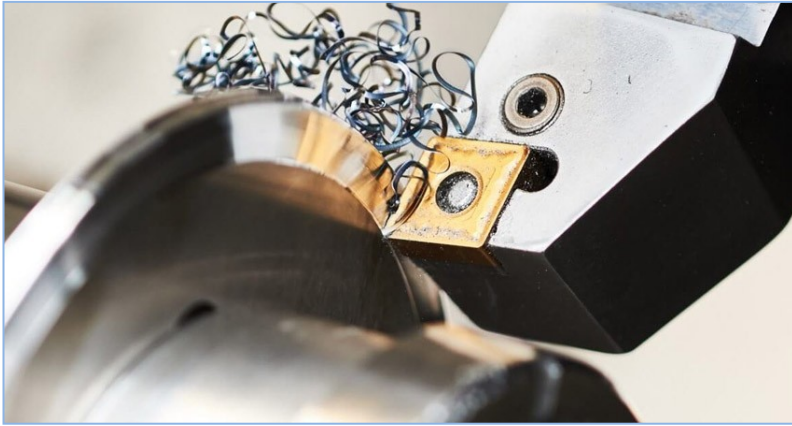
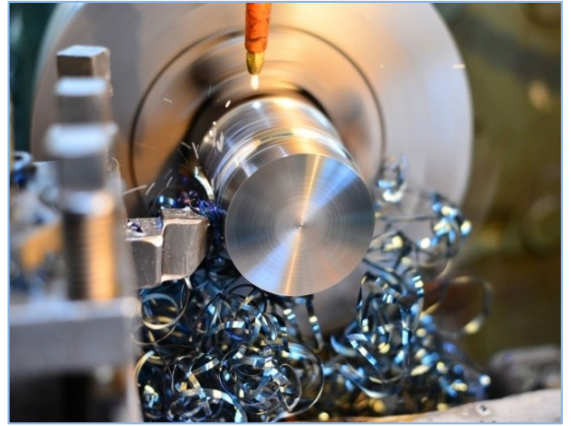
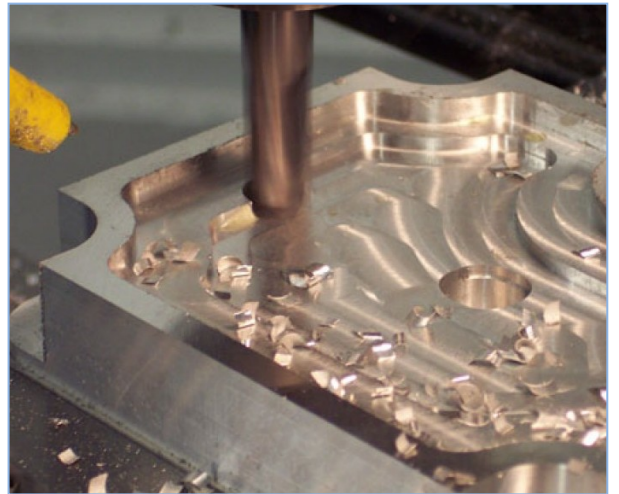


LAVORAZIONI PER ASPORTAZIONE DI TRUCIOLO



Tornitura

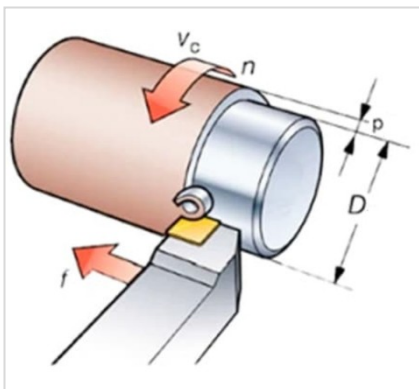
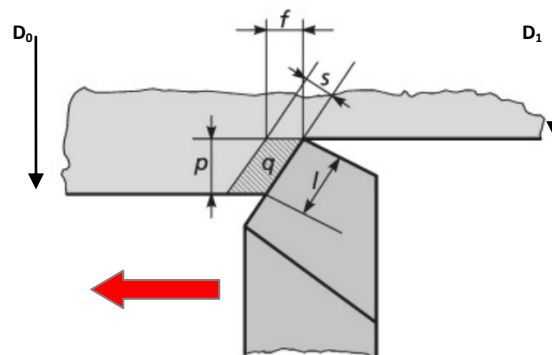
La tornitura è un processo industriale di lavorazione meccanica per asportazione di truciolo, utilizzato per creare componenti aventi forma di solidi di rivoluzione (come cilindri, coni e forme profilate).

Come funziona

- Moto rotatorio del pezzo:
Il materiale grezzo viene fissato a un mandrino e fatto ruotare ad alta velocità attorno al proprio asse.
- Moto dell'utensile:
Un utensile da taglio fisso si muove in modo rettilineo (longitudinale o trasversale) a contatto con il pezzo.
- Asportazione:
L'utensile incide il materiale in eccesso (sovrametallo), staccandolo sotto forma di truciolo e modellando la superficie desiderata.

I principali parametri della tornitura sono:

- V_c = velocità periferica di taglio [m/min];
- D = diametro dell'albero da tornire [mm];
- n = numero di giri dell'albero [giri/min]
- f = avanzamento (spostamento dell'utensile per ogni giro del pezzo) [mm/giro]
- $V_f = f \cdot n$ = velocità di avanzamento [mm/min] (distanza coperta dall'utensile in un minuto)
- p = profondità di passata [mm] → formula: $p = (D_0 - D_1)/2$
- q = sezione del truciolo [mm²] → formula: $q = s \cdot l = p \cdot f$

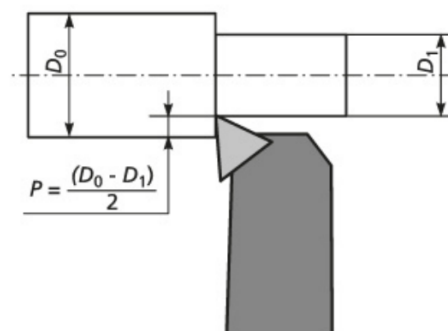


Esempio calcolo sezione truciolo "q":

Il pezzo da tornire ha diametro iniziale $D_0=40$ mm; dopo la lavorazione, il diametro deve essere $D_1=35$ mm. L'avanzamento scelto è $f=0,2$ mm/giro. Calcolare area truciolo.

$$p = (40-35)/2 = 2,5 \text{ mm}$$

$$q = 2,5 \cdot 0,2 = 0,5 \text{ mm}^2$$



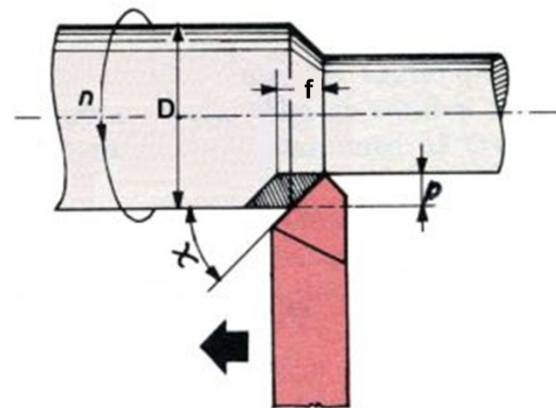
Relazioni fondamentali della tornitura

Velocità di taglio (m/min): $v_c = (\pi \cdot D \cdot n) / 1000$

Numero di giri (giri/min): $n = (1000 \cdot v_c) / (\pi \cdot D)$

Velocità avanzamento (mm/min): $v_f = f \cdot n$

Tempo di taglio (min): $T_c = L / (f \cdot n) = L / v_f$

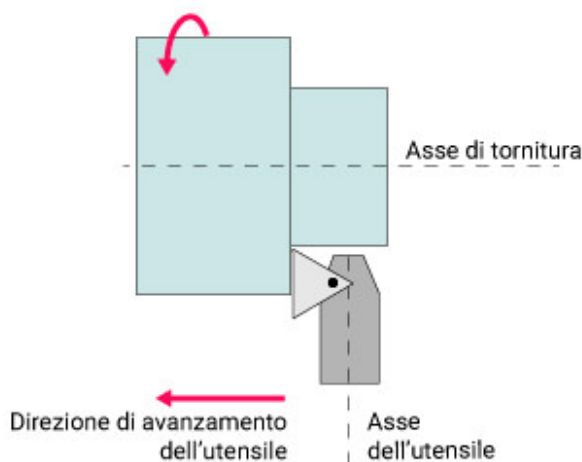


con

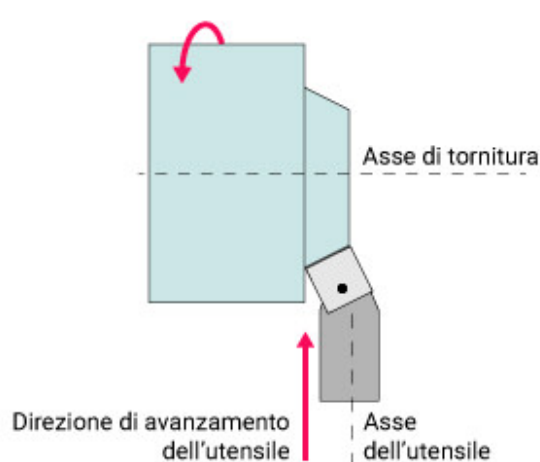
- f = avanzamento per giro [mm/giro]: spostamento dell'utensile durante un giro del pezzo
- p = profondità di passata [mm]: profondità radiale di materiale asportata in una singola passata
- v_c = velocità di taglio [m/min]: velocità periferica al diametro considerato
- v_f = velocità di avanzamento [mm/min]: $v_f = f \cdot n$
- n = numero di giri [giri/min]
- D è il diametro nominale del pezzo in mm
- L la lunghezza effettivamente percorsa dall'utensile in mm

Il moto o avanzamento dell'utensile, così come il suo asse, possono essere paralleli o perpendicolari rispetto all'asse di tornitura, questo permette di ottenere molteplici forme e finiture superficiali del pezzo in lavorazione. La posizione dei moti e degli assi identifica inoltre le tipologie di tornitura. Tra le più comuni troviamo:

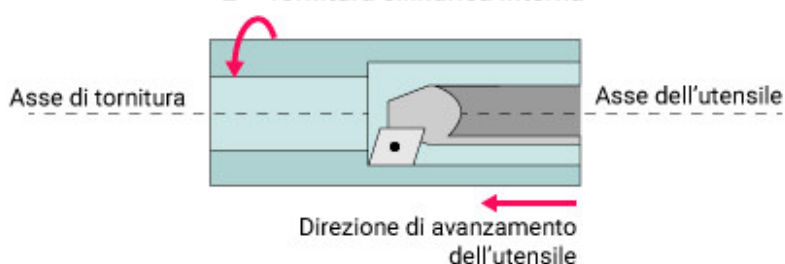
1- Tornitura cilindrica esterna



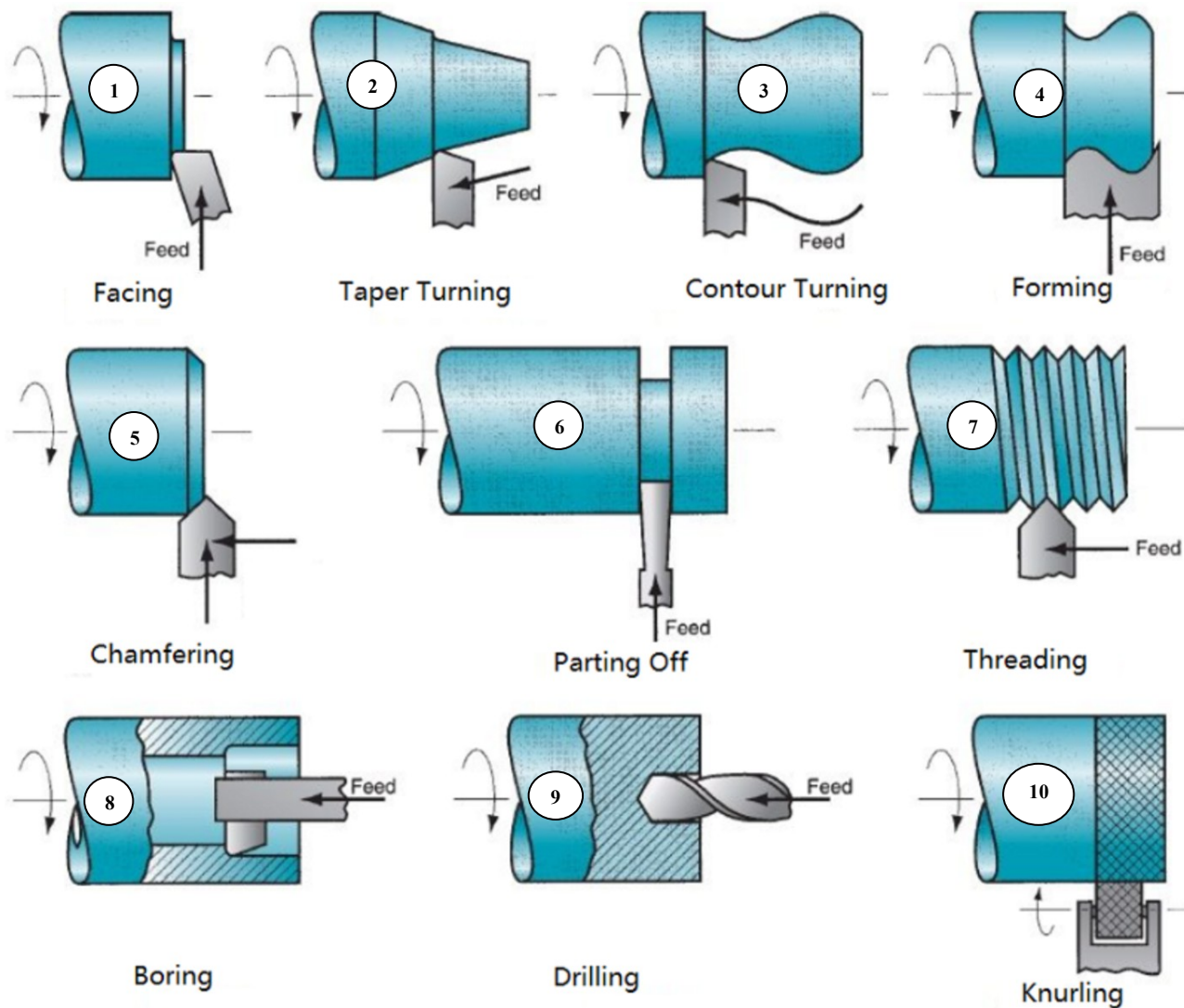
3- Tornitura esterna piana



2- Tornitura cilindrica interna



Tipologie lavorazioni di tornitura

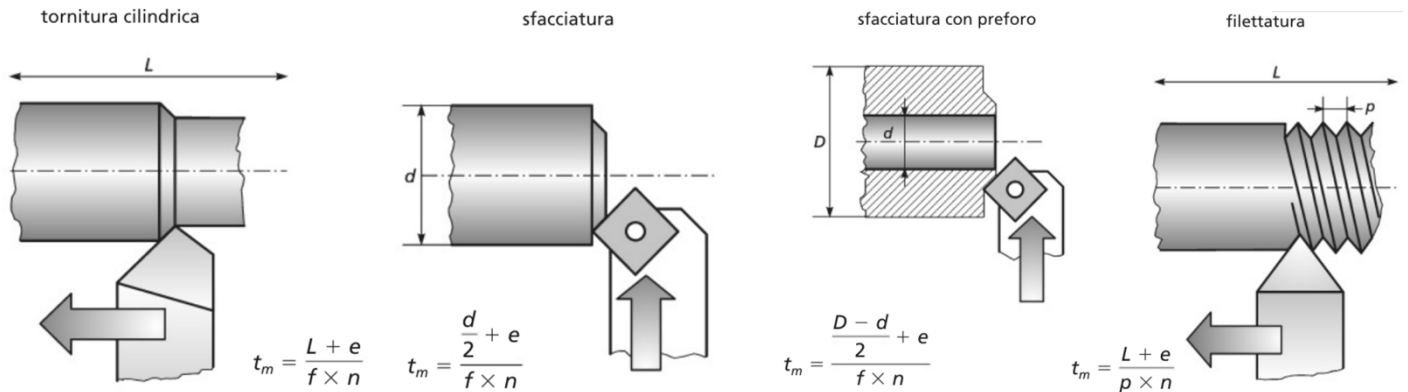


1. **Sfacciatura**: l'utensile avanza radialmente per creare una superficie piana
2. **Tornitura conica**: l'utensile avanza secondo la direzione angolata rispetto al pezzo creando una forma conica.
3. **Contornatura**: l'utensile segue un contorno sagomato
4. **Tornitura di forma** (formatura): l'utensile imparte la propria forma al pezzo mediante un moto radiale
5. **Smussatura**: si usa lo spigolo tagliente per eliminare l'angolo sul bordo
6. **Troncatura** (cut off): serve per tagliare un'estremità
7. **Filettatura** : serve a filettare una parte della superficie del pezzo
8. **Barenatura**: l'utensileria avanza linearmente sul diametro interno di un foro preesistente
9. **Foratura**: si fa avanzare una punta forare le pezze rotazione
10. **Godronatura**: usata per produrre zigrinatura sulla superficie del pezzo

Tempi di macchina in tornitura

I tempi per le varie operazioni di tornitura sono riportati in figura dove con e è stata indicata l'extracorsa ossia la distanza tra l'utensile e il pezzo da lavorare, necessaria:

- all'inizio della lavorazione, per evitare possibili urti;
- dopo la lavorazione, per consentire lo smontaggio del pezzo.



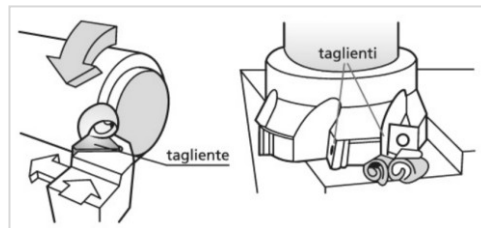
Velocità effettiva di taglio

Nelle macchine in cui il moto di taglio è rotatorio (tornio, fresatrice, trapano ecc.) la velocità di taglio dipende, oltre che dai parametri sopra riportati, anche dal diametro dell'elemento rotante (pezzo o utensile).

Scelta la velocità di taglio opportuna, il numero di giri che permette di realizzare tale velocità è dato dalla relazione:

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

- v_c = velocità di taglio [m/min];
- D = diametro dell'elemento rotante [mm];
- n = numero di giri [giri/min]



Se la macchina non ha un variatore continuo del numero di giri, si utilizza il numero di giri più prossimo a quello calcolato:

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

Potenza di taglio

La potenza di taglio per effettuare una tornitura è da

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60000} \quad [\text{kW}]$$

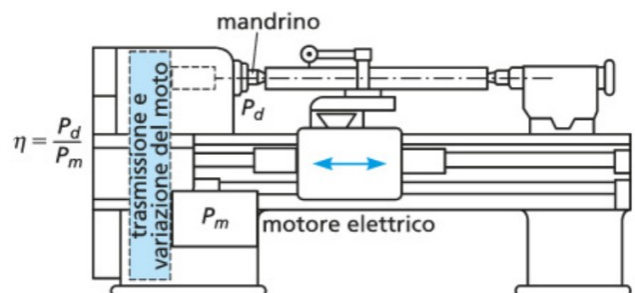
dove F_c = forza di taglio [N], v_c = velocità di taglio [m/min]

Poiché ogni macchina ha un rendimento η la potenza P_c effettivamente disponibile sul mandrino sarà data da:

$$P_{c \text{ eff}} = \eta P_m \quad [\text{kW}] \quad \text{dove } P_m \text{ è la potenza elettrica della macchina}$$

I classici torni datati presenti nelle scuola hanno una $P_m = 1,6 \text{ kW}$ con un rendimento tipico a 0.7-0.8!

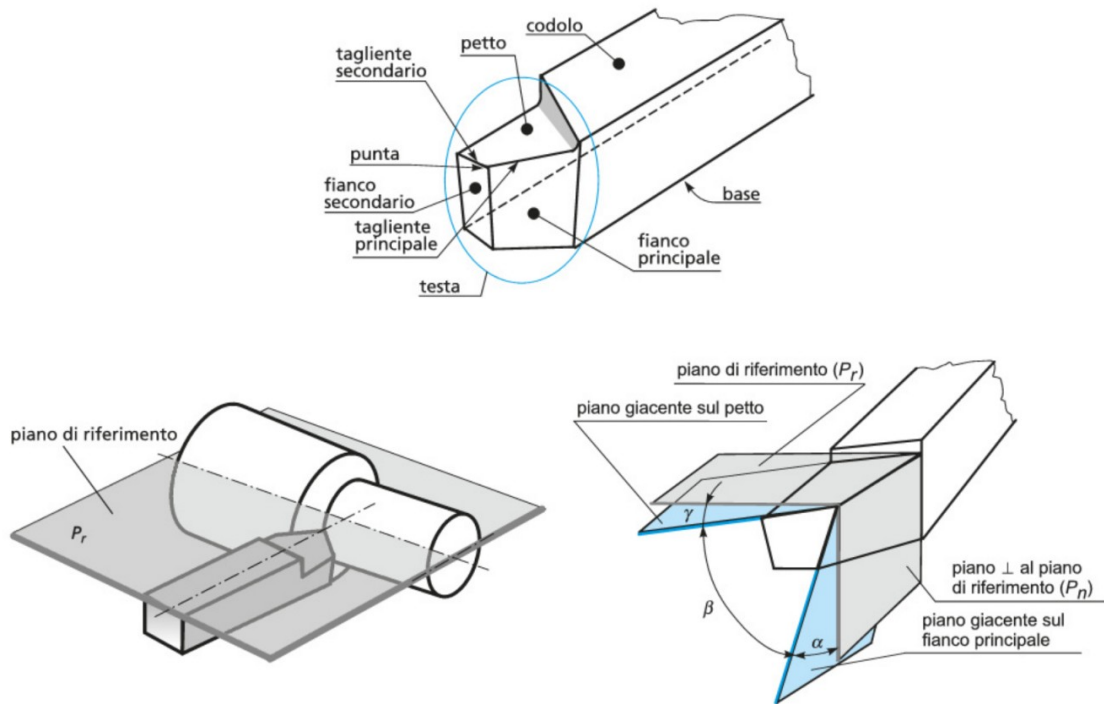
Affinchè la lavorazione sia possibile deve essere $P_c \leq P_{c \text{ eff}}$



Utensili in acciaio super rapido (HSS / HSS-Co al Cobalto)

Sono barrette di acciaio speciale (spesso arricchite con Cobalto al 5% o 8%) che vanno interamente sagomate e affilate alla mola dall'operatore per creare la geometria di taglio desiderata.

