{T} \right)$$

$$C_p = C_0 + C_m \frac{V}{Q} \left[1 + \left(t_{cu} + \frac{C_{ut}}{C_m} \right) \frac{1}{T} \right]$$

Vincoli

Potenza massima $\frac{F_c \cdot v_c}{E} \leq K_1$

Deformazione massima pezzo $I_{pezzo}(F_c, \text{geometria, materiale}) \leq \varepsilon_p$

Deformazione massima utensile $I_{utensile}(F_t, \text{geometria, materiale}) \leq \varepsilon_{ut}$

Avanzamento e velocità $f_{\min} \leq f \leq f_{MAX}$
 $v_{c\min} \leq v_c \leq v_{cMAX}$

Rugosità $K \frac{f^2}{r} \leq R_a$

Spesso capita nel caso di ottimizzazione vincolata che il minimo si trova proprio sul vincolo e non sul vero minimo della funzione in quanto se non vogliamo che si formi il tagliente di riporto, o vogliamo una certa finitura superficiale, oppure c'è un limite di potenza della macchina ecc...

• Relazioni di vita utensile $v_c \cdot T^n = C$

• Relazioni per il calcolo delle forze $F_c = k_c A_D$

Ottimizzazione non vincolata ad un parametro

Vogliamo ottimizzare:

- Tempo di produzione
- Costo di produzione

Funzione obiettivo

$$t_p = t_0 + \frac{V}{Q} \left(1 + \frac{t_{cu}}{T} \right)$$

$$C_p = C_0 + C_m \frac{V}{Q} \left[1 + \left(t_{cu} + \frac{C_{ut}}{C_m} \right) \frac{1}{T} \right]$$

➔ $F = F_0 + \frac{\alpha}{Q} \left(1 + \frac{\varphi}{T} \right)$

	t_p	C_p
F_0	t_0	$C_0 + C_m t_0$
α	V	$C_m V$
φ	t_{cu}	$t_{cu} + \frac{C_{ut}}{C_m}$

Come parametro su cui ottimizzare si considera solo la velocità di taglio

$$F = F_0 + \frac{\alpha}{Q} \left(1 + \frac{\varphi}{T} \right)$$

$$T = T(v_c) \quad \Rightarrow \quad F = F_0 + \frac{\alpha'}{v_c} \left(1 + \frac{\varphi}{T(v_c)} \right); \quad \alpha' = \frac{\alpha}{A_D}$$

$$Q = A_D \cdot v_c$$

$$\frac{dF}{dv_c} = 0 \quad F = F_0 + \frac{\alpha'}{v_c} \left(1 + \frac{\varphi}{T(v_c)} \right); \quad \alpha' = \frac{\alpha}{A_D}$$

$$-\frac{\alpha'}{v_c^2} \left(1 + \frac{\varphi}{T} \right) - \frac{\alpha'}{v_c} \frac{\varphi}{T^2} \frac{dT}{dv_c} = 0$$

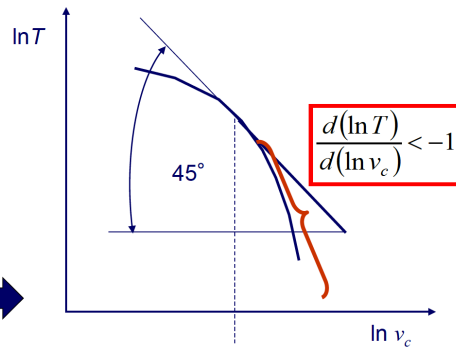
$$-\frac{\alpha'}{v_c^2} \left(1 + \frac{\varphi}{T} + \frac{\varphi \cdot v_c}{T^2} \frac{dT}{dv_c} \right) = 0$$

$$1 + \frac{\varphi}{T} + \frac{\varphi}{T} \left(\frac{v_c}{T} \frac{dT}{dv_c} \right) = 0$$

$$\frac{d(\ln T)}{d(\ln v_c)}$$

$$1 + \frac{\varphi}{T} \left(1 + \frac{d(\ln T)}{d(\ln v_c)} \right) = 0$$

Esiste un estremo se:



Condizione di esistenza del minimo

$$\frac{dF}{dv_c} = -\frac{\alpha'}{v_c^2} \left[1 + \frac{\varphi}{T} \left(1 + \frac{d \ln T}{d \ln v_c} \right) \right] \quad T = T(v_c)$$

$$\Rightarrow \frac{d^2 F}{dv_c^2} = -\frac{\alpha'}{v_c^2} \left[-\frac{\varphi}{T^2} \frac{dT}{dv_c} \left[1 + \frac{d \ln T}{d \ln v_c} \right] + \frac{\varphi}{T} \left(\frac{d^2 \ln T}{d \ln v_c^2} \frac{1}{v_c} \right) \right]$$

$$\frac{d \ln T}{d \ln v_c} = \frac{dT/T}{dv_c/v_c} = \frac{v_c}{T} \frac{dT}{dv_c}$$

$$\Rightarrow \frac{d^2 F}{dv_c^2} = -\frac{\alpha'}{v_c^2} \left[-\frac{\varphi}{v_c T} \frac{d \ln T}{d \ln v_c} \left[1 + \frac{d \ln T}{d \ln v_c} \right] + \frac{\varphi}{T} \frac{d^2 \ln T}{d \ln v_c^2} \frac{1}{v_c} \right]$$

$$\Rightarrow \frac{d^2 F}{dv_c^2} = \frac{\alpha'}{v_c^3} \frac{\varphi}{T} \frac{d \ln T}{d \ln v_c} \left[1 + \frac{d \ln T}{d \ln v_c} \right] - \frac{\alpha'}{v_c^3} \frac{\varphi}{T} \frac{d^2 \ln T}{d \ln v_c^2}$$

$$\frac{d^2 \ln T(v_c)}{d \ln v_c^2} < \delta$$

Condizione di esistenza del minimo

Relazione di Taylor $n \ln T = \ln C - \ln v_c$
 $T^n = \frac{C}{v_c}$ $\ln T = \frac{1}{n} \ln C - \frac{1}{n} \ln v_c$

$$\frac{d \ln T}{d \ln v_c} = -\frac{1}{n} \quad 1 + \frac{\phi}{T} \left(1 - \frac{1}{n}\right) = 0$$

$$T_{opt} = \phi \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \quad v_{c,opt} = \frac{C}{T_{opt}^n}$$

Materiale	C (m/min)	n	1/n
HSS	60	0.15	6.7
Carburo	300	0.30	3.3
Ceramico	1500	0.60	1.7

$$T_{opt} (Ceramico) = 0.12 T_{opt} (HSS)$$

Se phi è lo stesso

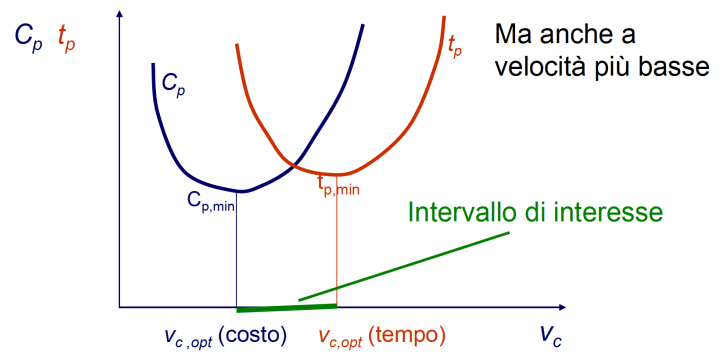
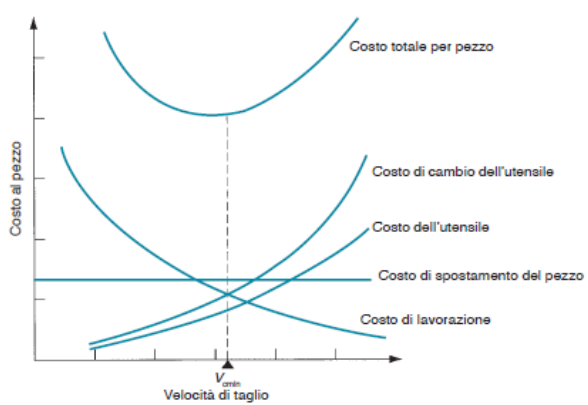
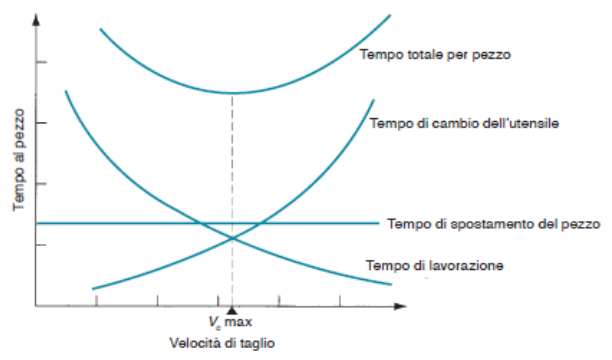
questa equazione ci da il tempo ottimale e la inseriamo dentro la formula della durata ottimale (sanvik dice 20 minuti)
 abbiamo trovato analiticamente l'ottima o del tempo di produzione o del costo di produzione

trovato phi lo sostituiamo nelle formule di prima e arriviamo a capire o il tempo o il costo ottimizzato.