- **Vantaggi:** Massima personalizzazione della forma e costi d'acquisto contenuti per le barrette grezze. Ottimi per passate leggere su torni paralleli vecchi o poco rigidi.
- **Svantaggi:** Resistono molto meno al calore rispetto al metallo duro, richiedendo velocità di taglio decisamente più basse e l'uso costante di refrigerante durante la lavorazione dell'acciaio.



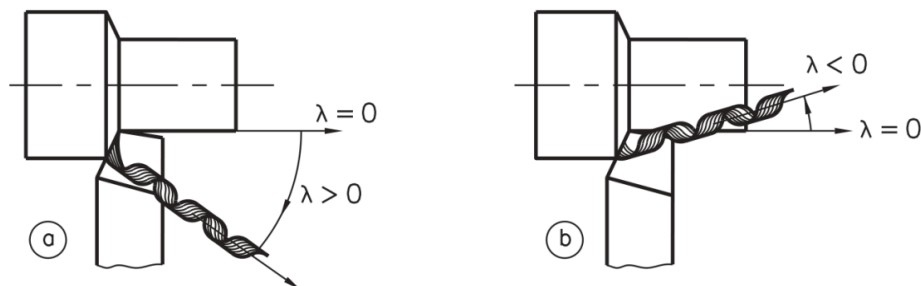
Angoli della sezione normale di un utensile

Per definire gli angoli caratteristici di un utensile è necessario considerare un piano che funga da riferimento. A questo scopo, consideriamo il piano passante per la punta dell'utensile e parallelo alla sua base.

Questo piano viene definito piano di riferimento:

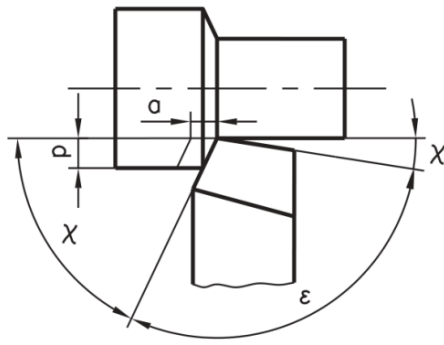
- α = Angolo di spoglia inferiore: è formato dall'intersezione del fianco principale con un piano perpendicolare al piano di riferimento (P_r) e contenente il tagliente principale;
- γ = Angolo di spoglia superiore: è formato dall'intersezione della faccia dell'utensile con il piano di riferimento. L'angolo di spoglia superiore è l'angolo del tagliente che influenza maggiormente la resistenza al taglio, la dispersione del truciolo, la temperatura di taglio e la durata dell'utensile. L'angolo γ può essere positivo, negativo o nullo
- β = Angolo di taglio: è formato dall'intersezione del petto con il fianco principale

$$\text{NB: } \alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$



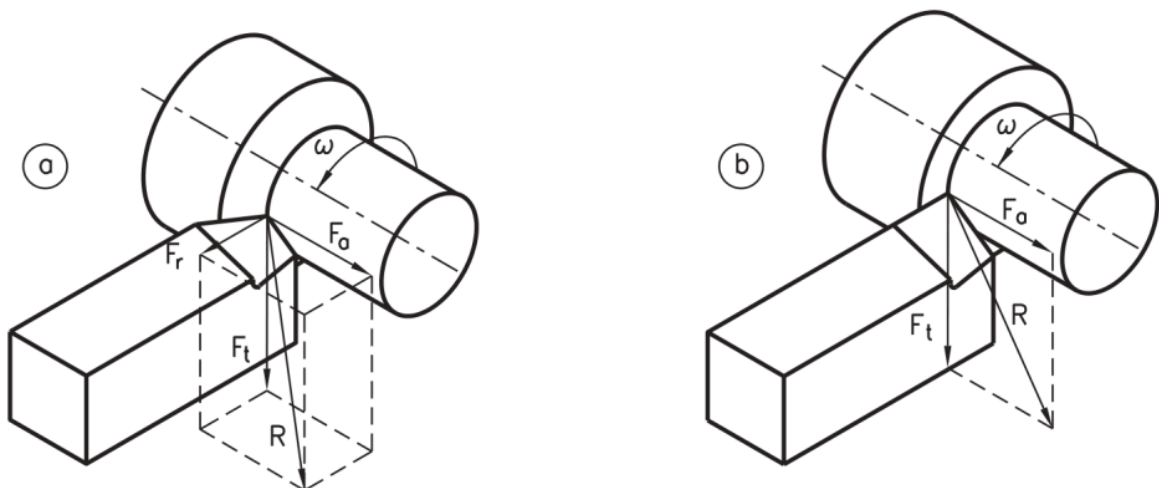
Deflusso del truciolo al variare di λ : a) per λ positivo; b) per λ negativo.

$$\chi + \varepsilon + \chi' = 180^\circ$$



- ε : angolo fra i taglienti.
È formato dalla proiezione dei taglienti principale e secondario sul piano di riferimento.
- χ : angolo di appostamento (o di attacco) del tagliente principale.
È formato dalle proiezioni del tagliente principale sul piano di riferimento e dalla generatrice della superficie lavorata. Questo angolo influenza le dimensioni del truciolo da asportare. A parità di profondità di passata p e di avanzamento a la diminuzione di χ comporta una lunghezza di contatto maggiore tra utensile e pezzo, cui corrisponde una minore sollecitazione meccanica e termica. Di contro, si ha la riduzione dello spessore del truciolo con conseguente aumento di energia assorbita e forza di repulsione
- χ' : angolo di appostamento (o di attacco) del tagliente secondario.
È formato dalle proiezioni, sul piano di riferimento, del tagliente secondario e dalla generatrice della superficie lavorata.

Si può osservare come variano le forze scambiate tra utensile e pezzo al variare dell'angolo di appostamento. Si evidenzia che per $\chi = 90^\circ$ e $\lambda = 0$ non si hanno spinte radiali che tendono ad allontanare l'utensile, ma solo spinte assiali e tangenziali relative alla forza di taglio (F_t) e di avanzamento (F_a).



Forze scambiate tra utensile e pezzo: a) angolo di appostamento $< 90^\circ$;
b) angolo di appostamento di 0° .

Carburi metallici sinterizzati (WIDIA)

Si tratta di un materiale ottenuto per sinterizzazione di carburi duri (85-95%) in una matrice di cobalto portato a fusione (il cobalto fa da legante dei carburi). Il primo brevettato fu il Widia.

Non richiede trattamento termico e ha contribuito a velocizzare enormemente le lavorazioni per asportazione.

La normativa ISO 513:1995 prevede un codice di identificazione alfanumerico, sia per gli inserti sia per gli utensili, attraverso il quale è possibile risalire a tutte le informazioni relative a forma, dimensioni, angoli di spoglia, sistema di fissaggio, direzione di taglio dell'utensile ecc.

I carburi metallici sono stati classificati, in base al materiale da lavorare, in gruppi contrassegnati dalle lettere P, M, K.

Ogni gruppo principale è stato inoltre suddiviso in gruppi di applicazione, contraddistinti da un numero distintivo.

Al crescere del numero distintivo, aumenta la tenacità del materiale e diminuisce la resistenza all'usura; di conseguenza, i numeri alti sono relativi a inserti che si prestano a lavorazioni pesanti, a elevati avanzamenti e a tagli interrotti (perché il materiale è dotato di buona tenacità) ma basse velocità di taglio (per la scarsa resistenza all'usura) e sono quindi idonei alla sgrossatura. Al contrario, i numeri distintivi bassi sono caratteristici di materiali destinati a lavorazioni leggere, con avanzamenti piccoli ma con velocità di taglio elevate, caratteristiche proprie della finitura.

Difetti

- Bassa resistenza agli urti (è necessario un supporto tenace)
- Bassa resistenza a flessione
- Bassa resistenza agli sbalzi termici (refrigerazione assente o abbondante)
- Bassa resistenza a fatica

NB: questi difetti sono stati ridotti negli "inserti di metalli duri rivestiti" mediante deposizione chimica sulle placchette o sugli inserti di una sottile pellicola di carburi (es. TiC=carburo di Titanio, TiN=nitrato di Titanio), in grado di conferire al materiale una notevole durezza superficiale, un basso coefficiente di attrito e una maggiore conducibilità termica.

Negli utensili a inserti intercambiabili (fissaggio meccanico) tutti gli angoli geometrici principali sono rigidamente definiti dal costruttore. Il produttore progetta l'inserto con angoli di spoglia superiori (per lo scarico del truciolo) e rompitruccioli integrati direttamente nel profilo sinterizzato.

Il corpo del gambo porta-utensile ha una sede inclinata con angoli ben precisi (angolo di registrazione e di inclinazione del tagliente).

L'orientamento e gli angoli di lavoro sono determinati matematicamente dalla combinazione tra inserto e stelo.



Classificazione

I carburi metallici sono stati classificati, in relazione al materiale da lavorare, in gruppi principali, contrassegnati dalle lettere P, M, K (ISO 513:1995).

I produttori di inserti hanno messo a punto altri tre gruppi di placchette, contraddistinti dalle lettere N (colore di riferimento verde per la lavorazione su leghe di alluminio), S (colore di riferimento arancio per la lavorazione di leghe resistenti al calore) e H (colore di riferimento azzurro per la lavorazione dell'acciaio temprato).

Gruppo principale d'asportazione di truciolo e relativa colorazione	GRUPPO DI APPLICAZIONE		
	Simbolo ISO	Materiali da lavorare	Procedimenti e condizioni di lavoro
P blu	P 01	Acciaio, acciaio in getti	Tornitura, alesatura di finitura e lavorazioni senza vibrazioni. Elevata V_c , piccola sezione del truciolo, tolleranze ristrette, elevata qualità delle superfici
	P 10		Tornitura, tornitura a copiare, taglio di filettature, fresatura. Elevata V_c , piccola o media sezione del truciolo
	P 20	Acciaio, acciaio in getti, ghisa malleabile a truciolo lungo	Tornitura, tornitura a copiare e fresatura. Media V_c , media sezione del truciolo. Piallatura con piccola sezione del truciolo
	P 30		Tornitura, fresatura e piallatura, anche in condizioni sfavorevoli. Media e piccola V_c , grande e piccola sezione del truciolo
	P 40	Acciaio, acciaio in getti con inclusioni di sabbia e soffiature	Tornitura, piallatura, stozzatura e lavorazione su macchine automatiche. Bassa V_c , grande sezione di truciolo, possibilità di angolo di spoglia superiore ampio, condizioni di lavoro sfavorevoli
	P 50	Acciaio, acciaio in getti di media e bassa resistenza meccanica con inclusioni di sabbia e soffiature	Tornitura, piallatura e lavorazione in cui è richiesta buona tenacità. Bassa V_c , grande sezione di truciolo, possibilità di angolo di spoglia superiore ampio, condizioni di lavoro sfavorevoli

NB: esistono anche valori intermedi (P15, P25 ecc.) per offrire una soluzione più precisa quando una lavorazione si trova a metà strada tra due categorie principali.

ACCIAIO			P blu
Condizioni favorevoli Taglio continuo, elevate V_c , semilavorati con leggera crosta di ossidazione	Condizioni intermedie Operazioni in generale	Condizioni sfavorevoli Taglio interrotto, semilavorati con forti scaglie di ossidazione	
P15	P25	P35	

Parametri di taglio

La scelta dei parametri di taglio si fa tramite opportune tabelle fornite dai costruttori:

P

ACCIAIO DEBOLMENTE LEGATO HB 180

SGROSSATURA

	R_u [mm]	p [mm]	f [mm/giro]	P15	P25	P35
				V_c [m/min]		
Sgrossatura media	1,6	0,5 ÷ 5	0,5	320	275	160
	1,2		0,4	355	305	175
	0,8		0,35	375	325	185
Sgrossatura pesante	1,6	0,7 ÷ 7	0,55	305	265	155
	1,2		0,50	320	275	160
	0,8		0,40	355	305	175

FINITURA

	R_u [mm]	p [mm]	f [mm/giro]	P15	P25
				V_c [m/min]	
Finitura	1,2	0,3 ÷ 0,5	0,25	425	365
	0,8		0,20	455	395
	0,4		0,15	490	425

Se si vuole un tempo di vita utensile diverso dai 15 minuti, si può utilizzare la tabella seguente, ricavata dalla legge di Taylor, che fornisce un fattore di correzione moltiplicativo della velocità di taglio in funzione della durata del tagliente.

DURATA DEL TAGLIENTE

Durata del tagliente (min)	10	15	20	25	30	45	60
Fattore di correzione	1,1	1,0	0,93	0,88	0,84	0,75	0,70

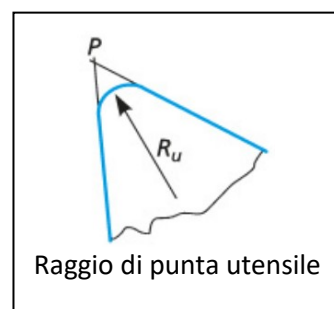
Se il valore della durezza differisce dal valore indicato, si deve moltiplicare la velocità di taglio consigliata per il fattore indicato in tabella.

←

VARIAZIONE DI DUREZZA

→

Durezza ridotta				Durezza aumentata				
-60	-40	-20	0	+20	+40	+60	+80	+100
1,44	1,25	1,11	1,0	0,91	0,84	0,77	0,72	0,67

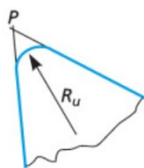


Esempio:

Si deve effettuare una sgrossatura media su pezzo in acciaio debolmente legato avente durezza HB 180 avendo a disposizione un inserto P25 con $R_u = 0,8$ mm.

La tabella ci dice dobbiamo prendere:

- $V_c = 325$ m/min
- $f = 0,35$ mm/giro
- $p = 0,5-5$ mm
- $T =$ durata del tagliente è pari a 15 min



**ACCIAIO INOX AUSTENITICO HB 180****SGROSSATURA**

	R_u [mm]	p [mm]	f [mm/giro]	M15	M25	M35
				V_c [m/min]		
Sgrossatura media	1,6	0,5 ÷ 5,7	0,37	215	170	155
	1,2		0,30	230	190	165
	0,8		0,25	240	200	175
Sgrossatura pesante	1,6	2 ÷ 7,6	0,40	205	165	150
	1,2		0,35	215	175	160
	0,8		0,30	230	190	165

FINITURA

	R_u [mm]	p [mm]	f [mm/giro]	M15	M25
				V_c [m/min]	
Finitura	0,8	0,1 ÷ 1,5	0,20	235	255
	0,4		0,10	310	280

Se si vuole un tempo di vita dell'utensile diverso dai 15 minuti, si può utilizzare la tabella seguente, ricavata dalla legge di Taylor, che fornisce un fattore di correzione moltiplicativo della velocità di taglio in funzione della durata del tagliente.

DURATA DEL TAGLIENTE

Durata del tagliente (min)	10	15	20	25	30	45	60
Fattore di correzione	1,1	1,0	0,93	0,88	0,84	0,75	0,70

Se il valore della durezza differisce dal valore indicato, si deve moltiplicare la velocità di taglio consigliata per il fattore indicato in tabella.

← **VARIAZIONE DI DUREZZA** →

Durezza ridotta				Durezza aumentata				
-60	-40	-20	0	+20	+40	+60	+80	+100
1,42	1,24	1,11	1,0	0,91	0,84	0,78	0,73	0,68

**LEGHE LEGGERE****SGROSSATURA E FINITURA**

	R_u [mm]	p [mm]	f [mm/giro]	K10	K15	K25
				V_c [m/min]		
Sgrossatura media	0,8	0,1 ÷ 5,0	0,3	2000	2000	2000
	0,4		0,20	2000	2000	2000
	0,2		0,12	2000	2000	2000

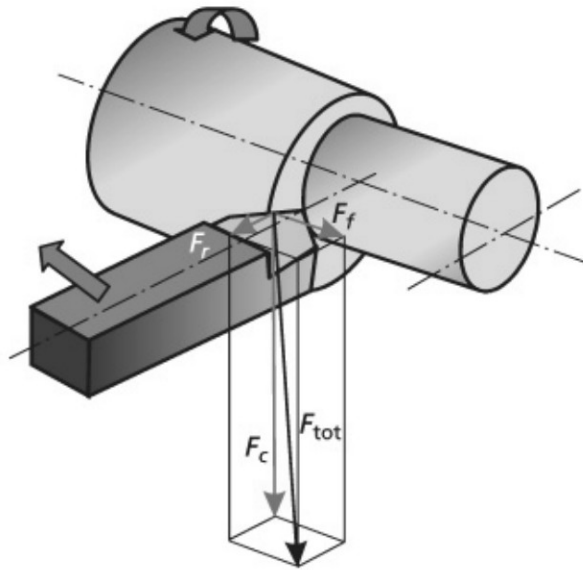
Se si vuole un tempo di vita utensile diverso dai 15 minuti, si può utilizzare la tabella seguente, ricavata dalla legge di Taylor, che fornisce un fattore di correzione moltiplicativo della velocità di taglio in funzione della durata del tagliente.

DURATA DEL TAGLIENTE

Durata del tagliente (min)	10	15	20	25	30	45	60
Fattore di correzione	1,1	1,0	0,93	0,88	0,84	0,75	0,70

Forze di tornitura

La forza di taglio ha 3 componenti secondo (tre direzioni ortogonali tra loro), scelte in modo da coincidere con le direzioni caratteristiche: moto di taglio (F_c), asse dell'utensile (F_r) e moto di avanzamento (F_f).



Abbiamo

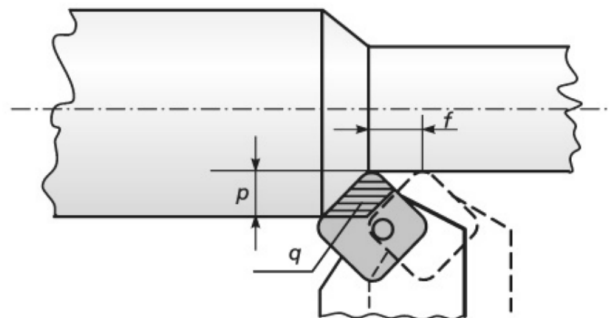
- **F_c :** diretta secondo la direzione della velocità periferica, è la **forza principale di taglio**; è quella forza che assorbe la potenza disponibile al mandrino della macchina. Serve principalmente per la determinazione della potenza di taglio P_c .
- **F_f :** diretta secondo la direzione del moto di avanzamento, è la **resistenza all'avanzamento**, quella forza cioè che si oppone al moto del carrello, assorbendo la potenza in uscita dal cambio degli avanzamenti. In prima approssimazione $F_a = 20-30\% F_c$. Essa influenza l'inflessione utensile, contribuendo molto poco alla potenza erogata.
- **F_r :** diretta secondo l'asse dell'utensile, è la **forza di repulsione**, ovvero la forza che tende ad allontanare l'utensile dal pezzo. In prima approssimazione $F_r = 15-25\% F_c$. Questa forza non assorbe potenza durante le operazioni di cilindatura, in quanto non c'è spostamento lungo questa direzione, mentre coincide con F_f nelle operazioni con moto radiale dell'utensile (troncatura, sfacciatura e così via). La forza di repulsione determina principalmente l'inflessione del pezzo e, quindi, le tolleranze di lavorazione.

Calcolo della forza di taglio

La forza di taglio si calcola con la seguente formula:

$$F_c = K_s \cdot q \quad [\text{N}]$$

- q = sezione del truciolo = $p \cdot f$ [mm^2]
- K_s = pressione di taglio [N/mm^2] dipendente dalla qualità del materiale in lavorazione, dalla geometria dell'utensile e dalla sezione del truciolo



Valori tipici di K_s per diversi materiali

Tabella K_s (N/mm²) (Angolo di spoglia = 6 gradi)

Materiale	Profondità ap (mm)	f = 0.1	f = 0.2	f = 0.3	f = 0.4	f = 0.5
Acciai dolci / automatici (es. 11SMn30, Fe360)	Piccola (0.5 - 1.5)	1910	1650	1500	1390	1320
	Media (1.5 - 3.0)	1810	1570	1420	1330	1250
	Grande (> 3.0)	1720	1490	1360	1260	1190
Acciai al carbonio (es. C40, C45 - ~180 HB)	Piccola (0.5 - 1.5)	2160	1820	1620	1490	1380
	Media (1.5 - 3.0)	2050	1760	1550	1390	1310
	Grande (> 3.0)	1940	1690	1490	1340	1270
Acciai legati da bonifica (es. 39NiCrMo4, 42CrMo4)	Piccola (0.5 - 1.5)	2890	2430	2220	2060	1910
	Media (1.5 - 3.0)	2730	2320	2120	1990	1830
	Grande (> 3.0)	2630	2220	2030	1900	1750
Acciai inossidabili austenitici (es. AISI 304, AISI 316)	Piccola (0.5 - 1.5)	2600	2190	1980	1840	1730
	Media (1.5 - 3.0)	2470	2090	1900	1760	1660
	Grande (> 3.0)	2340	1990	1810	1680	1580
Acciai inossidabili martensitici (es. AISI 420)	Piccola (0.5 - 1.5)	3120	2620	2370	2200	2070
	Media (1.5 - 3.0)	2960	2500	2270	2100	1980
	Grande (> 3.0)	2810	2380	2160	2000	1890
Ghisa grigia perlitica (es. G25 / GG25)	Piccola (0.5 - 1.5)	1420	1150	1060	990	910
	Media (1.5 - 3.0)	1300	1070	990	930	860
	Grande (> 3.0)	1250	1020	940	880	820
Ghisa sferoidale (es. GS500 / GGG50)	Piccola (0.5 - 1.5)	1790	1480	1340	1250	1180
	Media (1.5 - 3.0)	1660	1390	1270	1180	1110
	Grande (> 3.0)	1570	1320	1200	1120	1060
Alluminio puro e leghe tenere (es. Serie 1000/6000)	Piccola (0.5 - 1.5)	710	590	530	490	460
	Media (1.5 - 3.0)	670	560	500	460	430
	Grande (> 3.0)	640	530	480	440	410
Leghe d'alluminio da lavorazione (es. Avional, Ergal)	Piccola (0.5 - 1.5)	830	700	630	590	530
	Media (1.5 - 3.0)	790	650	600	560	510
	Grande (> 3.0)	740	620	570	520	480
Ottone da taglio libero (es. OT58)	Piccola (0.5 - 1.5)	820	710	650	610	580
	Media (1.5 - 3.0)	790	680	620	580	550
	Grande (> 3.0)	750	650	590	550	520

L'angolo di spoglia superiore γ influisce in modo significativo sulla forza specifica di taglio K_s.

L'angolo γ definisce l'inclinazione della faccia dell'inserto su cui scorre il truciolo: il suo valore incide direttamente sul grado di deformazione plastica del metallo e sull'attrito.

Insieme all'avanzamento, è uno dei fattori geometrici che modifica maggiormente la pressione specifica sul tagliente.

Per angoli diversi da 6° si deve prima calcolare un fattore correttivo K_γ per calcolare il K_s effettivo:

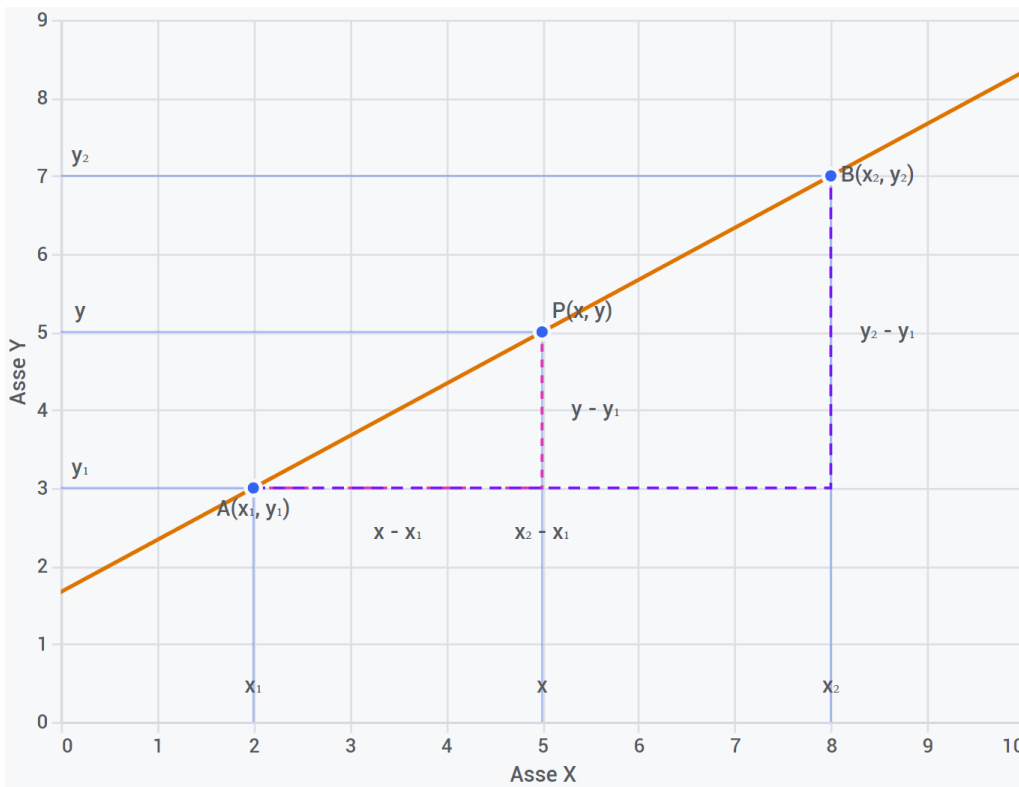
$$K_{\gamma} = 1 - (\gamma - 6) / 66.7$$

$$K_{s_effettivo} = K_{s_tabella} * K_{\gamma}$$

$$F_c = K_{s_effettivo} \cdot q \quad [N]$$

Interpolazione Lineare e Triangoli Simili

Quando si utilizzano delle tabelle capita spesso che il valore cercato sia compreso fra un limite inferiore e uno superiore. In questo caso è necessario quindi effettuare una interpolazione lineare per ricavare il valore cercato.



Impostando la proporzione tra i lati dei due triangoli (Altezza : Base):

$$\frac{y - y_1}{x - x_1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Si ricava la formula classica dell'interpolazione lineare:

$$y = y_1 + (x - x_1) \cdot \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad \text{dove} \quad \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

rappresenta la pendenza (coefficiente angolare) della retta, ovvero l'altezza del triangolo grande diviso la sua base.

Legge di Kronenberg

Nella teoria di Kronenberg per lo studio dell'asportazione di truciolo, la pressione specifica di taglio (forza specifica) non viene calcolata riferendosi a uno spessore unitario generico, ma viene riferita sperimentalmente a uno spessore di truciolo di riferimento concordato pari a $a = 0.25 \text{ mm}$ (e una larghezza $b_0 = 1 \text{ mm}$).

Il valore standard della pressione di taglio a queste condizioni prende il nome di K_{s0} (o pressione specifica di riferimento). I valori stabili in questa condizione prendono il nome di K_{s0} (pressione specifica di riferimento) e l'esponente di riduzione viene indicato con ε .

L'angolo di spoglia standard per questa tabella di riferimento è pari a $\gamma = 6^\circ$ per gli acciai e 2° per le ghise.

Tabella parametri di Kronenberg standard (Angolo di spoglia = 6°)

Gruppo Materiale	Stato / Caratteristiche	K_{s0} (N/mm ²)	Esponente (ε)	Campo di applicazione tipico
Acciai dolci / automatici (es. 11SMn30, Fe360)	Ricotto (< 150 HB)	1850	0.18	Carpenteria leggera, carichi minimi
Acciai al carbonio (es. C40, C45)	Normalizzato (~180 HB)	2200	0.20	Alberame, organi meccanici base
Acciai legati da bonifica (es. 39NiCrMo4, 42CrMo4)	Bonificato (~300 HB)	2600	0.22	Ingranaggi, alta resistenza
Acciai inossidabili austenitici (es. AISI 304, AISI 316)	Solubilizzato (~180 HB)	2450	0.21	Settore chimico, alta tenacità
Acciai inossidabili martensitici (es. AISI 420)	Temprato (~350 HB)	2800	0.23	Palette per turbine, alta durezza
Ghisa grigia perlitica (es. G25 / GG25)	Fusione (~200 HB, $\gamma = 2^\circ$)	1250	0.16	Basamenti per macchine, truciolo corto
Ghisa sferoidale (es. GS500 / GGG50)	Ferritico-Perlitica (~230 HB)	1600	0.18	Scatole cambio, alberi a gomiti
Alluminio e leghe tenere (es. Serie 1000/6000)	Ricotto / Estruso	680	0.14	Minimo sforzo di taglio
Leghe d'alluminio strutturali (es. Avional, Ergal)	Invecchiato artificialmente	880	0.20	Lavorazioni aeronautiche veloci
Ottone da taglio libero (es. OT58)	Crudo	780	0.10	Minuterie metalliche ad alta velocità

Come applicare i dati nella formula di Kronenberg

Per calcolare la forza specifica reale K_s (N/mm²) con la formulazione di Kronenberg in base al tuo avanzamento reale f (che a 90 gradi corrisponde allo spessore del truciolo h):

$$K_s = K_{s0} * (0.25 / h)^\varepsilon \quad [\text{N/mm}^2] \quad \text{dove la costante } 0.25 \text{ è } h_0$$

La forza di taglio si calcola quindi con la: $F_c = K_s \cdot q \quad [\text{N}]$

Regola per la spoglia reale (γ) diversa da 6 gradi:

Se l'utensile reale ha un angolo differente dai 6 gradi di riferimento, il valore di K_s finale ottenuto qui sopra va corretto moltiplicandolo per il coefficiente geometrico dato dalla:

$$K_\gamma = 1 - (\gamma - 6) / 66.7 \rightarrow K_{s \text{ reale}} = K_s * K_\gamma$$

Esercizio

Si deve sgrossare una barra di acciaio C40 ($R_m = 620 \text{ N/mm}^2$) diametro $D=30\text{mm}$ con un utensile HSS con angolo di spoglia $= 5^\circ$. Si prevede una profondità di passata $p= 2,5 \text{ mm}$ e un avanzamento $f = 0,16 \text{ mm/giro}$.

Per gli acciai a media resistenza come il C40, il valore di riferimento tipico di Kronenberg è $K_{s0} = 2200 \text{ N/mm}^2$.

L'esponente sperimentale di Kronenberg per l'acciaio al carbonio vale: $\varepsilon = 0.20$

La formula fondamentale di Kronenberg per calcolare la forza specifica reale K_s in funzione dello spessore reale h (che nel nostro caso coincide con l'avanzamento $f = 0.16$ è:

$$K_s = 2200 * (0.25 / h)^{0.2}$$

CASO 1: Angolo di spoglia reale pari a +6 gradi (Geometria Standard)

I dati base di [Kronenberg](#) per l'acciaio C40 sono:

- $K_{s0} = 2200 \text{ N/mm}^2$
- $h_0 = 0.25 \text{ mm}$
- $\varepsilon = 0.20$

1. Calcolo della forza specifica di taglio (K_s):

Sostituiamo lo spessore del truciolo reale $h = f = 0.16 \text{ mm}$:

$$K_s = 2200 * 1.0933 = 2405.3 \text{ N/mm}^2$$

2. Calcolo della sezione del truciolo (A):

La sezione rimane quella geometrica impostata nei dati:

$$A = p * f = 2.5 \text{ mm} * 0.16 \text{ mm} = 0.4 \text{ mm}^2$$

3. Calcolo della forza di taglio principale (F_t):

$$F_c = K_s * A = 2405.3 \text{ N/mm}^2 * 0.4 \text{ mm}^2 = 962.1 \text{ N}$$

CASO 2: Angolo di spoglia reale pari a -6 gradi (Geometria Negativa)

La teoria di Kronenberg corregge l'angolo di spoglia modificando direttamente la forza specifica standard in base allo scostamento geometrico rispetto ai 6 gradi base. Il coefficiente di correzione angolare di Kronenberg per l'acciaio è identico a quello impiegato nei modelli empirici standard:

$$K_\gamma = 1 - (\gamma - 6) / 66.7$$

1. Calcolo del fattore di correzione (K_γ):

Sostituiamo $\gamma = -6$ gradi:

$$K_\gamma = 1 - (-6 - 6) / 66.7 = 1 - (-12) / 66.7 = 1 + 0.18 = 1.18$$

La geometria negativa a -6 gradi aumenta le forze resistenti del 18%.

2. Calcolo della nuova forza specifica di taglio (K_s reale):

Moltiplichiamo il valore di K_s precedentemente trovato per il fattore correttivo:

$$K_{s \text{ reale}} = K_s * K_\gamma$$

$$K_{s \text{ reale}} = 2405.3 \text{ N/mm}^2 * 1.18 = 2838.3 \text{ N/mm}^2$$

3. Calcolo della forza di taglio principale (F_t):

Mantenendo la medesima sezione del truciolo $A = 0.4 \text{ mm}^2$:

$$F_c = K_{s \text{ reale}} * A = 2838.3 \text{ N/mm}^2 * 0.4 \text{ mm}^2 = 1135.3 \text{ N}$$

Legge di Kienzle

La legge di Kienzle (sviluppata dal professore tedesco Otto Kienzle negli anni '50), è il modello matematico standard utilizzato in meccanica per descrivere come varia la resistenza al taglio del metallo durante l'asportazione di truciolo.

Nella lavorazione dei metalli si nota un fenomeno particolare: più il truciolo è sottile, più il materiale oppone resistenza a parità di area asportata. Se dimezziamo l'avanzamento f , lo sforzo specifico richiesto per tagliare il metallo non rimane costante, ma aumenta. Questo accade a causa degli attriti microscopici e della deformazione plastica del materiale vicino al tagliente dell'utensile.

Kienzle capì che questa variazione non è lineare, ma segue un andamento potenziale (esponenziale).

Formulò quindi la relazione empirica legando la resistenza specifica K_s allo spessore del truciolo (che nel tornio o nella fresa è direttamente proporzionale all'avanzamento per giro f) tramite un coefficiente z che dipende dal materiale lavorato:

$$K_s = \frac{K_{s1.1}}{f^z} \quad \text{con } K_{s1.1} \text{ resistenza specifica nominale ad avanzamento unitario}$$

Tabella parametri di Kienzle standard (Angolo di spoglia = 6°)

Gruppo Materiale	Stato / Durezza tipica	kc1.1 (N/mm ²)	Esponente (z)	Note d'officina
Acciai dolci / automatici (es. 11SMn30, Fe360)	Ricotto (< 150 HB)	1500	0.21	Bassa resistenza, truciolo lungo
Acciai al carbonio (es. C40, C45)	Normalizzato (~180 HB)	1700	0.24	Materiale standard da costruzione
Acciai legati da bonifica (es. 39NiCrMo4, 42CrMo4)	Bonificato (~300 HB)	2200	0.26	Elevata resistenza meccanica
Acciai inossidabili austenitici (es. AISI 304, AISI 316)	Solubilizzato (~180 HB)	2000	0.25	Forte incrudimento e tenacità
Acciai inossidabili martensitici (es. AISI 420)	Temprato (~350 HB)	2400	0.28	Elevata durezza superficiale
Ghisa grigia perlitica (es. G25 / GG25)	Fusione (~200 HB)	1100	0.18	Truciolo corto e frammentato
Ghisa sferoidale (es. GS500 / GGG50)	Ferritico-Perlitica (~230 HB)	1400	0.20	Maggior tenacità rispetto alla grigia
Alluminio puro e leghe tenere (es. Alluminio serie 1000/6000)	Ricotto / Estruso	550	0.15	Basso sforzo, rischio incollamento
Leghe d'alluminio da lavorazione (es. Avional, Ergal)	Invecchiato artificialmente	750	0.25	Ottima lavorabilità alle alte velocità
Ottone da taglio libero (es. OT58)	Crudo	650	0.12	Truciolo cortissimo, sforzi minimi

Come applicare la correzione se l'angolo di spoglia reale è diverso da 6°:

Se l'utensile reale ha un angolo di spoglia (γ) diverso da 6 gradi, il valore di K_s ottenuto deve essere moltiplicato per il fattore di correzione geometrico K_γ , calcolato secondo le specifiche dei manuali come:

$$K_\gamma = 1 - (\gamma - 6) / 66.7$$

Esempio con angolo = 0 gradi: $K_\gamma = 1 - (0 - 6) / 66.7 = 1 - (-0.09) = 1.09$ (la forza aumenta del 9%).

Esempio con angolo = 5 gradi: $K_\gamma = 1 - (5 - 6) / 66.7 = 1 - (-0.015) = 1.015$ (la forza aumenta dell'1.5%).

Esempio con angolo = 12 gradi: $K_\gamma = 1 - (12 - 6) / 66.7 = 1 - (0.09) = 0.91$ (la forza diminuisce del 9%).

Esercizio

Si deve sgrossare una barra di acciaio C40 ($R_m = 620 \text{ N/mm}^2$) diametro $D=30\text{mm}$ con un utensile HSS con angolo di spoglia $= 5^\circ$. Si prevede una profondità di passata $p = 2,5 \text{ mm}$ e un avanzamento $f = 0,16 \text{ mm/giro}$.

Per l'Acciaio C40 (Acciai al carbonio), la tabella standard di Kienzle fornisce i seguenti coefficienti sperimentali:

- $k_{c1.1}$ (forza specifica per truciolo di sezione $1 \times 1 \text{ mm}$) = 1700 N/mm^2
- Esponente $z = 0.24$

I parametri operativi stabiliti sono:

Profondità di passata (p) = 2.5 mm

Avanzamento (f) = 0.16 mm/giro (spessore del truciolo $h = f = 0.16 \text{ mm}$)

CASO 1: Angolo di spoglia reale pari a +6 gradi (Geometria Standard)

Dato che l'angolo dell'utensile coincide esattamente con l'angolo di riferimento dei parametri tabellari (6 gradi), non è necessaria alcuna correzione geometrica (il fattore di correzione K_γ è pari a 1).

1. Calcolo della forza specifica di taglio (K_s):

Applichiamo la formula di Kienzle: $K_s = k_{c1.1} / f^z$

$$K_s = 1700 / 0.6433 = 2642.6 \text{ N/mm}^2$$

2. Calcolo della sezione del truciolo (A):

$$A = p * f = 2.5 \text{ mm} * 0.16 \text{ mm} = 0.4 \text{ mm}^2$$

3. Calcolo della forza di taglio principale (F_t):

$$F_t = K_s * A = 2642.6 \text{ N/mm}^2 * 0.4 \text{ mm}^2 = 1057.0 \text{ N}$$

CASO 2: Angolo di spoglia reale pari a -6 gradi (Geometria Negativa)

Quando l'angolo di spoglia differisce dai 6 gradi standard, dobbiamo calcolare il fattore di correzione geometrico K_γ e applicarlo al valore di K_s calcolato in precedenza.

1. Calcolo del fattore di correzione (K_γ):

Formula: $K_\gamma = 1 - (\gamma - 6) / 66.7$

$$K_\gamma = 1 - (-12) / 66.7 = 1 + 0.18 = 1.18$$

(L'utilizzo di un inserto negativo a -6 gradi aumenta le forze di taglio del 18% rispetto alla geometria standard a 6 gradi).

2. Calcolo della nuova forza specifica di taglio (K_s reale):

$$K_{s \text{ reale}} = K_s * K_\gamma = 2642.6 \text{ N/mm}^2 * 1.18 = 3118.3 \text{ N/mm}^2$$

3. Calcolo della forza di taglio principale (F_t):

La sezione del truciolo (A) rimane invariata a 0.4 mm^2 .

$$F_t = K_{s \text{ reale}} * A = 3118.3 \text{ N/mm}^2 * 0.4 \text{ mm}^2 = 1247.3 \text{ N}$$

Tabella comparativa: Modello di Kienzle vs Modello di Kronenberg

Parametro Calcolato	Kienzle	Kronenberg	Kienzle	Kronenberg
	Angolo $\gamma = +6^\circ$		Angolo $\gamma = -6^\circ$	
Forza specifica K_s (N/mm^2)	2642.6	2405.3	3118.3	2838.3
Sezione del truciolo A (mm^2)	0.4	0.4	0.4	0.4
Forza di taglio totale F_t (N)	1057.0	962.1	1247.3	1135.3

Nota: Rispetto alla formula di Kienzle, il modello di Kronenberg basato sullo spessore fisso a 0.25 mm stima forze complessive leggermente inferiori (circa il 10% in meno), ma conferma lo stesso identico incremento proporzionale del 18% nello sforzo di taglio quando l'utensile passa da positivo (+6 gradi) a negativo (-6 gradi).

Kronenberg VS Kienzle

Il modello di Kronenberg fornisce valori di forza inferiori di circa il 10% rispetto a Kienzle.

Questo accade perché Kronenberg ancora i dati sperimentali a uno spessore di riferimento maggiore ($h_0 = 0.25$ mm) e utilizza un esponente di riduzione della forza leggermente più dolce (0.20 contro lo 0.24 di Kienzle).

Entrambi i modelli concordano matematicamente sull'effetto dell'angolo di spoglia negativo. Il passaggio da +6 gradi a -6 gradi genera in entrambi i casi un aumento netto del 18% della forza totale (F_t) richiesta alla macchina utensile, a causa della forte azione di ricalcatura e compressione del materiale sulla faccia dell'inserto.

Nella pratica industriale e ingegneristica moderna, il modello di Kienzle funziona meglio ed è il più utilizzato.

Sebbene entrambi i modelli si basino su principi corretti, i motivi della superiorità di Kienzle risiedono nella sua evoluzione e nel supporto da parte dei produttori di utensili.

Il modello di Kienzle è diventato lo standard dei produttori di utensili: colossi della truciolatura come [Sandvik Coromant](#), [Seco Tools](#) e Walter basano i calcolatori digitali e i dati tecnici dei cataloghi moderni sui coefficienti $k_{c1.1}$ e z derivati direttamente dalla formula di Kienzle.

Il modello offre maggiore precisione a bassi avanzamenti.

Nelle lavorazioni moderne di finitura (dove l'avanzamento f è molto piccolo, inferiore a 0.2 mm/giro), Kienzle descrive meglio l'aumento della forza specifica (K_s).

L'esponente di Kienzle (0.22 - 0.28 per gli acciai) è più aggressivo di quello di Kronenberg (fisso a 0.20), riflettendo con maggiore precisione il reale sforzo della macchina quando il truciolo diventa sottile.

I database moderni dei costruttori aggiornano costantemente i valori di $k_{c1.1}$ per i nuovi materiali (come le superleghe in titanio o inconel), mentre i coefficienti di Kronenberg sono rimasti ancorati a studi più datati.