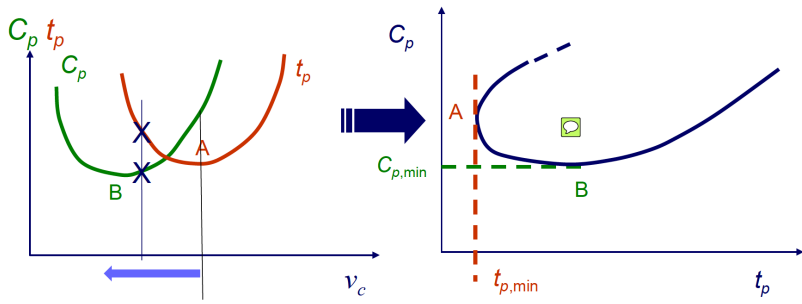
- La condizione di ottimo è strutturalmente equivalente sia per t_p che per C_p .
- Poiché $\phi_{tempo} = t_{cu} < \phi_{costo} = t_{cu} + C_{ut} / C_m$

$$T_{opt} (tempo) < T_{opt} (costo)$$

$$V_{c,opt} (tempo) > V_{c,opt} (costo)$$



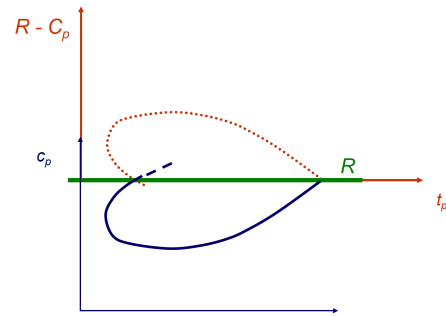
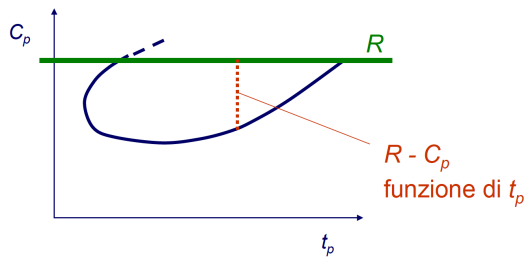
Tasso di profitto



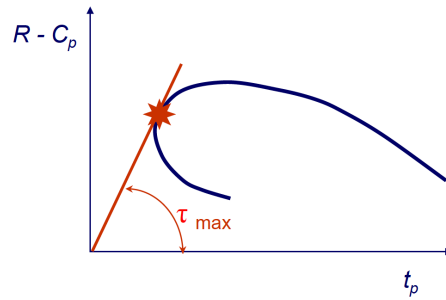
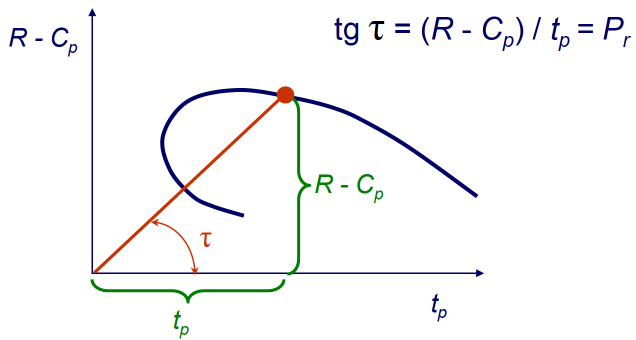
$$P_r = \frac{R - C_p}{t_p}$$

ciascun punto sul piano corrisponde alla velocità di taglio. A minimo di t_p e B minimo di C_p e quindi la funzione sarà tutta sopra B e più a destra di A

Ottimizzazione del profitto (ipotesi di ricavi costanti)



Per massimizzare P_r è necessario massimizzare $\text{tg } \tau$ e, quindi, τ .



La condizione di taglio che massimizza P_r è intermedia rispetto alle condizioni di taglio che minimizzano C_p e t_p .