Relazione di Taylor (durata di un utensile)

Per la maggior parte dei materiali da utensile abitualmente utilizzati nell'industria meccanica, e a parità di condizioni (materiale dell'utensile, materiale in lavorazione, sezione del truciolo e così via), la durata del tagliente, cioè il tempo di lavoro tra due successive riaffilature o sostituzioni, è funzione decrescente della velocità di taglio V_c .

$$V_c \cdot T^n = C$$

V_c = velocità di taglio espressa in m/min. che consente una durata del tagliente di T minuti;

T = durata del tagliente in minuti;

n = coefficiente di durata del tagliente, dipendente dal materiale dell'utensile

C = rappresenta la velocità di taglio per la quale l'utensile dura 1 minuto; costante, che dipende da molti fattori quali il criterio di usura, la geometria dell'utensile, il materiale in lavorazione e così via;

La formula derivata di Taylor per calcolare la durata T (in minuti) è:

$$T = (C / V_c)^{1/n} \text{ min}$$

Gruppo Materiale Pezzo	Parametro	Utensili in HSS (Acciaio Rapido)	Utensili in Metallo Duro (Carburo / HM)	Utensili in Ceramica (Ossidi/Nitruri)
Valore indicativo esponente (n)	n	0.10 - 0.15	0.20 - 0.30	0.50 - 0.70
Acciai dolci / automatici (es. 11SMn30, Fe360)	C	70	380	900
Acciai al carbonio (es. C40, C45)	C	60	350	800
Acciai legati da bonifica (es. 39NiCrMo4)	C	45	280	650
Acciai inossidabili (es. AISI 304, AISI 420)	C	40	250	550
Ghisa grigia perlitica (es. G25 / GG25)	C	50	300	1100
Ghisa sferoidale (es. GS500)	C	40	260	850
Alluminio e leghe leggere (Avional, Ergal ...)	C	250	900	no
Ottone da taglio libero (es. OT58)	C	180	700	no

Osservazioni

- Esponente n (Sensibilità alla velocità):** più l'utensile è tecnologicamente avanzato (es. passando da HSS a Ceramica), più il valore di n sale. Un esponente alto significa che l'utensile tollera molto meglio le alte temperature nella zona di taglio. Con l'HSS ($n = 0.12$), un piccolo aumento di velocità distrugge l'utensile. Con la ceramica ($n = 0.60$), si può spingere la velocità a valori elevatissimi senza una perdita drammatica di durata.
- Costante C (Attitudine alla lavorazione):** rappresenta fisicamente la velocità di taglio (in metri al minuto) necessaria per consumare completamente il tagliente in esattamente 1 minuto. Noterai che per materiali abrasivi o duri (come gli acciai legati o inox) il valore di C scende nettamente, obbligando a lavorare a velocità operative più basse per salvaguardare l'inserto.
- Limitazioni della ceramica:** per l'alluminio e l'ottone la ceramica non viene utilizzata a causa dell'affinità chimica che provocherebbe la fusione e l'incollamento del pezzo sulla superficie dell'utensile.

EX con tabelle inserti metallo duro:

Si deve tornire una barra di acciaio 36NiCrMo4 (HB=180) con un utensile provvisto di inserto P35.

Determinare la velocità di taglio V_c che consenta una durata $T = 30$ min.

Dalla tabella inserti P35 scegliendo $R_u=1,2$ mm abbiamo una velocità di taglio $V_c=175$ m/min con una vita di 15 minuti.

$$V_{c1} \cdot T_1^n = V_{c2} \cdot T_2^n = C \rightarrow V_{c2} = V_{c1} \cdot (T_1/T_2)^n = 175 \cdot (15/30)^{0,25} = 147 \text{ m/min}$$

Se aumentiamo, ad esempio, la velocità di taglio a 240 m/min la durata del tagliente diminuisce:

$$T_2 = T_1 \cdot (V_{c1}/V_{c2})^{1/n} = 15 \cdot (175/240)^{1/0,25} = 4,24 \text{ min.}$$

Esercizio

Si deve sgrossare una barra di acciaio C40 ($R_m = 620 \text{ N/mm}^2$) lunga 200m con diametro $D=30\text{mm}$ con utensili HSS, METALLO DURO e CERAMICI con angolo di spoglia standard di 6° . Usare $p= 2,5 \text{ mm}$ e $f = 0,16 \text{ mm/giro}$. Valutare tempi di passata e durata utensile.

Per poter calcolare la durata indicativa T delle varie tipologie di utensili tramite la Legge di Taylor è necessario innanzitutto determinare la velocità di taglio v_c ottimale per ciascun materiale dell'utensile lavorando un acciaio C40.

Nella pratica industriale e nei manuali d'officina, non si usa la stessa identica velocità di taglio per tutti gli utensili, poiché l'acciaio rapido (HSS) si fonderebbe istantaneamente alle velocità tipiche della ceramica. Si scelgono quindi le velocità di taglio consigliate in sgrossatura per ciascuna tecnologia per garantire una durata economica standard di circa 15-20 minuti per HSS e Metallo Duro, e di circa 10 minuti per la Ceramica.

Materiale pezzo: Acciaio C40 $\rightarrow$ $C = 60$ per HSS, $C = 350$ per Metallo Duro, $C = 800$ per Ceramica

Diametro della barra (D): 30 mm

Profondità di passata (p o a_p): 2.5 mm

Avanzamento (f): 0.16 mm/giro

Selezioniamo le velocità di taglio v_c , in metri al minuto standard per la sgrossatura del C40:

- Utensile HSS: $v_c = 30 \text{ m/min}$ (Velocità bassa per evitare il surriscaldamento)
- Utensile Metallo Duro: $v_c = 180 \text{ m/min}$ (Standard industriale)
- Utensile Ceramico: $v_c = 500 \text{ m/min}$ (Alta velocità per sfruttare la resistenza termica)

La formula derivata di Taylor per calcolare la durata T (in minuti) è: $T = (C / v_c)^{(1/n)}$

1. Calcolo durata per Utensile in HSS (Acciaio Rapido)

Parametri da tabella: $n = 0.12$ e $C = 60$

Velocità di lavoro impostata: $v_c = 30 \text{ m/min}$

Durata $T = 2^{8.333} = 322 \text{ minuti}$

Nota: L'HSS a velocità molto basse offre una durata lunghissima, ma la produttività è estremamente ridotta.

2. Calcolo durata per Utensile in Metallo Duro (Carburo Rivestito)

Parametri da tabella: $n = 0.25$ e $C = 350$

Velocità di lavoro impostata: $v_c = 180 \text{ m/min}$

Durata $T = 1.944^4 = 14.3 \text{ minuti}$

Nota: Questo è il perfetto bilanciamento economico industriale tra tempo di produzione e consumo dell'inserto

3. Calcolo durata per Utensile in Ceramica da taglio

Parametri da tabella: $n = 0.60$ e $C = 800$

Velocità di lavoro impostata: $v_c = 500 \text{ m/min}$

Durata $T = 1.6^{1.667} = 2.2 \text{ minuti}$

Nota: La ceramica a 500 m/min si usura molto rapidamente in sgrossatura su C40, solitamente viene preferita per passate interamente continue o su acciai già temprati ad alta durezza.

Numero di giri del mandrino (giri al minuto)

N giri richiesti al mandrino per il diametro iniziale della barra di 30 mm nei tre casi:

$n_{\text{HSS}} = (30 * 1000) / (3.14 * 30) = 318 \text{ giri/min}$

$n_{\text{Metallo Duro}} = (180 * 1000) / (3.14 * 30) = 1910 \text{ giri/min}$

$n_{\text{Ceramica}} = (500 * 1000) / (3.14 * 30) = 5307 \text{ giri/min}$

Utensile	v_c (m/min)	n° (giri/min)	Costante C	Esponente n	Durata T (minuti)
HSS	30	318	60	0.12	322.0
Metallo Duro	180	1910	350	0.25	14.3
Ceramica	500	5307	800	0.60	2.2

Velocità di Avanzamento (v_f)

Il tempo richiesto dall'utensile per percorrere l'intera lunghezza della barra dipende dalla velocità di avanzamento lineare (v_f) espressa in millimetri al minuto. La formula per calcolarla è:

$v_f = f * n \text{ [m/min]}$ (avanzamento per numero di giri del mandrino)

La formula del tempo di lavorazione per una singola passata è:

$T_h = L / v_f \text{ [min]}$

Calcolo del Tempo di Lavorazione (Th) per le tre tipologie di utensile

1. Utensile in HSS (n = 318 giri/min)

Velocità di avanzamento lineare: $v_f = 0.16 \text{ mm/giro} * 318 \text{ giri/min} = 50.88 \text{ mm/min}$

Tempo di lavorazione (Th): $200 \text{ mm} / 50.88 \text{ mm/min} = 3.93 \text{ minuti}$ (circa 3 minuti e 56 secondi).

Analisi economica:

La passata dura circa 4 minuti. Poiché l'utensile ha una durata totale stimata di 322 minuti, con questo utensile si possono effettuare circa 82 passate complete prima di doverlo riaffilare.

2. Utensile in Metallo Duro (n = 1910 giri/min)

Velocità di avanzamento lineare: $v_f = 0.16 \text{ mm/giro} * 1910 \text{ giri/min} = 305.6 \text{ mm/min}$

Tempo di lavorazione Th= $200 \text{ mm} / 305.6 \text{ mm/min} = 0.65 \text{ minuti}$ (circa 39 secondi).

Analisi economica:

La lavorazione è estremamente rapida (meno di un minuto). Poiché l'inserto in metallo duro dura 14.3 minuti a questa velocità, si possono completare circa 22 passate (ovvero 22 pezzi) prima di dover girare o sostituire il tagliente.

3. Utensile in Ceramica (n = 5307 giri/min)

Velocità di avanzamento lineare: $v_f = 0.16 \text{ mm/giro} * 5307 \text{ giri/min} = 849.12 \text{ mm/min}$

Tempo di lavorazione (Th): $200 \text{ mm} / 849.12 \text{ mm/min} = 0.24 \text{ minuti}$ (circa 14 secondi).

Analisi economica:

Il tempo di passata è fulmineo, ma la durata totale dell'utensile a 500 m/min è di soli 2.2 minuti.

Ciò significa che l'utensile si userà completamente dopo appena 9 passate.

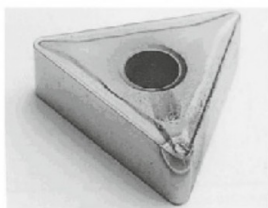
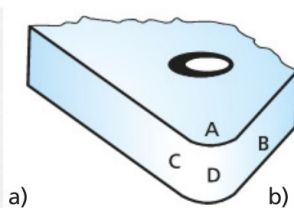
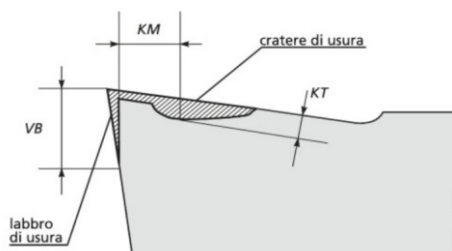
Tipo Utensile	vc (m/min)	n° (giri/min)	Potenza Taglio Pc (kW)	Tempo Passata Th (min)	Durata Utensile T (min)	Pezzi lavorabili per tagliente
HSS	30	318	0.53 kW	3.93 min	322.0 min	~82 pezzi
Metallo Duro	180	1910	3.17 kW	0.65 min	14.3 min	~22 pezzi
Ceramica	500	5307	8.81 kW	0.24 min	2.2 min	~9 pezzi

La potenza di taglio dipende direttamente dalla forza di taglio principale F_c e dalla velocità di taglio v_c :

$$P_c = (F_c * v_c) / 60000 \quad [\text{kW}]$$

NOTA La potenza di 3.17 kW con utensile in metallo duro è il tipico valore di regime per un tornio parallelo di medie dimensioni o un piccolo centro di tornitura CNC. È una potenza sostenibile che garantisce un ottimo rendimento produttivo

Usura utensile



Le principali zone di usura sul tagliente di un inserto sono:

- A = petto dell'inserto
- B = fianco del tagliente principale
- C = fianco del tagliente secondario
- D = raggio di punta o tratto parallelo

Lo stato d'usura è definito sulla base di tre grandezze:

- VB: larghezza del labbro d'usura sul fianco principale; un utensile è usurato quando $VB \geq 0,3 - 1 \text{ mm}$;
- KT: profondità del cratere sulla faccia dell'utensile;
- KM: distanza del punto medio del cratere dallo spigolo tagliente.

Un utensile è usurato quando è verificata una delle due condizioni:

- $KT/KM \geq 0,1$
- $KT \geq 0,1 - 0,3 \text{ mm}$

Esercizio riassuntivo

Si deve sgrossare una barra di acciaio C40 ($R_m = 620 \text{ N/mm}^2$) diametro $D=30\text{mm}$ con un utensile HSS con angolo di spoglia $= 5^\circ$. Si utilizza una profondità di passata $p= 2,5 \text{ mm}$ e un avanzamento $f = 0,16 \text{ mm/giro}$.

Kienzle per acciaio Carbonio $R_m=620\text{N/mm}^2$ $K_s = \frac{K_{s1.1}}{f^z}$ $K_s = \frac{2003,74}{f^{0,187}}$

Sgrossatura acciaio Carbonio $R_m=620\text{N/mm}^2$			
Rm	620	N/mm2	
D	30	mm	diametro pezzo
L	100	mm	lunghezza pezzo
Utensile HSS			
γ	5	°	angolo di spoglia
p	2,5	mm	(1-3,5)
f	0,16	mm/giro	(0,1-0,35)
Tornio			
Pm	1,6	kW	
η	0,8		rendimento tornio
%	0,8		percentuale di utilizzo macchina
Putile	1,024	kW	
Calcoli			
Ks	2822,7	N/mm2	
q	0,4	mm2	Sezione truciolo
Fc	1129,1	N	Forza di taglio
Calcolo della Vc di taglio che sfrutta tutta la potenza della macchina			
Vc	54,4	m/min	
NB: è consigliata fra 25-35!			
Quindi il numero di giri del tornio vale $V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$			
n	577,7	giri/min	
t	1,1	min	Tempo lavoro

Massimo sfruttamento della potenza disponibile

Dalle relazioni viste, è possibile ricercare anche i parametri di taglio che consentono il massimo sfruttamento della potenza della macchina. Infatti, ricordando che la potenza di taglio deve essere non superiore alla potenza disponibile su mandrino, dalla espressione della potenza di taglio si ha

$$P_c = \frac{F_c \times V_c}{60\,000} = \frac{K_s \times q \times V_c}{60\,000} = \frac{K_s \times p \times f \times V_c}{60\,000} \leq \eta P_m$$

Se dai calcoli risulta che la potenza disponibile è inferiore a quella richiesta, è necessario cambiare qualcosa nei parametri scelti.

Dal momento che la potenza necessaria per il taglio è data dal prodotto della forza di taglio per la velocità di taglio, si può agire o sulla forza o sulla velocità. Le scelte a disposizione sono elencate di seguito.

- Riduzione dell'avanzamento, che comporta:
 - migliori finiture superficiali;
 - aumento dei tempi di lavorazione.
- Riduzione della profondità di passata, che comporta:
 - migliori tolleranze;
 - aumento dei tempi di lavorazione.
- Riduzione della velocità di taglio, che comporta:
 - minore usura degli utensili;
 - aumento dei tempi di lavorazione.

Si dovrà quindi scegliere una delle soluzioni sopra descritte, a seconda dell'obiettivo che si ritiene prioritario.

Rugosità superficiale

I simboli di finitura superficiale vengono utilizzati per comunicare vari aspetti della qualità della superficie, tra cui rugosità, ondulazione e orientamento.

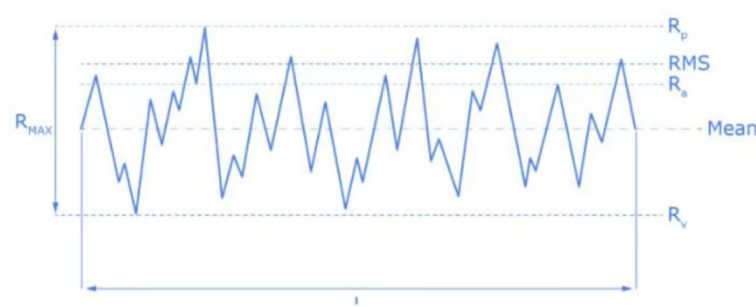
Questi simboli sono impiegati nei disegni tecnici e nei processi di lavorazione per indicare il livello di finitura superficiale richiesto per un particolare componente o superficie.

Tra le abbreviazioni più frequentemente utilizzate nel campo della rugosità superficiale abbiamo R_a , R_{max} e R_z :

- R_a (rugosità media della superficie)
- R_{max} ($R_p - R_v$ = altezza picco- altezza valle)
- R_z (altezza media massima del profilo)

Definizioni

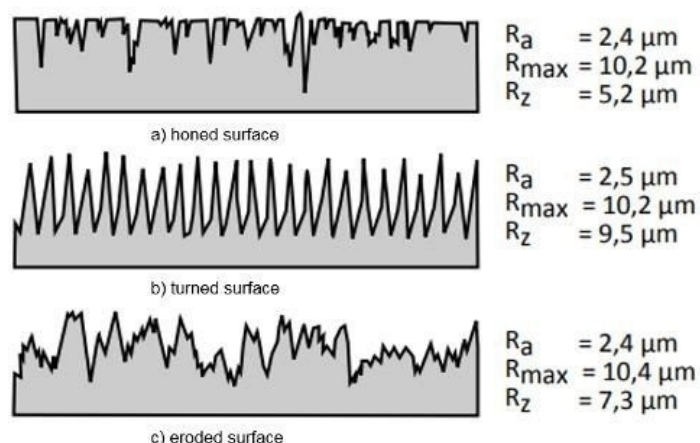
- R_a (rugosità superficiale media) : è la media aritmetica dei valori assoluti delle deviazioni dell'altezza della superficie misurate rispetto alla linea media su una lunghezza di campionamento.
- R_{max} (altezza picco-valle): rappresenta la massima distanza verticale tra il picco più alto e la valle più bassa nel profilo di una superficie entro una lunghezza di campionamento.
- R_z (l'altezza media massima del profilo): è la media delle cinque cime più alte e delle cinque valli più profonde lungo l'intera lunghezza del rilievo.



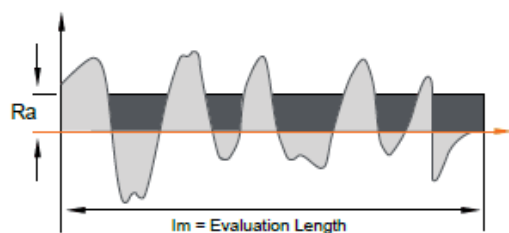
Esempio

- a) honed surface: superficie levigata (ottenuta tramite levigatura o honing)
- b) turned surface: superficie tornita
- c) eroded surface: superficie erosa (ottenuta tramite elettroerosione)

L'immagine illustra un concetto meccanico fondamentale: superfici con un valore di rugosità media R_a quasi identico (compreso tra 2,4 e 2,5) possono presentare una geometria del profilo completamente diversa e valori di altezza massima R_z molto differenti (da 5,2 a 9,5) a seconda del processo produttivo utilizzato.

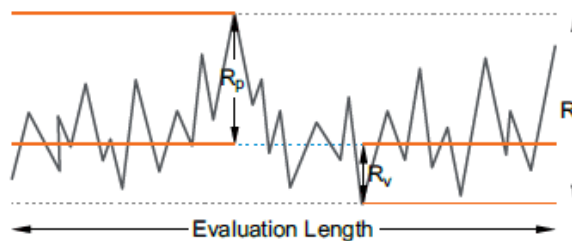


Ra – Surface Finish Measurement



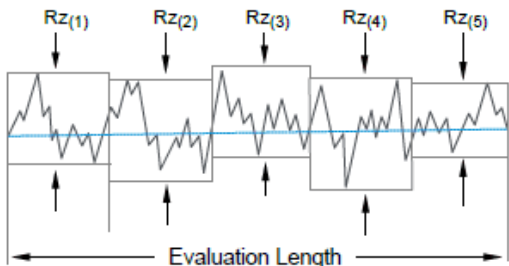
R_a = Arithmetical mean deviation of an absolute ordinate over the evaluation length

Rt – Surface Finish Measurement



R_t = Sum of height of the largest profile peak height R_p and the largest profile valley R_v over the evaluation length

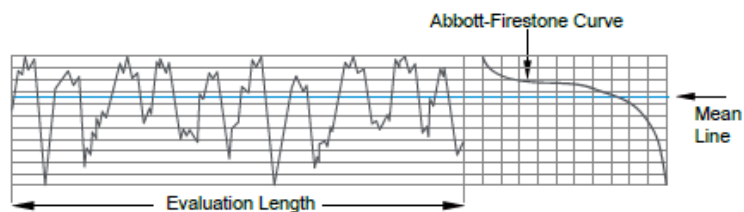
Rz – Surface Finish Measurement



$$Rz = (Rz(1) + Rz(2) + Rz(3) + Rz(4) + Rz(5)) / 5$$

$Rz_{(n)}$ = Sum of height of the largest profile peak height R_p and the largest profile valley R_v within a sampling length

Rmr – Surface Finish Measurement



The 'sharpness' of the surface using a material ratio taken from the Abbott-Firestone curve. The material ratio at a particular height is a slice through the profile giving the percentage length of the cut at that height compared to the evaluation length. The Rmr values are at a depth of 25% of the Rz value from a reference level of 5%.

Massimo avanzamento f in funzione di r_ϵ - R_a

La tabella da una indicazione di massima del rugosità media che si può ottenere nella tornitura in funzione del raggio di punta dell'utensile R_ϵ e dell'avanzamento f

Finitura superficiale R_a	Raggio di punta [mm]				
	0,4	0,8	1,2	1,6	2,4
	Avanzamenti [mm/giro]				
0,6	0,07	0,10	0,12	0,14	0,17
1,6	0,11	0,15	0,19	0,22	0,26
3,2	0,17	0,24	0,29	0,34	0,42
6,3	0,22	0,30	0,37	0,43	0,53
8	0,27	0,38	0,47	0,54	0,66
32				1,08	1,32



Classi di finitura

La finitura superficiale viene comunemente quantificata attraverso la rugosità Ra.

Nella tornitura convenzionale e a controllo numerico (CNC), la rugosità media aritmetica (Ra) ottenibile varia normalmente tra 0,4µm e 12,5µm, corrispondenti alle classi ISO da N5 a N10.

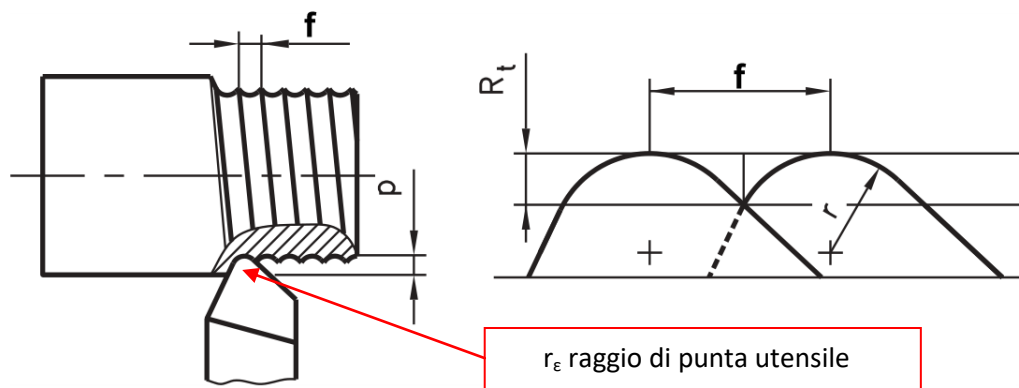
Grado di Finitura	Classe ISO	Ra media [µm]	Rz max. [µm]	Parametri tipici (f, rε)	Applicazione e Condizioni
Sgrossatura	N9 – N10	3,2÷12,5	16÷50	f≥0,25 mm/g rε=0,8÷1,2 mm	Asportazione massiccia, superfici non a contatto o destinate a passate successive.
Finitura Media (Semi-finitura)	N7 – N8	1,6÷3,2	6,3÷16	f≈0,15÷0,25 mm/g rε=0,8 mm	Superfici di appoggio statiche, carpenteria meccanica, accoppiamenti larghi.
Finitura Ordinaria / Accurata	N6	0,8÷1,6	3,2÷6,3	f≈0,10÷0,15 mm/g rε=0,4÷0,8 mm	Standard per accoppiamenti precisi (sedi cuscinetti H7/h6 prima di rettifica, tenute statiche).
Finitura Fine	N5	0,4÷0,8	1,6÷3,2	f≈0,05÷0,10 mm/g rε=0,4÷0,8 mm	Limite pratico della tornitura tradizionale: inserti affilati/lappati, alta vc, lubrorefrigerazione continua.
Superfinitura / Tornitura Dura (con utensili speciali)	N3 – N4	0,1÷0,4	0,5÷1,6	Geometria Wiper o utensili in CBN / PCD / Monocristallo (SPDT)	Sostituisce la rettifica su acciai temprati o leghe non ferrose; richiede macchine ad altissima rigidità.

Rugosità ottenibile con le diverse tipologie di macchine utensili

PROCESSO	RUGOSITA' SUPERF. (µm)
piallatura	1.5 ÷ 12.5
limatura	1.5 ÷ 12.5
fresatura	0.9 ÷ 6.25
brocciatura	0.9 ÷ 3.00
alesatura	0.9 ÷ 3.00
barenatura	0.5 ÷ 6.25
tornitura	0.5 ÷ 6.25
finitura pietra diamantata	0.25 ÷ 0.5
rettifica	0.125 ÷ 1.75
levigatura	0.125 ÷ 1.625
brunitura	0.125 ÷ 0.5
lappatura	0.05 ÷ 0.5
lucidatura	0.05 ÷ 0.5
superfinitura	0.025 ÷ 0.25

Formula di Schmalz per la rugosità media teorica $R_{a,th}$

Nella tornitura longitudinale esterna eseguita con un utensile a raggio di punta r_ϵ , il profilo dei solchi generati dall'avanzamento f determina la rugosità geometrica ideale (teorica).



Le relazioni Fondamentali

- **Altezza massima teorica del profilo** (rugosità picco-valle R_{th} o R_{max}):

$$R_{th} \approx f^2 / (8 \cdot r_\epsilon)$$

- **Formula di Schmalz per la rugosità media aritmetica teorica ($R_{a,th}$):**

La rugosità media aritmetica al profilo geometrico circolare è data dalla relazione:

$$R_{a,th} \approx R_{th} / 3,85 \approx f^2 / (31,2 \cdot r_\epsilon)$$

Unità di misura:

- f = avanzamento per giro [mm/giro]
- r_ϵ = raggio di punta dell'inserto [mm]
- R_{th} ed $R_{a,th}$ risultano in millimetri [mm] (moltiplicare x 1000 per avere [μ m])

Rugosità Teorica vs Rugosità Reale (R_a)

Il valore reale R_a misurato sperimentalmente con il rugosimetro è > di quello teorico a causa di:

- Formazione del tagliente di riporto a velocità di taglio non ottimali
- Ritorno elastico e deformazione plastica laterale del materiale lavorato (side flow)
- Micro-vibrazioni e tolleranza geometrica del tagliente

Per tenere conto di tutte le variabili in gioco si usa un coefficiente correttivo sperimentale $K_m \geq 1$: $R_{a,reale} = K_m \cdot R_{a,th}$

Il coefficiente sperimentale K_m con utensili HSS su acciaio C45 risulta generalmente più elevato e disperso rispetto agli inserti in metallo duro rivestiti. La causa principale risiede nel fatto che la gamma di velocità tipica dell'HSS (20 - 40 m/min) coincide con l'intervallo critico di formazione del Tagliente di Riporto (BUE - Built-Up Edge).

Valori K_m con utensili HSS e Metallo Duro (HM) per acciai

Parametro Operativo	Utensile in HSS / HSS-E	Utensile in Metallo Duro (HM) Rivestito
Velocità di taglio finitura (v_c)	30 - 42 m/min	180 - 240 m/min
Rischio Tagliente di Riporto	Alto (v_c nel campo critico)	Nulla / Trascurabile (v_c elevata)
Raggio del filo tagliente (r_β)	Molto piccolo (2 - 8 μ m)	Medio (15 - 30 μ m, filo arrotondato)
Fattore K_m (con refrigerante)	1,30 - 1,60	1,15 - 1,25
Fattore K_m (a secco)	1,80 - 2,50+	1,25 - 1,35
Grado di finitura raggiungibile	N6 - N7 ($R_a \approx 0,8 - 1,6 \mu$ m)	N5 - N6 ($R_a \approx 0,4 - 0,8 \mu$ m)

Per leghe di alluminio (es. EN AW-6082 T6 / Anticorodal):

- $K_m \approx 1,05 \div 1,15$ (inserto lappato a specchio), $v_c \geq 350 \div 600$ m/min

Esempi di Calcolo

Esempio 1: Finitura su Acciaio C45 (Normalizzato / Bonificato)

- **Parametri:** $r_{\epsilon} = 0,8$ mm; $f = 0,10$ mm/giro; $v_c = 210$ m/min; $p = 0,5$ mm.
- $R_{th} = (0,10)^2 / (8 \cdot 0,8) = 0,01 / 6,4 = 0,00156$ mm = **1,56 μ m**
- $R_{a,th} = [(0,10)^2 / (31,2 \cdot 0,8)] \cdot 1000 = [0,01 / 24,96] \cdot 1000 \approx$ **0,40 μ m**
- **Stima $R_{a,reale}$** con $K_m \approx 1,25$: $R_{a,reale} \approx 1,25 \cdot 0,40 \mu\text{m} \approx$ **0,50 μ m** (Classe N5 / N6)

Esempio 2: Finitura su Lega di Alluminio (EN AW-6082 T6)

- **Parametri:** $r_{\epsilon} = 0,4$ mm; $f = 0,08$ mm/giro; $v_c = 450$ m/min; $p = 0,3$ mm.
- $R_{th} = (0,08)^2 / (8 \cdot 0,4) = 0,0064 / 3,2 = 0,0020$ mm = **2,00 μ m**
- $R_{a,th} = [(0,08)^2 / (31,2 \cdot 0,4)] \cdot 1000 = [0,0064 / 12,48] \cdot 1000 \approx$ **0,51 μ m**
- **Stima $R_{a,reale}$** con $K_m \approx 1,10$: $R_{a,reale} \approx 1,10 \cdot 0,51 \mu\text{m} \approx$ **0,56 μ m**

Esempio 3: Calcolo Inverso per R_a

- **Obiettivo:** $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$ su C45 con $r_{\epsilon} = 0,8$ mm e $K_m = 1,3$.
- **Target teorico:** $R_{a,th} \leq 0,8 / 1,3 \approx 0,615 \mu\text{m} = 0,000615$ mm
- **Formula inversa:** $f = \sqrt{31,2 \cdot r_{\epsilon} \cdot R_{a,th}}$
- $f = \sqrt{31,2 \cdot 0,8 \cdot 0,000615} = \sqrt{0,01535} \approx$ **0,124 mm/giro**
- **Impostazione consigliata CNC:** $f \leq$ **0,12 mm/giro**.

Tabella Riassuntiva

f [mm/giro]	r_{ϵ} [mm]	R_{th} [μ m]	$R_{a,th}$ [μ m]	R_a C45 stimato [μ m]	R_a Al 6082 stimato [μ m]
0,05	0,4	0,78	0,20	0,25	0,22
0,08	0,4	2,00	0,51	0,64	0,56
0,10	0,4	3,12	0,80	1,00	0,88
0,10	0,8	1,56	0,40	0,50	0,44
0,15	0,8	3,52	0,90	1,13	0,99
0,20	0,8	6,25	1,60	2,00	1,76

Nota: Se l'avanzamento scende al di sotto di 0,03 - 0,04 mm/giro, l'utensile smette di tagliare in modo netto e comincia a tallonare (deformazione plastica laterale o burnishing), facendo peggiorare la rugosità reale.

Esempio 4: finitura esterna con inserto metallo duro HM ($r_{\epsilon} = 0,8 \text{ mm}$)

Finitura acciaio Rm=620N/mm2 con HM			
Rm	620	N/mm2	
D	20	mm	diametro pezzo
L	100	mm	lunghezza pezzo
Utensile HM			
γ	5	°	angolo di spoglia
r_{ϵ}	0,8	mm	raggio punta
Parametri			
p	0,3	mm	0,3-0,5
v_c	350	m/min	
Ra, reale	1,2	μm	
Km	1,5	coeff. correttivo	
Ra, th	0,8	μm	
Tornio			
Pe	1,6	kW	
η	0,75	rendimento tornio datato	
Putile	1,2	kW	
Calcoli			
Dalla definizione di rugosità media		$R_{a,th} \approx R_{th} / 3,85 \approx f^2 / (31,2 \cdot r_{\epsilon})$	
f	0,1413	mm2	avanzamento
q	0,0424	mm2	sezione truciolo
Ks	2889	N/mm2	$K_s = \frac{K_{s1,1}}{f^z} \quad K_s = \frac{2003,74}{f^{0,187}}$
Fc	122,5	N	forza di taglio
Pc	0,71	kW	potenza di taglio
n	5573	giri/min	numero giri mandrino

Notare

Il valore del numero di giri richiesto! Per ridurlo devo abbassare la v_c . Ma fino a che punto?
Meglio usare utensili con inserti in metallo duro o inserti HSS?

Finitura al tornio e velocità di taglio v_c con inserti in metallo duro

Il Modello Teorico

Se guardiamo la formula teorica della rugosità superficiale media (R_a), la velocità di taglio (v_c) effettivamente non compare. La rugosità viene calcolata come una pura conseguenza geometrica dell'avanzamento e della forma dell'utensile:

$$R_a \approx f^2 / (31,2 * r_\epsilon)$$

- f = Avanzamento (mm/giro)
- r_ϵ = Raggio di punta dell'inserto o dell'utensile HSS (mm)

Secondo questo modello geometrico, più l'avanzamento è lento o il raggio di punta è ampio, più le creste di questo solco si appiattiscono, abbassando la rugosità. La velocità di taglio v_c NON influisce sulla rugosità!

In realtà la v_c è determinante!

Quando si passa dal modello matematico al tornio reale, la finitura non dipende solo dall'impronta geometrica, ma dalla **dinamica di formazione del truciolo**.

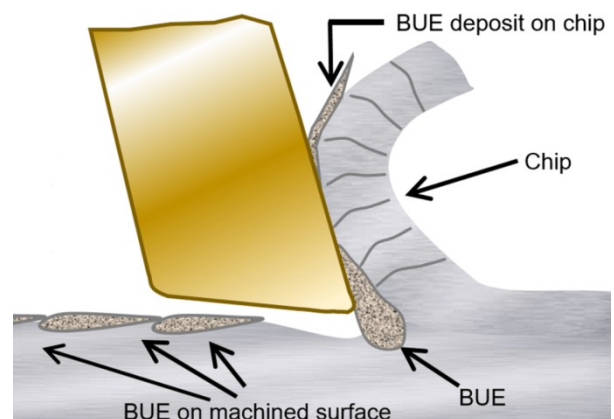
È qui che la velocità di taglio entra pesantemente in gioco, principalmente per tre fenomeni fisici:

1. Il Tagliente di Riporto (BUE - Built-Up Edge)

Questo è il nemico numero uno della finitura.

A velocità di taglio basse, le alte pressioni e l'attrito fanno sì che particelle del materiale lavorato (specialmente con alluminio o acciai a basso tenore di carbonio) si saldino a freddo sul filo del tagliente. Questo accumulo altera la geometria dell'inserto e, quando diventa instabile, si stacca. Una parte se ne va con il truciolo, ma l'altra **rimane impastellata e strappata sulla superficie appena lavorata**, creando una finitura opaca e ruvida.

Aumentando la velocità di taglio, la temperatura nella zona di taglio sale oltre il punto in cui si genera il BUE, garantendo un taglio pulito e una superficie lucida.



<https://www.youtube.com/watch?v=mRuSYQ5Npek&t=305s>

2. Plasticità del Materiale

Una velocità di taglio più elevata fa innalzare la temperatura localizzata nel piano di scorrimento primario. Questo calore ammorbidisce plasticamente il truciolo una frazione di secondo prima che venga asportato, permettendo al tagliente di "recidere" il metallo in modo netto invece di "strapparlo" meccanicamente.

3. Vibrazioni (Chatter)

La velocità di taglio (v_c) combinata al diametro del pezzo determina i giri al minuto (RPM) del mandrino.

Se gli RPM intercettano la frequenza di risonanza del pezzo a sbalzo o della torretta, si innescano micro-vibrazioni. Queste vibrazioni lasciano inevitabilmente segni ondulati visibili (chatter marks) sulla superficie.

Spesso basta aumentare o diminuire la v_c del 10% per uscire dalla frequenza critica e ripristinare un'ottima finitura. In sintesi: l'avanzamento e il raggio di punta creano il limite teorico della rugosità, ma per raggiungerlo effettivamente bisogna mantenere la **velocità di taglio sufficientemente alta** da evitare la formazione del tagliente di riporto e garantire un distacco netto del truciolo.

Come valutare la velocità minima di taglio in finitura per evitare problemi

Non esiste una formula matematica assoluta per calcolare la velocità minima anti-BUE, perché il fenomeno dipende dall'interazione chimico-fisica tra il materiale del pezzo, il rivestimento dell'utensile e le temperature in gioco.

Tuttavia, si valuta la velocità minima di taglio (v_c) attraverso tre criteri pratici e un limite fisico:

1. I parametri del costruttore dell'inserto in metallo duro

I cataloghi dei produttori di utensili non forniscono mai una velocità fissa, ma un range specifico per la finitura di un dato materiale (es. v_c 150-250 m/min). Il **valore minimo indicato in quel range** è esattamente la soglia calcolata e testata dal produttore per garantire che la temperatura di taglio sia sufficiente a plastificare il truciolo ed evitare la saldatura a freddo sul tagliente. Lavorare al di sotto di quel valore minimo significa perdere la garanzia sulla qualità superficiale.

2. Soglie empiriche per classe di materiale (ISO)

Ogni famiglia di metalli ha una tendenza diversa all'impastamento. Come riferimento generale in finitura:

- **Alluminio e leghe leggere (ISO N):**
Estremamente pastosi. Il rischio di incollaggio è altissimo.
La v_c minima per ottenere una finitura lucida e netta parte quasi sempre dai **250-300 m/min** a salire.
- **Acciai a basso carbonio (es. C15, S235JR - ISO P):**
Molto "gommosi" e propensi a strapparsi invece di tagliarsi. Richiedono almeno **120-150 m/min** per recidere il materiale di netto.
- **Acciai a medio/alto carbonio e legati (es. C45, 42CrMo4):**
Essendo più duri e meno duttili, il truciolo si stacca più facilmente.
Si può scendere a **80-100 m/min** senza incorrere in gravi problemi di finitura.

3. Diagnostica visiva a bordo macchina

Se il programma CNC è già in esecuzione, il pezzo e l'utensile offrono feedback visivi immediati per capire se si è sotto la velocità minima:

- **Finitura lattiginosa o opaca:** Se la superficie finita risulta nuvolosa o, guardandola in controluce, presenta microscopici crateri/strappi, il tagliente di riporto si sta formando e frammentando sul pezzo. La v_c va alzata.
- **Ispezione dell'inserto:** Fermando il mandrino e osservando il tagliente, se si nota un grumo metallico saldato proprio sul filo tagliente, la velocità di taglio è decisamente troppo bassa.

Il problema dei piccoli diametri

La vera criticità nell'applicare queste velocità minime emerge lavorando pezzi di piccolo diametro, un limite classico delle macchine desktop o a uso didattico.

Ricordando la formula: $n = (v_c * 1000) / (\pi * D)$

Se si deve eseguire la passata di finitura su un perno in alluminio di diametro $D = 10$ mm a una v_c minima di 250 m/min, il mandrino dovrebbe girare a circa **8.000 giri/min**.

Se il tornio utilizzato ha un limite fisico a 3.000 giri/min siamo vincolati a lavorare a una v_c massima di soli 94 m/min, cadendo in piena "zona tagliente di riporto".

Come compensare se il tornio non raggiunge i giri necessari?

Se non possibile aumentare la velocità, si deve ridurre drasticamente l'attrito.

È d'obbligo l'uso di inserti specifici per alluminio: lappati a specchio, privi di rivestimenti scuri (niente CVD/PVD), con un angolo di spoglia superiore molto positivo. A questo si deve abbinare un flusso abbondante e mirato di lubrorefrigerante o aria/olio per mantenere il tagliente scivoloso.

Finitura al tornio e velocità di taglio v_c con utensili HSS

Passare dagli inserti in metallo duro (carburo) agli utensili in acciaio super rapido (HSS) **cambia completamente la situazione**, spostando l'intera finestra dei parametri verso il basso.

Se con gli inserti la strategia è "alzare la velocità per generare calore e far scorrere via il truciolo", con l'HSS la strategia diventa **"taglio puro a freddo"**.

Alla velocità minima in finitura quando si usa l'HSS abbiamo

1. La soglia minima di v_c scompare

Con gli inserti, abbiamo visto che sotto una certa v_c (es. 250 m/min per l'alluminio) l'utensile "strappa" il materiale creando il tagliente di riporto (BUE). L'HSS, invece, non ha bisogno di generare calore per plastificare il truciolo. Il motivo è geometrico: l'HSS può essere molato per ottenere un **tagliente vivo** con angoli di spoglia estremamente positivi. Gli inserti in metallo duro, per non sbeccarsi, hanno quasi sempre un micro-arrotondamento o uno smusso sul filo.

Grazie a questa affilatura estrema, l'HSS **recide il materiale di netto anche a bassissime velocità**.

2. I nuovi parametri di taglio

Le velocità ottimali dell'HSS sono una frazione di quelle del metallo duro, perché l'HSS perde durezza e si brucia a temperature molto inferiori (circa 600°C contro gli oltre 1000°C del carburo).

- **Alluminio e leghe leggere:**
Invece dei 300 m/min degli inserti, con l'HSS si lavora in modo eccellente tra i **60 e i 100 m/min**.
- **Acciai dolci:**
Si scende drasticamente a **25-35 m/min**.

Questo risolve il problema dei piccoli diametri.

Tornando all'esempio del perno in alluminio da 10 mm di diametro: impostando una v_c di 80 m/min adatta all'HSS, i giri richiesti dal mandrino scendono a circa **2.500 giri/min**.

Questo è un regime perfettamente gestibile anche da piccoli torni desktop o macchine leggere, garantendo una finitura a specchio senza stressare la meccanica.

3. Come si combatte il BUE con l'HSS?

Se l'HSS taglia bene a bassa velocità, è comunque soggetto al tagliente di riporto, specialmente con l'alluminio, che tende a incollarsi ovunque. Non potendo alzare i giri per sciogliere il truciolo, le armi a disposizione cambiano:

- **Lappatura del petto dell'utensile:**
Dopo aver molato l'HSS, è fondamentale passare una pietra a olio o diamantata finissima sulla faccia superiore. Più la superficie a contatto con il truciolo è a specchio, meno l'alluminio troverà appiglio per incollarsi.
- **Lubrificazione abbondante e obbligatoria:**
Con gli inserti si può spesso lavorare a secco; con l'HSS su alluminio, il fluido da taglio (emulsione, olio intero, o anche lubrificazione minimale ad alcol/WD40) è tassativo.
Il fluido ha il compito di creare una pellicola anti-attrito e lavare via il truciolo prima che si saldi al filo.

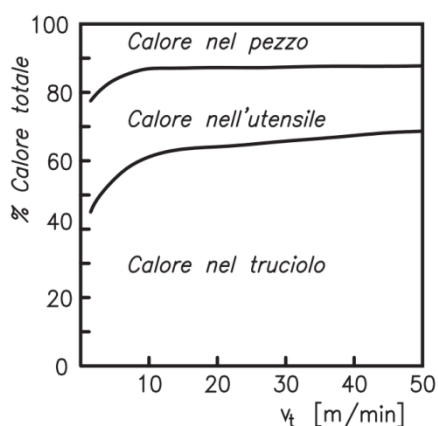
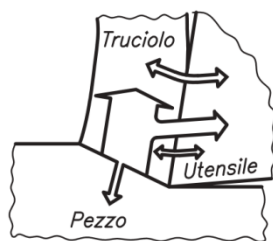
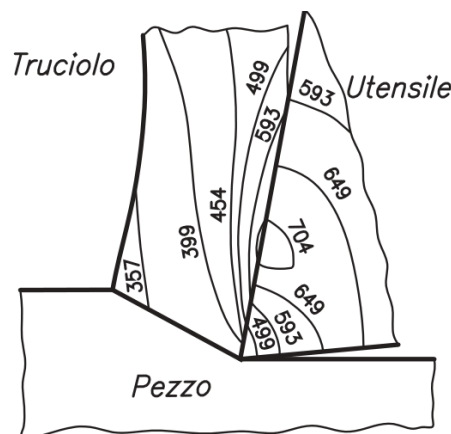
Equazione di Cook per la temperatura di taglio

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°. L'energia residua viene trattenuta dal truciolo sotto forma di energia elastica (2%).

La stragrande maggioranza del calore (max. 90%) viene portata via dal truciolo.

Mentre il truciolo è in continuo movimento e può smaltire il calore ricevuto (poiché si allontana dall'utensile), l'utensile può solo smaltire calore per irraggiamento o per lubrificazione, per cui il calore si disperde in un volume abbastanza ridotto, con conseguenti temperature abbastanza elevate. Per quanto riguarda il pezzo, la quantità di calore che riceve è modesta e si disperde in una massa di materiale elevata, per cui non si osservano apprezzabili variazioni di temperatura.

Ovviamente per piccoli pezzi il discorso cambia e la cosa fa molto più complessa.



L'Equazione di Cook

L'equazione di Nathan H. Cook rappresenta un fondamentale modello analitico nello studio delle lavorazioni meccaniche. Permette di stimare la temperatura media che si genera all'interfaccia tra il tagliente dell'utensile e il truciolo durante il processo di taglio ortogonale, un dato cruciale per la scelta dei materiali degli inserti e dei parametri di taglio.

La formula in notazione analitica si esprime come:

$$T = T_0 + [(0,4 \cdot U) / (\rho \cdot c)] \cdot [(v_c \cdot t_0) / K]^{1/3}$$

Definizione delle Grandezze Fisiche

Simbolo	Definizione Tecnico-Fisica	Unità di Misura
T	Temperatura media all'interfaccia truciolo-utensile	C
T₀	Temperatura ambiente iniziale del pezzo	C
U	Energia specifica di taglio del materiale	J/mm ³
ρ · c	Calore specifico volumetrico del materiale	J/(mm ³ · C)
v_c	Velocità di taglio	mm/s
t₀	Spessore del truciolo indeformato (= avanzamento <i>f</i> nella tornitura)	mm
K	Diffusività termica del materiale lavorato	mm ² /s
1/3	Esponente empirico (0,333) sperimentalmente per i metalli	

Sgrossatura (inserto metallo duro HM su C45)

Analizziamo una passata di sgrossatura a secco su acciaio da bonifica C45, condizione gravosa ideale per valutare il picco termico.

Dati di Processo e Caratteristiche Termo-Meccaniche (C45)

- $T_0 = 20\text{ °C}$
- $v_c = 150\text{ m/min} \rightarrow (150 \cdot 1000) / 60 = 2500\text{ mm/s}$
- $t_o (=f) = 0,3\text{ mm/giro}$
- $U = 2200\text{ J/mm}^3$
- $\rho \cdot c = 3,77\text{ J/(mm}^3 \cdot \text{°C)}$
- $K = 11,9\text{ mm}^2/\text{s}$

Svolgimento del Calcolo Analitico

Calcolo del Fattore Termico del Materiale

Rappresenta l'aumento di temperatura dovuto alla pura deformazione plastica e all'attrito locale.

- **Fattore A** = $(0,4 \cdot U) / (\rho \cdot c) = (0,4 \cdot 2200) / 3,77 = 880 / 3,77 = \mathbf{233,42\text{ °C}}$

Calcolo del Fattore di Taglio Cinematico

Lega la velocità di deformazione alla capacità del materiale di dissipare calore nell'unità di tempo.

- **Fattore B** = $[(v_c \cdot t_o) / K]^{1/3} = [(2500 \cdot 0,3) / 11,9]^{1/3} = [750 / 11,9]^{1/3} = (63,02)^{0,333} = \mathbf{3,98}$

Temperatura Interfacciale Finale (T)

Unione dei fattori determinati nelle fasi precedenti:

- **T** = $T_0 + (\text{Fattore A} \cdot \text{Fattore B}) = 20 + (233,42 \cdot 3,98) = 20 + 928,9 = \mathbf{948,9\text{ °C}}$

Conclusioni Tecnologiche

Il calcolo teorico restituisce una temperatura all'interfaccia tagliente-truciolo di circa 949 °C.

Questa evidenza numerica dimostra analiticamente perché, nella sgrossatura degli acciai a velocità sostenute ($v > 150\text{ m/min}$), sia tecnologicamente insostenibile l'impiego di utensili in acciaio super rapido (**HSS**), la cui durezza a caldo decade bruscamente superati i 600 °C.

Risulta pertanto obbligatorio il passaggio a inserti in metallo duro (**HM**) o materiali ceramici, capaci di resistere a tali sollecitazioni termiche senza collassare strutturalmente.

Sgrossatura (HSS su C45)

Se sostituiamo l'inserito in metallo duro (HM) con un utensile in acciaio super rapido (HSS), non possiamo fisicamente mantenere la velocità di 150 m/min utilizzata nel calcolo precedente per il C45 (l'HSS fonderebbe).

La velocità di taglio tipica di un utensile HSS su un acciaio da bonifica è circa 30 m/min.

Dati di processo e caratteristiche termo-meccaniche (C45)

Parametro	Simbolo	Valore	Unità di Misura
Temperatura ambiente	T_0	20	°C
Velocità di taglio	v_c	30	m/min
Velocità di taglio (conversione)	v_c	500	mm/s
Avanzamento	$t_o = f$	0,3	mm/giro
Energia specifica di taglio	U	2200	J/mm ³
Capacità termica volumetrica	$\rho \cdot c$	3,77	J/(mm ³ · °C)
Diffusività termica	K	11,9	mm ² /s

Nota di conversione: $v = (30 \cdot 1000) / 60 = 500 \text{ mm/s}$

Svolgimento del Calcolo Analitico

Fase A: Calcolo del Fattore Termico del Materiale

Questo termine dipende esclusivamente dalle proprietà fisiche e meccaniche del materiale deformato (C45).

- Fattore A = $(0,4 \cdot U) / (\rho \cdot c) = (0,4 \cdot 2200) / 3,77 = 880 / 3,77 = \mathbf{233,42 \text{ °C}}$

Fase B: Calcolo del Fattore di Taglio Cinematico

In questo parametro incide in modo decisivo la nuova velocità di taglio ridotta.

- Fattore B = $[(v_c \cdot t_o) / K]^{1/3} = [(500 \cdot 0,3) / 11,9]^{1/3} = [150 / 11,9]^{1/3} = (12,605)^{1/3} = \mathbf{2,327}$

Fase C: Temperatura Interfacciale Finale (T)

- $T = T_0 + (\text{Fattore A} \cdot \text{Fattore B}) = 20 + (233,42 \cdot 2,327) = 20 + 543,15 = \mathbf{563,15 \text{ °C}}$

Conclusioni Tecnologiche

La temperatura teorica calcolata all'interfaccia utensile-truciolo è di circa 563 °C.

1. Limite Strutturale dell'HSS

L'acciaio super rapido mantiene la sua durezza a caldo e la resistenza all'usura solo fino a circa 600 °C (prossimo alla sua temperatura di rinvenimento). Il risultato di 563 °C dimostra geometricamente che a 30 m/min stiamo lavorando al limite termico assoluto dell'utensile. Aumentare l'avanzamento o la velocità anche solo di 5-10 m/min porterebbe in pochissimo tempo il tagliente al rammollimento plastico e al conseguente collasso strutturale.

2. Impatto sulla Finitura (Tagliente di Riporto)

Lavorare l'acciaio C45 a soli 30 m/min crea un grave problema parallelo: posiziona il processo nella "zona critica" per la formazione del "Tagliente di Riporto". Micro-particelle di truciolo si incollano a freddo sul petto dell'utensile e si strappano in continuazione, alterando la geometria del profilo. Questo peggiora drasticamente la rugosità superficiale rispetto a quella ottenibile a 150 m/min con un utensile in metallo duro.

Sgrossatura su Lega di Alluminio EN AW-6082 T6

L'alluminio si comporta in modo termodinamicamente molto diverso rispetto all'acciaio: richiede meno energia per essere tagliato ma possiede un'elevata conducibilità termica.

Dati di processo per Anticorodal:

- $T_0 = 20\text{ °C}$
- $v = 450\text{ m/min} \rightarrow (450 \cdot 1000) / 60 = 7500\text{ mm/s}$
- t_0 (avanzamento f) = **0,3 mm/giro**
- $U = 700\text{ J/mm}^3$
- $\rho \cdot c = 2,43\text{ J/(mm}^3 \cdot \text{°C)}$
- $K = 65,0\text{ mm}^2/\text{s}$

Svolgimento del Calcolo Analitico

$$T = T_0 + [(0,4 \cdot U) / (\rho \cdot c)] \cdot [(v \cdot t_0) / K]^{1/3}$$

Fase A: Calcolo del Fattore Termico del Materiale

- **Fattore A** = $(0,4 \cdot U) / (\rho \cdot c) = (0,4 \cdot 700) / 2,43 = 280 / 2,43 = 115,23\text{ °C}$

Fase B: Calcolo del Fattore di Taglio Cinematico

- **Fattore B** = $[(v \cdot t_0) / K]^{1/3} = [(7500 \cdot 0,3) / 65,0]^{1/3} = [2250 / 65,0]^{1/3} = (34,61)^{0,333} = 3,26$

Fase C: Temperatura Interfacciale Finale (T)

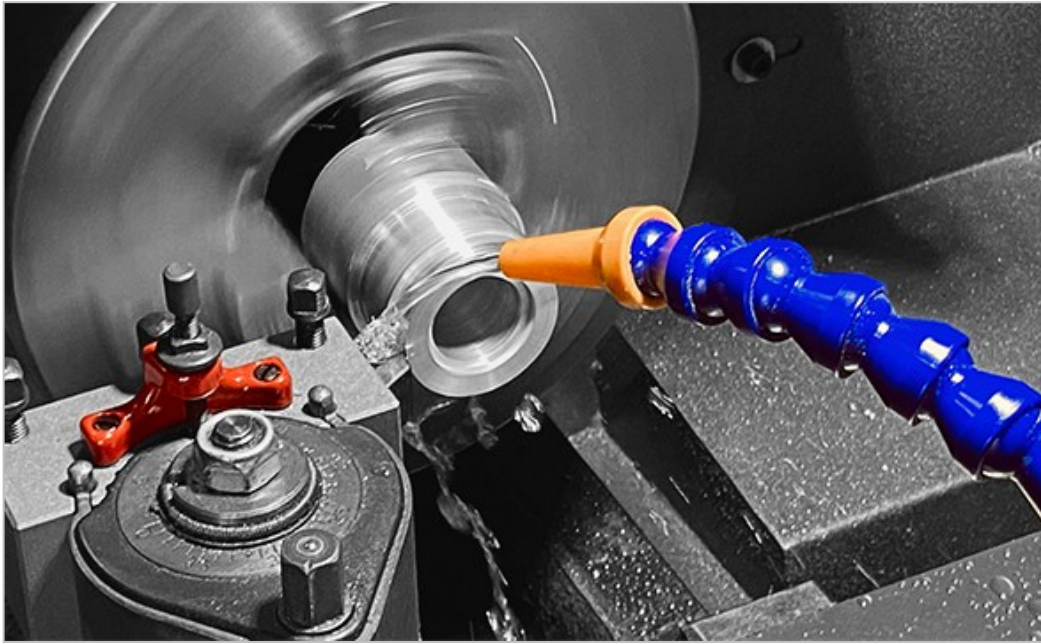
- $T = T_0 + (\text{Fattore A} \cdot \text{Fattore B}) = 20 + (115,23 \cdot 3,26) = 20 + 375,65 = 395,65\text{ °C}$

Conclusioni Tecnologiche: Alluminio vs Acciaio

Il calcolo teorico restituisce una temperatura all'interfaccia tagliente-truciolo di circa 396 °C. Confrontando questo risultato con i 949 °C del C45, emergono differenze chiave:

1. **Smaltimento del calore:** Nonostante la velocità triplicata, la temperatura massima generata è meno della metà rispetto al C45 grazie all'altissima diffusività termica (K).
2. **Rischio di Incollamento (BUE):** A 396 °C l'alluminio diventa pastoso e tende a saldarsi a freddo sull'utensile.
3. **Utensileria:** È indispensabile l'uso di inserti lappati a specchio e getti abbondanti di lubrorefrigerante per impedire l'incollamento del truciolo.

Tornitura con liquido refrigerante



L'equazione di Cook, nella sua forma base, è stata sviluppata originariamente per modellare il taglio a secco (condizione quasi adiabatica). Se si introduce un fluido refrigerante, la formula non diventa invalida, ma sovrastima la temperatura reale, diventando un calcolo "cautelativo" o relativo al solo calore teorico generato.

Durante la sgrossatura (specie su acciaio), la pressione di contatto tra il truciolo e il petto dell'utensile è spaventosamente alta (spesso superiore a 1000 MPa).

Un normale getto di emulsione a bassa pressione (es. 5-10 bar = 0.5-1 MPa) non riesce a penetrare fisicamente in questa zona di contatto.

Di conseguenza, il picco termico nel "cuore" dell'interfaccia rimane molto vicino a quello calcolato dall'equazione di Cook, poiché lì l'effetto di raffreddamento è minimo.

Si introduce quindi un coefficiente di riduzione sperimentale:

si calcola la temperatura a secco con Cook e la si moltiplica per un fattore di riduzione empirico (ad esempio 0,85 per getto standard, o 0,60 per getti ad alta pressione HPC a 70-150 bar, che riescono a penetrare sotto il truciolo).

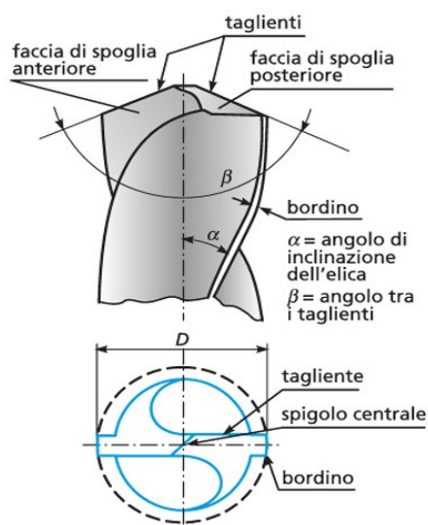
LAVORAZIONI AD ALTA VELOCITA' (HSM)

Nella tornitura ad alta velocità (High Speed Machining) si aumentano drasticamente la velocità di taglio. Il tempo fisico di contatto tra il truciolo appena formato e l'utensile si riduce a frazioni di millisecondo. Il calore non fa letteralmente in tempo a trasferirsi per conduzione dal truciolo all'inserto.

Di conseguenza, a velocità molto elevate, la percentuale di calore asportata dal truciolo sale verso il 90-95%, lasciando il pezzo finito senza distorsioni termiche e proteggendo l'utensile dal surriscaldamento.

Foratura

La foratura dei metalli è un'operazione meccanica per asportazione di truciolo che consiste nel creare fori (generalmente cilindrici) all'interno di un pezzo metallico pieno tramite un utensile rotante (come una punta elicoidale) che avanza in direzione assiale nel materiale, rimuovendo parte del metallo sotto forma di trucioli.



In funzione del materiale da lavorare sono pre viste, per le punte da trapano, tre esecuzioni:

- N per materiali di durezza normale
- D per materiali duri
- T per materiali teneri.

Le moderne punte elicoidali in metallo duro hanno un grado di precisione compreso tra IT 8 e IT 10 e realizzano rugosità Ra 1-2 μm .

Esecuzione delle punte da trapano

Materiale da lavorare	Esecuzione	Angolo fra i taglienti (β)
acciaio $R_m < 700$	N	118
ghisa HBW < 240	N	118
ghisa HBW > 240	N	118
ghisa malleabile	N	118
ottoni, alpacche	N	118
acciaio con $R_m > 700$	N	130
rame e leghe di rame tenere	N	140
leghe di rame incrudite	N	140
acciaio inox martensitico	N	140
acciaio inox austenitico	D	140
leghe leggere a truciolo corto	N	140
leghe leggere a truciolo lungo	T	140
leghe di magnesio	T	140
materia plastica stampata	D	80
materia plastica stratificata	D	80
marmo, ardesia	D	80

Angolo di inclinazione dell'elica in funzione del diametro di punta

Dimensioni della punta	Angolo dell'elica (α)		
	N	D	T
$d \leq 0,6$	$13^\circ \div 19^\circ$	–	–
$0,6 < d \leq 1$	$15^\circ \div 21^\circ$	–	–
$1 < d \leq 3,2$	$17^\circ \div 23^\circ$	$8^\circ \div 12^\circ$	$30^\circ \div 38^\circ$
$3,2 < d \leq 5$	$19^\circ \div 25^\circ$	$9^\circ \div 15^\circ$	$30^\circ \div 40^\circ$
$5 < d \leq 10$	$22^\circ \div 28^\circ$	$10^\circ \div 16^\circ$	$35^\circ \div 45^\circ$
$d > 10$	$25^\circ \div 30^\circ$	$10^\circ \div 16^\circ$	$35^\circ \div 45^\circ$

Tipologie punte da foratura

Punte in acciaio superrapido HSS

MATERIALE DA FORARE		V_c [m/min]	PUNTE IN ACCIAIO SUPERRAPIDO							
			Avanzamento [mm/giro]							
			Diametro [mm]							
			2	5	8	12	16	25	40	60
acciaio con R_m	$\leq 400 \text{ N/mm}^2$	30 ÷ 40	0,04	0,08	0,15	0,20	0,25	0,30	0,45	0,50
	$= 600 \text{ N/mm}^2$	20 ÷ 35	0,04	0,08	0,15	0,20	0,25	0,30	0,45	0,50
	$= 800 \text{ N/mm}^2$	15 ÷ 25	0,04	0,07	0,12	0,15	0,18	0,25	0,32	0,40
	$= 1000 \text{ N/mm}^2$	10 ÷ 15	0,03	0,04	0,08	0,12	0,14	0,18	0,22	0,28
	$= 1200 \text{ N/mm}^2$	8 ÷ 10	0,02	0,03	0,07	0,10	0,12	0,16	0,20	0,25
acciaio inossidabile		6 ÷ 12	0,03	0,04	0,07	0,10	0,12	0,16	0,20	0,25
ghisa HB	< 200	25 ÷ 40	0,07	0,12	0,20	0,28	0,32	0,40	0,50	0,60
	$= 200 \div 300$	15 ÷ 30	0,05	0,08	0,14	0,18	0,20	0,25	0,35	0,45
	> 300	10 ÷ 20	0,03	0,08	0,12	0,18	0,25	0,30	0,40	0,50
rame, ottone tenero		60 ÷ 100	0,04	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70
bronzo, ottone duro		25 ÷ 50	0,02	0,10	0,14	0,20	0,25	0,32	0,40	0,50
alluminio, leghe leggere tenere		60 ÷ 150	0,10	0,18	0,30	0,35	0,40	0,50	0,60	0,65
leghe leggere dure		25 ÷ 40	0,05	0,10	0,15	0,25	0,30	0,40	0,45	0,50

Punte integrali in metallo duro

MATERIALE DA FORARE		V_c [m/min]	PUNTE INTEGRALI							
			Avanzamento [mm/giro]							
			Diametro [mm]							
			3	6	8	10	12	14	16	18
acciaio	basso C	110	0,08	0,15	0,20	0,25	0,30	0,33	0,35	0,38
	da costruzione e debolmente legati	100	0,08	0,15	0,20	0,25	0,30	0,33	0,35	0,38
	da utensile	75	0,08	0,12	0,16	0,20	0,25	0,28	0,30	0,35
	temprati	65	0,07	0,10	0,13	0,16	0,20	0,24	0,26	0,30
acciaio inossidabile	austenitico		0,05	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
	ferritico e martensitico	85	0,08	0,12	0,16	0,20	0,25	0,28	0,30	0,35
ghisa	GJ 150	95	0,12	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,50
	GJ 300	80	0,10	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,45
	GJS 350, sferoidale	75	0,07	0,10	0,13	0,16	0,20	0,24	0,26	0,30
leghe leggere, ottone, bronzo		180	0,12	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,50

Punte a inserti rivestiti metallo duro

	HB	Diametro punta	Velocità di taglio [m/min]	Avanzamento per giro [mm/giro]
		D_c [mm]	V_c	f
acciaio	80 ÷ 170	14,00 ÷ 16,49	220 ÷ 400 230 ÷ 380 190 ÷ 235	0,04 ÷ 0,08
		16,50 ÷ 19,99		0,04 ÷ 0,10
		20,00 ÷ 23,99		0,04 ÷ 0,12
		24,00 ÷ 29,99		0,04 ÷ 0,12
acciaio inox	150 ÷ 260	14,00 ÷ 16,49	175 ÷ 320 180 ÷ 290 115 ÷ 180	0,04 ÷ 0,10
		16,50 ÷ 19,99		0,06 ÷ 0,10
		20,00 ÷ 23,99		0,06 ÷ 0,14
		24,00 ÷ 29,99		0,06 ÷ 0,14
acciaio inox	150 ÷ 275	14,00 ÷ 16,49	120 ÷ 265 115 ÷ 165	0,04 ÷ 0,14
		16,50 ÷ 19,99		0,06 ÷ 0,16
		20,00 ÷ 23,99		0,06 ÷ 0,18
		24,00 ÷ 29,99		0,06 ÷ 0,18
ghisa	200 ÷ 330	14,00 ÷ 16,49	110 ÷ 250 125 ÷ 230 75 ÷ 140	0,06 ÷ 0,10
		16,50 ÷ 19,99		0,06 ÷ 0,12
		20,00 ÷ 23,99		0,08 ÷ 0,14
		24,00 ÷ 29,99		0,08 ÷ 0,14
leghe di alluminio	70 ÷ 140	14,00 ÷ 16,49	250 ÷ 335	0,04 ÷ 0,12
		16,50 ÷ 19,99		0,04 ÷ 0,14
		20,00 ÷ 23,99		0,06 ÷ 0,16
		24,00 ÷ 29,99		0,10 ÷ 0,18
leghe del nichel	140 ÷ 425	14,00 ÷ 16,49	20 ÷ 88	0,04 ÷ 0,08
		16,50 ÷ 19,99		0,05 ÷ 0,08
		20,00 ÷ 23,99		0,05 ÷ 0,08
		24,00 ÷ 29,99		0,06 ÷ 0,10
acciai temprati	450	14,00 ÷ 16,49	40 ÷ 100 30 ÷ 80 30 ÷ 80	0,04 ÷ 0,08
		16,50 ÷ 19,99		0,05 ÷ 0,12
		20,00 ÷ 23,99		0,05 ÷ 0,14
		24,00 ÷ 29,99		0,05 ÷ 0,14

Punte in acciaio superrapido HSS

Valori indicativi della velocità di taglio e avanzamento per foratura lubrorefrigerata con punte di acciaio HSS aventi diametro 1-60 mm, previsioni di vita dell'utensile pari a una lunghezza complessiva di foratura di 2 metri.

Materiale da lavorare	Velocità di taglio [v_d] (m/min)	Avanzamento [f] (mm/giro)
Acciai da costruzione non legati ($R_m < 700$ MPa)	25 - 40	0,015 - 0,45
Acciai da costruzione non legati ($R_m > 700$ MPa)	20 - 30	0,01 - 0,40
Acciai legati ($R_m \leq 900$ MPa)	15 - 20	0,01 - 0,30
Acciai legati ($R_m \geq 900$ MPa)	8 - 15	0,007 - 0,25
Ghisa tenera (≤ 200 HBW 10/3000)	20 - 30	0,025 - 0,55
Ghisa dura (> 200 HBW 10/3000)	10 - 25	0,012 - 0,40
Acciai inossidabili	5 - 10	0,01 - 0,30
Ottone (Cu $\leq 58\%$)	65 - 100	0,03 - 0,70
Ottone (Cu $> 58\%$), rame, bronzo	40 - 65	0,02 - 0,45
Leghe di alluminio	50 - 120	0,02 - 0,50
Leghe di magnesio	60 - 150	0,03 - 0,75

Punte a inserti metallo duro rivestiti

Valori indicativi della velocità di taglio e avanzamento per foratura lubrorefrigerata e punte con rivestimento superficiale TiN aventi diametro 1-60 mm, previsione di vita dell'utensile pari a una lunghezza complessiva di foratura di 2 metri.

Materiale da lavorare	Diametro punta (mm)	Velocità di taglio (m/min)	Avanzamento (mm/giro)	Qualità ISO
Acciaio ($R_m = 850 - 1400$ MPa)	2 - 10 10 - 20 20 - 40	40 - 45 45 - 60 60 - 70	0,02 - 0,05 0,04 - 0,08 0,08 - 0,12	K 30
Getti di acciaio ($R_m > 700$ MPa)	2 - 10 10 - 20 20 - 40	15 - 20 20 - 25 25 - 30	0,02 - 0,05 0,04 - 0,08 0,08 - 0,12	K 10
Acciai al Ni-Cr ($R_m \leq 1400$ MPa)	2 - 10 10 - 20 20 - 40	15 - 20 20 - 25 25 - 30	0,02 - 0,04 0,03 - 0,05 0,06 - 0,08	K 10
Acciai da utensili ($R_m = 1000-2000$ MPa)	2 - 10 10 - 20 20 - 40	8 - 10 10 - 12 12 - 15	0,02 - 0,03 0,03 - 0,04 0,04 - 0,05	K 10
Ghisa con HBW 10/3000 ≤ 200	2 - 10 10 - 20 20 - 40	50 - 55 55 - 60 60 - 65	0,04 - 0,08 0,08 - 0,15 0,15 - 0,30	K 10
Ghisa con HBW 10/3000 > 200	2 - 10 10 - 20 20 - 40	25 - 30 30 - 35 35 - 40	0,03 - 0,05 0,05 - 0,10 0,10 - 0,20	K 10
Ottone, bronzo (durezza media)	2 - 10 10 - 20 20 - 40	70 - 80 80 - 85 85 - 90	0,06 - 0,10 0,10 - 0,15 0,15 - 0,20	K 10
Leghe leggere	2 - 10 10 - 20 20 - 40	200 - 230 230 - 260 260 - 300	0,06 - 0,10 0,10 - 0,18 0,18 - 0,25	K 10

Punte in metallo duro

Valori indicativi da un catalogo produttori.

	Materiale			Nuova qualità Coromant	Velocità di taglio v_c m/min	Diametro della punta, mm						
	No. CMC	HB					3,00—6,00	6,01—10,00	10,01—14,00	14,01-20,00		
							Avanzamento f_n mm/giro ³⁾					
P	Acciaio non legato											
	01.0	125	C = 0,05-0,10%	1220	80-140	0,10-0,25	0,15-0,34	0,20-0,40	0,22-0,45			
	01.1	125	C = 0,10-0,25%	1220	80-140	0,10-0,25	0,15-0,34	0,20-0,40	0,22-0,45			
	01.2	150	C = 0,25-0,55%	1220	80-140	0,10-0,25	0,15-0,34	0,20-0,40	0,22-0,45			
	01.3	170	C = 0,55-0,80%	1220	70-130	0,10-0,25	0,15-0,34	0,20-0,40	0,22-0,45			
	Acciaio ad alto tenore di carbonio											
	01.4	210	Acciaio per utensili al carbonio	1220	70-120	0,10-0,25	0,15-0,34	0,20-0,40	0,22-0,45			
	Acciaio debolmente legato											
	02.1	180	Non trattato	1220	70-120	0,10-0,20	0,14-0,30	018-0,35	0,20-0,40			
	02.2	275	Bonificato	1220	70-100	0,10-0,20	0,14-0,30	018-0,35	0,20-0,40			
	02.2	350	Bonificato	1220	50-80	0,10-0,20	0,14-0,25	018-0,35	0,20-0,38			
	Acciaio fortemente legato											
	03.11	200	Ricotto	1220	40-80	0,08-0,14	0,10-0,22	0,14-0,25	0,16-0,32			
03.21	325	Acciaio per utensili bonificato	1220	40-70	0,08-0,14	0,10-0,22	0,12-0,25	0,18-0,28				
Getti di acciaio												
06.1	180	Acciaio non legato	1220	70-130	0,10-0,20	0,15-0,34	0,20-0,40	0,22-0,45				
06.2	200	Acciaio debil. legato (elementi leganti <5%)	1220	70-120	0,10-0,20	0,15-0,34	0,20-0,40	0,22-0,45				
M	Acciaio inossidabile											
	05.11	200	Non trattato / Ferritico/Martensitico	1220	40-80 ¹⁾	0,08-0,14	0,08-0,20	0,12-0,22	0,14-0,24			
	05.21	180	Austenitico	1220	40-80 ¹⁾	0,08-0,14	0,08-0,20	0,12-0,22	0,14-0,24			
	Acciaio inossidabile											
15.21	200	Getti di acciaio inoss. austenitico	1220	40-80 ¹⁾	0,08-0,14	0,08-0,20	0,12-0,22	0,14-0,24				
S	Superleghe resistenti al calore —base nichel											
	20.21	250	Ricotte o solubilizzate	1220	10-25	0,06-0,12	0,08-0,15	0,08-0,15	0,10-0,16			
	20.22	350	Invecchiate o solubilizzate ed invecchiate	1220	10-25	0,06-0,12	0,08-0,15	0,08-0,15	0,10-0,16			
	20.24	320	Fuse o fuse ed invecchiate	1220	10-25	0,06-0,12	0,08-0,15	0,08-0,15	0,10-0,16			
	Leghe di titanio											
	23.21	Rm ²⁾ = 850	Leghe α , simili ad α e ad $\alpha + \beta$, ricotte	1220	20-60	0,06-0,12	0,08-0,20	0,14-0,28	0,16-0,30			
	23.22	Rm ²⁾ =1050	Leghe $\alpha + \beta$ in condizioni invecchiate, leghe β , ricotte o invecchiate	1220	20-60	0,06-0,12	0,08-0,20	0,14-0,28	0,16-0,30			
K	Ghisa malleabile											
	07.1	130	Ferritica (truciolo corto)	1220	90-150	0,15-0,30	0,25-0,40	0,35-0,60	0,40-0,60			
	07.2	230	Perlitica (truciolo lungo)	1220	70-130	0,15-0,25	0,20-0,35	0,30-0,55	0,35-0,55			
	Ghisa grigia											
	08.1	180	Bassa resistenza	1220	90-150	0,15-0,30	0,25-0,40	0,35-0,60	0,40-0,60			
	08.2	260	Alta resistenza	1220	70-130	0,15-0,25	0,20-0,35	0,30-0,55	0,35-0,55			
	Ghisa nodulare, tipo GS											
	09.1	160	Ferritica	1220	80-110	0,15-0,30	0,25-0,40	0,35-0,60	0,40-0,60			
	09.2	250	Perlitica	1220	70-100	0,15-0,25	0,20-0,35	0,30-0,55	0,35-0,55			
H	Acciaio molto duro											
	04.1	43-47 HRc	Temprato	1220	30-50	0,06-0,10	0,08-0,12	0,10-0,15	0,12-0,18			
	04.1	47-60 HRc		1220	15-25	0,06-0,10	0,08-0,12	0,10-0,15	0,12-0,18			
N	Leghe di alluminio											
	30.11	60	Lavorate plasticamente o lavorate plastica-	1220/N20D	120-230	0,15-0,25*	0,20-0,40*	0,30-0,50*	0,40-0,60*			
	30.21	75	mente e trafilate a freddo, non invecchiate	1220/N20D	120-230	0,15-0,25*	0,20-0,40*	0,30-0,50*	0,40-0,60*			
	Fuse, non invecchiate											
	Rame e leghe di rame											
33.1	110	Leghe al piombo, Pb $\geq$ 1%	1220/N20D	90-150	0,15-0,25*	0,20-0,40*	0,30-0,50*	0,40-0,60*				
33.2	90	Ottone e metalli rosa, Pb $\leq$ 1%	1220/N20D	90-150	0,15-0,25*	0,20-0,40*	0,30-0,50*	0,40-0,60*				

Filettatura



Velocità di taglio per maschi HSS.

Materiale in lavorazione	Spoglia frontale	Velocità di taglio [m/min]	Refrigerante
Acciaio da costruzione $R \cong 750 \text{ N/mm}^2$	10-12°	10-15	Olio da taglio, emulsione
Acciaio da cementazione $R \cong 750 \text{ N/mm}^2$	10-12°	10-15	Olio da taglio, emulsione
Acciaio ad alta velocità $R \cong 750 \text{ N/mm}^2$	10-12°	10-15	Olio da taglio, emulsione
Acciaio per stampaggio a freddo $R \cong 900 \text{ N/mm}^2$	10-12°	5-10	Olio da taglio, emulsione
Lamiera per profilati imbutiti $R \cong 900 \text{ N/mm}^2$	10-12°	5-10	Olio da taglio, emulsione
Acciaio da bonifica $R > 1000 \text{ N/mm}^2$	8-12°	4-6	Olio da taglio, emulsione
Acciaio da costruzione a caldo $R > 1000 \text{ N/mm}^2$	8-12°	4-6	Olio da taglio, emulsione
Acciaio per alte temperature $R > 1000 \text{ N/mm}^2$	8-12°	4-6	Olio da taglio, emulsione
Acciaio inossidabile	10-12°	5-10	Olio da taglio
Ghisa grigia	5°	6-15	Olio da taglio, emulsione
Ghisa malleabile	10-12°	10-15	Olio da taglio, emulsione
Rame e sue leghe	15-18°	10-15	Olio da taglio, emulsione
Ottone a truciolo corto	3-5°	20-30	Olio da taglio, emulsione
Ottone a truciolo lungo	18-20°	10-15	Olio da taglio, emulsione
Bronzo a truciolo corto	4-8°	5-15	Olio da taglio, emulsione
Bronzo a truciolo lungo	12-15°	5-15	Olio da taglio, emulsione
Alluminio	25°	10-15	Emulsione
Leghe alluminio a truciolo corto	12-15°	20-30	Emulsione
Leghe speciali ghisa dura	8-10°	2-3	Olio da taglio
Titanio e sue leghe	8-10°	2-6	Olio da taglio

Parametri di taglio della foratura

Velocità di taglio

$$V_c = 3.14 D n \quad \text{m/min}$$

Velocità di avanzamento

$$V_f = f n \quad \text{mm/min}$$

Sezione truciolo

$$q = f/2 D/2 = f D / 4 \quad [\text{mm}^2]$$

Forza di taglio

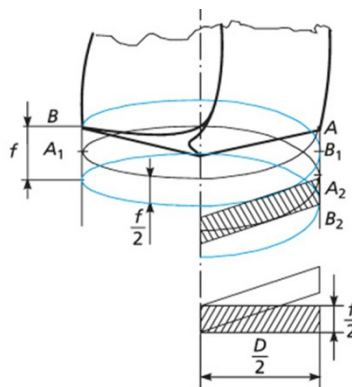
$$F_c = K_s q = K_s f D / 4 \quad [\text{N}]$$

K_s = carico di strappamento unitario del truciolo

Dipende da un coefficiente c sperimentale

$$K_s = c R_m$$

c coefficiente sperimentale (per acciai 4.5-4.9)



Materiale		c
acciaio	basso tenore di C	4,9
	medio tenore di C	4,7
	alto tenore di C	4,5
ghisa		5
ottone		2,5
bronzo		3,1
alluminio		4,8

Potenza di taglio

$$P_c = 2 F_c v_{c1} / 60000 \quad \text{kW}$$

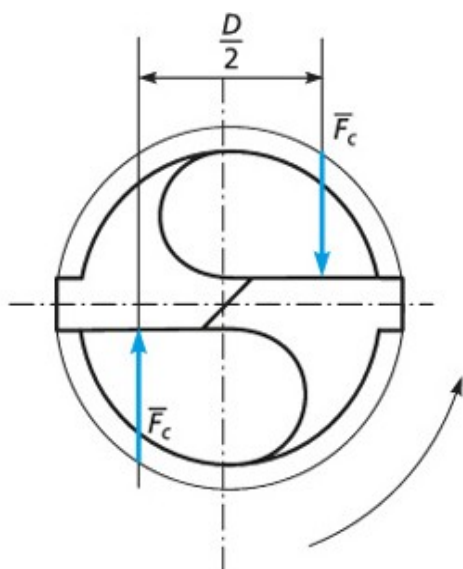
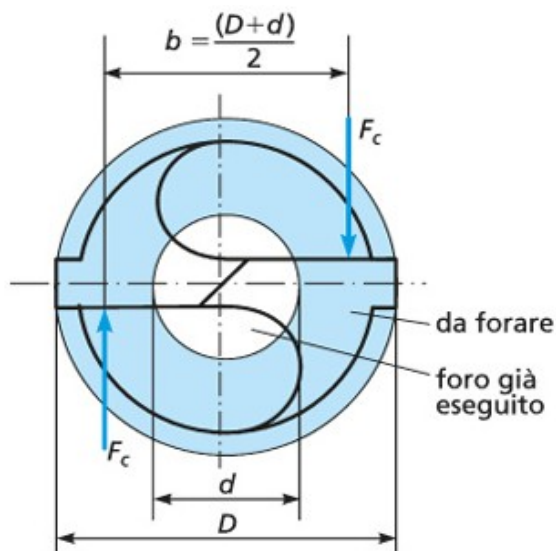
$v_{c1} = v_c / 2$ velocità di taglio relativa al punto medio $D/2$

v_c = velocità di taglio periferica al diametro D

Momento torcente (coppia) sulla punta

In prima approssimazione, si può ritenere che la pressione di taglio si ripartisca in modo uniforme sui due taglienti e che la risultante di tali pressioni sia concentrata nella mezzeria di ognuno di questi quindi il braccio vale $b = D/2$.

Nel caso di foratura con un preforo la situazione cambia e il braccio diventa $b = (D+d)/2$



Momento torcente sulla punta (foro da pieno):

$$M_t = F_c \cdot D/2 \quad \text{N m}$$

Potenza di taglio

$$P_c = M_t n / 9549,3 \quad (\text{kW}) \quad \text{dove } n \text{ (giri/min)}$$

La forza di penetrazione P

Può essere scomposta in due forze F_2 uguali perpendicolari agli spigoli dei taglienti.

Indicando con β l'angolo fra i taglienti, si può determinare con la seguente formula

$$F_2 = F_1 \sin(\beta/2) \quad \text{con } F_1 = F_c$$

$$P = 2 F_2 = K_s f D/2 \sin(\beta/2) \quad (\text{N})$$

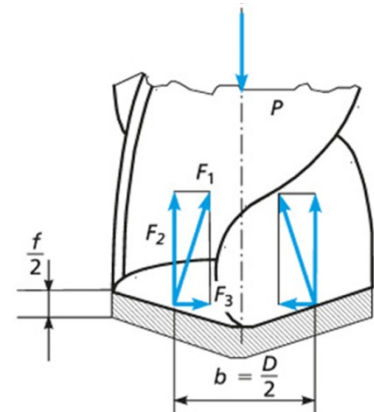
La velocità di avanzamento della punta:

$$v_f = f n / 1000 \quad (\text{m/min}) \quad (\text{NB: il 1000 serve a passare ai metri})$$

La potenza di avanzamento diventa

$$P_f = P v_f / 60000 \quad (\text{kW})$$

Da osservare che in genere si tratta di una potenza trascurabile.



Tempo lavorazione

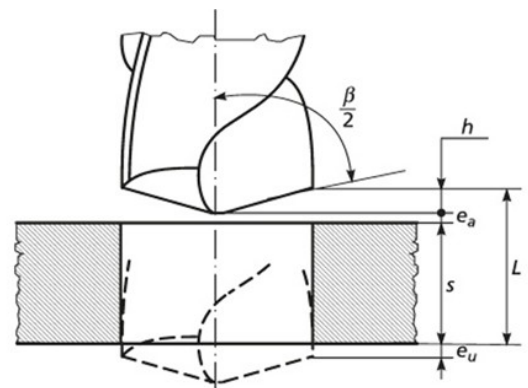
La lunghezza complessiva di lavorazione è data da

$$L = s + h + e \quad (\text{mm})$$

- L = lunghezza di foratura;
- s = spessore del pezzo;
- h = altezza del cono della punta;
- e = extracorsa, somma dell'extracorsa in attacco e in uscita.

$$h = D/s \tan(\beta/2) \quad (\text{mm})$$

$$t_f = L / v_f \quad (\text{min})$$



Esercizio foratura punta HSS

Foratura acciaio C40 con punta HSS																																																																													
Df	16 mm																																																																												
Rm	690 N/mm2																																																																												
HB	210																																																																												
L	20 mm																																																																												
e	2 mm																																																																												
Punta HSS esecuzione N con angolo 118°																																																																													
Punta N 16 UNI 5622:1965																																																																													
D punta	16 mm																																																																												
β	118 °																																																																												
<table><tr><th colspan="2" rowspan="4">MATERIALE DA FORARE</th><th colspan="9">PUNTE IN ACCIAIO SUPERRAPIDO</th></tr><tr><th rowspan="3">V_c [m/min]</th><th colspan="8">Avanzamento [mm/giro]</th></tr><tr><th colspan="8">Diametro [mm]</th></tr><tr><th>2</th><th>5</th><th>8</th><th>12</th><th>16</th><th>25</th><th>40</th><th>60</th></tr><tr><td rowspan="3">acciaio con R_m</td><td>≤ 400 N/mm²</td><td>30 ÷ 40</td><td>0,04</td><td>0,08</td><td>0,15</td><td>0,20</td><td>0,25</td><td>0,30</td><td>0,45</td><td>0,50</td></tr><tr><td>= 600 N/mm²</td><td>20 ÷ 35</td><td>0,04</td><td>0,08</td><td>0,15</td><td>0,20</td><td>0,25</td><td>0,30</td><td>0,45</td><td>0,50</td></tr><tr><td>= 800 N/mm²</td><td>15 ÷ 25</td><td>0,04</td><td>0,07</td><td>0,12</td><td>0,15</td><td>0,18</td><td>0,25</td><td>0,32</td><td>0,40</td></tr></table>											MATERIALE DA FORARE		PUNTE IN ACCIAIO SUPERRAPIDO									V _c [m/min]	Avanzamento [mm/giro]								Diametro [mm]								2	5	8	12	16	25	40	60	acciaio con R _m	≤ 400 N/mm ²	30 ÷ 40	0,04	0,08	0,15	0,20	0,25	0,30	0,45	0,50	= 600 N/mm ²	20 ÷ 35	0,04	0,08	0,15	0,20	0,25	0,30	0,45	0,50	= 800 N/mm ²	15 ÷ 25	0,04	0,07	0,12	0,15	0,18	0,25	0,32	0,40
MATERIALE DA FORARE		PUNTE IN ACCIAIO SUPERRAPIDO																																																																											
		V _c [m/min]	Avanzamento [mm/giro]																																																																										
			Diametro [mm]																																																																										
			2	5	8	12	16	25	40	60																																																																			
acciaio con R _m	≤ 400 N/mm ²	30 ÷ 40	0,04	0,08	0,15	0,20	0,25	0,30	0,45	0,50																																																																			
	= 600 N/mm ²	20 ÷ 35	0,04	0,08	0,15	0,20	0,25	0,30	0,45	0,50																																																																			
	= 800 N/mm ²	15 ÷ 25	0,04	0,07	0,12	0,15	0,18	0,25	0,32	0,40																																																																			
vc	30 m/min																																																																												
f	0,22 mm x interpolazione																																																																												
n	597,1 giri/min																																																																												
Calcolo del Ks																																																																													
<table><tr><th colspan="2">Materiale</th><th>c</th></tr><tr><td rowspan="3">acciaio</td><td>basso tenore di C</td><td>4,9</td></tr><tr><td>medio tenore di C</td><td>4,7</td></tr><tr><td>alto tenore di C</td><td>4,5</td></tr></table>											Materiale		c	acciaio	basso tenore di C	4,9	medio tenore di C	4,7	alto tenore di C	4,5																																																									
Materiale		c																																																																											
acciaio	basso tenore di C	4,9																																																																											
	medio tenore di C	4,7																																																																											
	alto tenore di C	4,5																																																																											
c	4,7																																																																												
Ks	3243 N																																																																												
q	0,88 mm2																																																																												
Forza di taglio									Braccio forze																																																																				
Fc	2853,84 N								b	8																																																																			
Potenza di taglio									Mt	22830,7																																																																			
Pc	1,43 kW								Pc= Mt n/9549	1427,6																																																																			
Forza di avanzamento																																																																													
F2	2446,2 N																																																																												
P=2 Fc	4892,4 N																																																																												
Potenza di avanzamento																																																																													
vf	0,1314 m/min																																																																												
Pf	0,0107 kW																																																																												
Tempo lavoro																																																																													
tf	0,20 min																																																																												
	12,2 s																																																																												

Esercizio foratura punta metallo duro

Foratura acciaio C40 con punta metallo duro										
Df		16 mm								
Rm		690 N/mm2								
HB		210								
L		20 mm								
e		2 mm								
Punta in metallo duro esecuzione N con angolo 118°										
Punta N 16 UNI 5622:1965										
D punta		16 mm								
β		118 °								
MATERIALE DA FORARE		V _c [m/min]	PUNTE INTEGRALI							
			Avanzamento [mm/giro]							
			Diametro [mm]							
			3	6	8	10	12	14	16	18
acciaio	basso C	110	0,08	0,15	0,20	0,25	0,30	0,33	0,35	0,38
	da costruzione e debolmente legati	100	0,08	0,15	0,20	0,25	0,30	0,33	0,35	0,38
	da utensile	75	0,08	0,12	0,16	0,20	0,25	0,28	0,30	0,35
	temprati	65	0,07	0,10	0,13	0,16	0,20	0,24	0,26	0,30
vc		100 m/min								
f		0,35 mm x interpolazione								
n		1990 giri/min								
Calcolo del Ks										
Materiale			c							
acciaio	basso tenore di C		4,9							
	medio tenore di C		4,7							
	alto tenore di C		4,5							
c		4,7								
Ks		3243 N								
q		1,4 mm2								
Forza di taglio									Braccio forze	
Fc		4540,2 N							b	8
Potenza di taglio									Mt	36322
Pc		7,6 kW							Pc= Mt n/9549	7571
Forza di avanzamento										
F2		3891,7 N								
P=2 Fc		7783,4 N								
Potenza di avanzamento										
vf		0,6967 m/min								
Pf		0,0904 kW								
Tempo lavoro										
tf		0,0385 min								
		2,3 s								

Temperatura di taglio

Nella foratura, la gestione del calore e del tagliente di riporto (BUE) è molto più critica a causa di tre enormi differenze fisiche:

- **Il paradosso della "Velocità Zero" al centro**
Al tornio, il tagliente lavora a una velocità periferica costante. In una punta da trapano o da centro, la formula:
 $v_c = 3.14 D n / 1000$
rappresenta solo la velocità massima sul diametro esterno D.
Man mano che si scende lungo il tagliente verso il centro della punta, il diametro rotazionale diminuisce, fino ad arrivare a zero esatto sul tagliente trasversale (il nocciolo).
Al centro geometrico della punta, il materiale non viene reciso, ma letteralmente schiacciato, snervato ed estruso a forza. Questo genera un attrito spaventoso e un picco di calore localizzato che rende il nocciolo della punta il punto di innesco primario per il tagliente di riporto, specialmente sull'alluminio.
- **L'effetto "Forno" (Intrappolamento termico)**
Nella tornitura esterna, il truciolo (che porta via con sé circa l'80% del calore generato dal taglio) viene proiettato lontano nell'ambiente. Nella foratura, il truciolo rovente è costretto a viaggiare lungo i vani dell'elica, sfregando continuamente contro la parete del foro appena creato. Il calore non si disperde: viene assorbito massicciamente dalla punta stessa e dal pezzo in lavorazione.
- **Compromesso sulle velocità**
A causa di questo intrappolamento termico, nella foratura piena non si possono mantenere le stesse altissime velocità di taglio della finitura al tornio per "sfuggire" al tagliente di riporto. Se si alzano troppo i giri senza un raffreddamento estremo, il truciolo di alluminio raggiunge lo stato pastoso all'interno del foro e si salda irreversibilmente alle eliche della punta (il classico "impastamento" che spezza l'utensile).

Le strategie CNC per abbattere le temperature in foratura

- **L'HSS è eccellente per le macchine leggere:**
Esattamente come visto per la finitura al tornio, le punte in acciaio super rapido (HSS-G o HSS-Co al cobalto) affilate a rasoio garantiscono un taglio pulito a temperature molto più basse rispetto alle punte standard in metallo duro. Sono la scelta d'elezione per forare alluminio su pantografi desktop o macchine con limiti di rigidità.
- **Cicli di scarico (Peck Drilling - G83 / G73):**
Sulle macchine CNC, la temperatura in foratura non si controlla solo con i giri o gli avanzamenti, ma ritraendo la punta. I cicli di foratura profonda con svincolo totale (G83) servono proprio a evacuare i trucioli caldi dal "forno" e permettere al lubrificante (o all'aria) di precipitare sul fondo del foro per raffreddare il nocciolo prima della passata successiva.
- **Refrigerante interno (per il metallo duro):**
L'unico modo per usare il metallo duro ad altissime velocità in foratura senza fondere il materiale è utilizzare punte con fori di lubrificazione passanti. Il refrigerante ad alta pressione viene sparato direttamente dal centro della punta sul fondo del buco, garantendo shock termico e spazzando via il truciolo lungo le eliche.

Velocità di taglio

Poiché calcolare la temperatura esatta è troppo complesso, in officina si utilizzano tabelle empiriche che legano direttamente la v_c alle temperature massime sopportabili dall'utensile e alla prevenzione del tagliente di riporto.

Come accennato nella risposta precedente, la relazione tra temperatura e v_c in foratura segue questo compromesso:

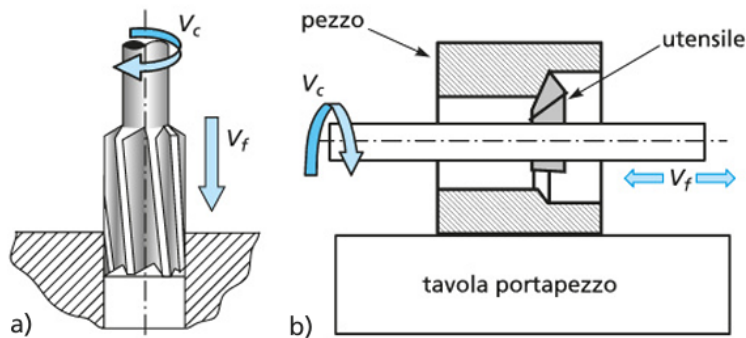
- Se la v_c è troppo bassa, la temperatura generata non ammorbidisce il truciolo, provocando incollaggi (BUE) specialmente sull'alluminio e sugli acciai dolci.
- Se la v_c è troppo alta, a causa dell'assenza di evacuazione termica nel foro cieco, la temperatura schizza verso gli 800-900°C (per l'acciaio), superando il limite di durezza dell'utensile (soprattutto se HSS), bruciandolo.

Per questo motivo, le velocità di taglio consigliate per le punte da trapano v_c sono generalmente inferiori rispetto a quelle usate in tornitura o fresatura esterna per lo stesso materiale.

Ad esempio, per forare un acciaio inox con punte in metallo duro senza refrigerazione interna, si tengono v_c molto conservative (35-45 m/min) per non innescare picchi termici, alzandole (60-80 m/min) solo se si dispone di liquido refrigerante ad alta pressione che forza l'evacuazione del calore.

Alesatura

Con il termine alesatura si intende comunemente una lavorazione interna di superfici cilindriche, ottenute con precedenti lavorazioni di foratura e che devono osservare tolleranze geometriche e di forma ristrette (il termine alesaggio, che indica la misura del diametro del cilindro in un motore, deriva proprio da alesatura).



Alesatura: a) con alesatore; b) con barenolo.

Assume particolare importanza, quindi, una buona durata del filo tagliente e, di conseguenza, i parametri di taglio in grado di garantirla. I soprametalli da asportare in fase di alesatura sono riportati in tabella

diametro del foro (mm)	5-10	10-20	20-40
acciaio-ghisa	0,2	0,25	0,4
bronzo-ottone	0,3	0,4	0,6
alluminio	0,4	0,6	0,8

Parametri di taglio per alesatori in metallo duro

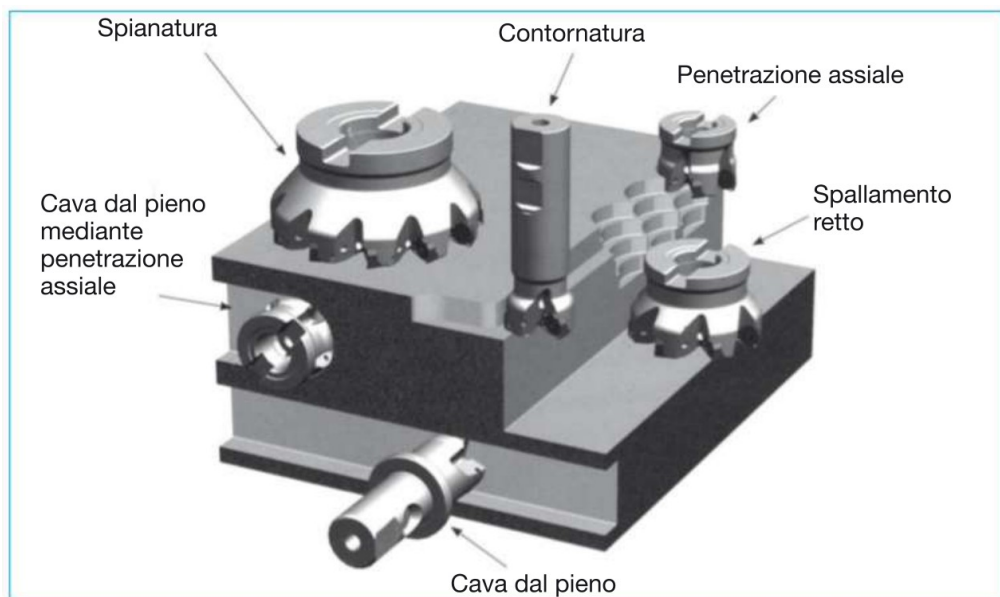
Materiale da lavorare	Velocità di taglio (m/min)	Avanzamento per giro in funzione del diametro (mm)						
		2	5	8	10	12	16	20
acciaio non legato o poco legato	20-25	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
acciaio legato e molto legato	10-15	0,10	0,12	0,15	0,20	0,25	0,25	0,30
acciaio per utensili	8-10	0,08	0,10	0,12	0,15	0,15	0,20	0,30
acciaio temprato	6-8	0,05	0,08	0,10	0,15	0,15	0,20	0,25
acciaio per molle	8-10	0,08	0,10	0,12	0,15	0,15	0,20	0,30
acciaio al Cr-Ni	8-10	0,06	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
acciaio inossidabile	10-15	0,05	0,08	0,10	0,15	0,15	0,20	0,20
acciaio legato, leghe speciali	8-12	0,06	0,10	0,15	0,20	0,20	0,25	0,30
ghisa fusa in conchiglia	6-8	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
ghisa grigia	10-12	0,10	0,15	0,20	0,30	0,35	0,40	0,50
ghisa sferoidale, ghisa malleabile	10-12	0,10	0,15	0,20	0,30	0,35	0,40	0,50
rame	25-35	0,15	0,20	0,25	0,25	0,30	0,30	0,40
bronzo	25-30	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
leghe alluminio fino 11% di Si	25-35	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
leghe alluminio oltre 11% di Si	20-30	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40
ottone e zinco	30-35	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
titanio e leghe di titanio	10-15	0,05	0,08	0,10	0,15	0,15	0,20	0,20
leghe di magnesio	35-40	0,10	0,15	0,20	0,20	0,30	0,30	0,35

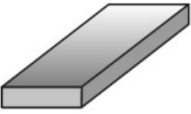
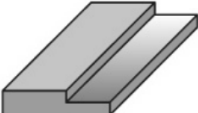
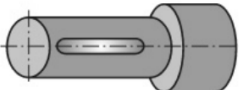
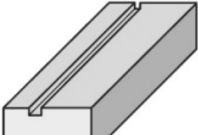
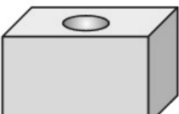
FRESATURA

La fresatura è un'operazione che consiste nell'asportazione di truciolo mediante un movimento coordinato tra un utensile ruotante e il pezzo (bloccato su una tavola mobile), che avanza verso di esso.

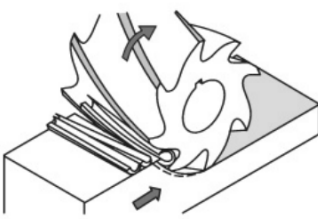
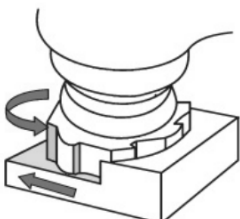
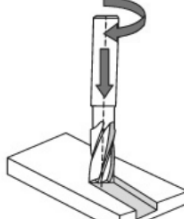
L'utensile utilizzato per queste operazioni si chiama fresa ed è, in genere, uno strumento multitagliente, nel quale ogni dente asporta una certa quantità di materiale.

Il moto di taglio, circolare e uniforme, è posseduto dall'utensile; il moto di alimentazione, rettilineo e uniforme, è posseduto dal pezzo. Nelle moderne macchine la fresatura viene effettuata anche facendo avanzare l'utensile verso il pezzo, in tutte le direzioni.

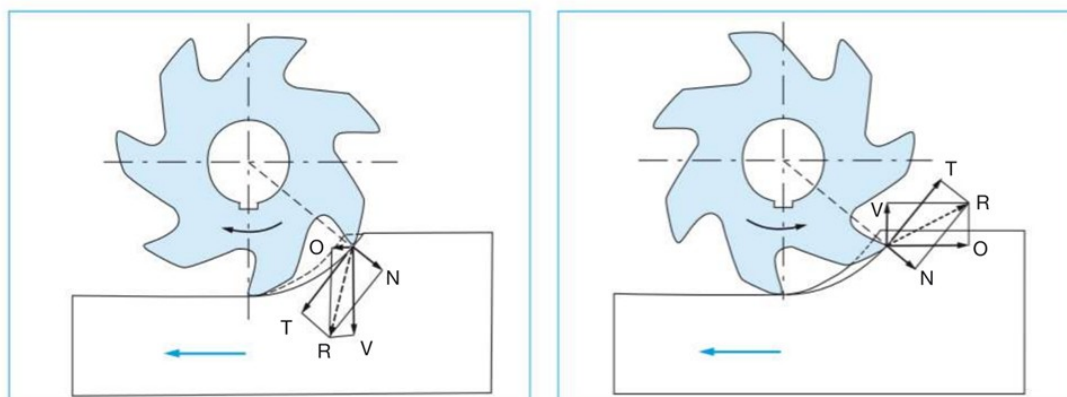


	Spianatura: lavorazione per tutta la larghezza di una superficie piana al fine di variane la dimensione e migliorarne la rugosità.
	Esecuzione di spallamenti retti: lavorazione di una parte di una superficie piana con formazione di un gradino ad angolo retto a superficie lavorata.
	Esecuzione di cave: procedimento attraverso il quale si realizzano cave per l'alloggiamento di organi per la trasmissione del moto, per esempio linguette.
	Contornatura: lavorazione lungo il contorno di un pezzo, per variane le dimensioni e migliorarne la rugosità.
	Scanalatura: lavorazione che ha lo scopo di ottenere dei solchi lungo un pezzo.
	Alesatura di fori: lavorazione di finitura di fori, che consente di ottenere grande precisione dimensionale e bassa rugosità.

Le modalità principali di fresatura sono le seguenti

 <p>Fresatura periferica Utilizza i taglienti della fresa posizionati sulla periferia dell'utensile; quest'ultimo ruota attorno a un asse parallelo all'avanzamento tangenziale.</p>	 <p>Fresatura frontale Utilizza principalmente i taglienti periferici della fresa, mentre quelli frontali servono a rifinire il piano; l'asse di rotazione della fresa è perpendicolare alla direzione dell'avanzamento.</p>	 <p>Fresatura assiale Realizzata con alcuni tipi di frese (frese a candela), consiste nell'eseguire operazioni di foratura utilizzando i taglienti posizionati nella parte frontale; la fresa, che avanza assialmente deve avere taglienti fino al centro dell'utensile.</p>
--	--	---

La fresatura periferica può essere in concordanza o discordanza.



Fresatura in opposizione

il pezzo avanza in senso contrario alla rotazione della fresa.

La risultante R può essere scomposta nella forza orizzontale F_o e in quella verticale F_v .

La forza F_o , diretta in senso contrario al moto di avanzamento, assicura che in qualsiasi condizione di lavoro, e anche in presenza di giochi tra vite e madrevite, la chiocciola sia sempre appoggiata sui filetti della vite che comanda la traslazione del pezzo.

Gli svantaggi di questo sistema sono:

- il distacco del truciolo poco razionale; infatti, all'inizio il dente scivola sul piano da fresare senza fare presa sul metallo, provocando l'incrudimento del materiale e l'aumento della temperatura del tagliente;
- lo sforzo di strappamento va crescendo da zero al valore massimo, per poi annullarsi di colpo, facendo nascere vibrazioni nocive per la finitura superficiale;
- la forza verticale F_v , rivolta verso l'alto, tende a sollevare il pezzo e quindi obbliga a un accurato staffaggio.

Fresatura in concordanza

Il pezzo avanza in senso concorde alla rotazione della fresa.

Anche in questo caso scomponiamo la risultante R nella forza orizzontale F_o e in quella verticale F_v .

La forza F_v è diretta verso il basso, comprimendo il pezzo contro la tavola, il che evita complicati staffaggi.

Inoltre, il taglio avviene in maniera più razionale: il dente, infatti, intacca subito il metallo e inizia l'azione tagliente senza strisciare sulla superficie del pezzo; di conseguenza, viene agevolata l'asportazione del truciolo, si riduce il riscaldamento degli spigoli, è minore la potenza assorbita e le superfici presentano una migliore finitura. Si possono inoltre usare velocità di taglio più elevate.

Lo svantaggio di questo metodo consiste nel fatto che se l'accoppiamento vite-chiocciola possiede un certo gioco, può succedere che la fresa trascini il pezzo sotto di sé, fino ad annullare il gioco; all'inizio del taglio si ha così un brusco spostamento della tavola e il dente, costretto ad asportare una quantità eccessiva di materiale, può rompersi con facilità.

Ne consegue che questo procedimento richiede l'uso di fresatrici dotate di un dispositivo di ripresa automatica dei giochi.

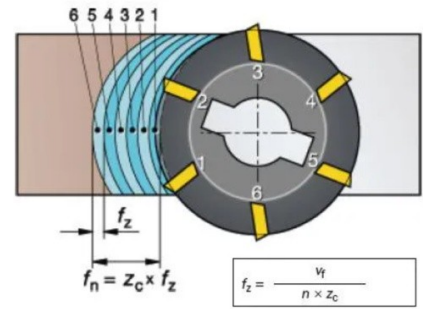
Tale dispositivo è costituito da una madrevite separata in due parti e mantenuta a contatto con la vite mediante sistemi idraulici.

Fresatura frontale

Generalmente una fresa è dotata di un certo numero di taglienti Z_n .

In una fresa distinguiamo:

- Z_n = numero totale di taglienti sull'utensile
- Z_c = numero di denti/taglienti effettivamente impegnati nel taglio (cioè quelli "in presa" durante la lavorazione)



In fresatura l'avanzamento f viene espresso in due modi diversi tramite f_z e f_n sono due modi diversi di esprimere l'avanzamento:

- **f_z = avanzamento per dente (mm):**
indica quanto avanza l'utensile per ogni dente che entra in taglio
- **f_n = avanzamento per giro (mm/giro):**
indica quanto avanza l'utensile per ogni rivoluzione del mandrino

Quindi f_n (l'avanzamento per giro) è legato a f_z tramite il numero di denti effettivi (Z_c), cioè in pratica:

$$f_n = f_z Z_c \quad (\text{mm})$$

La velocità di avanzamento V_f (mm/min)

Conosciuta anche come avanzamento tavola, avanzamento macchina o velocità di avanzamento.

Si tratta dell'avanzamento dell'utensile in relazione al pezzo, in distanza per unità di tempo, legato all'avanzamento per dente e al numero di denti della fresa. Il numero di denti disponibili nell'utensile (Z_n) varia notevolmente e viene utilizzato per determinare l'avanzamento tavola mentre il numero effettivo di denti (Z_c) è il numero di denti effettivamente impegnato nel taglio.

L'avanzamento per giro (f) in mm/giro è il valore utilizzato specificamente per i calcoli dell'avanzamento e spesso per determinare la capacità di finitura di una fresa.

$$V_f = f_z Z_c n \quad \text{mm/min} \quad \text{con } Z_c \text{ numero di taglienti in lavorazione e } f_z \text{ avanzamento per dente}$$

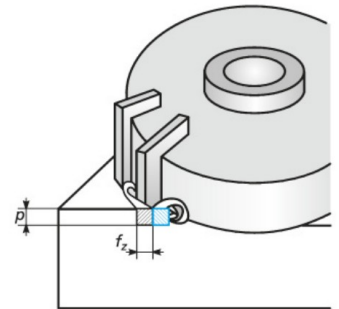
Il numero di giri del mandrino:

$$n = 1000 V_c / 3.14 D \quad (\text{giri/min})$$

con V_c velocità di taglio m/min consigliata per il tipo di lavorazione

La sezione di truciolo asportato per ogni dente vale:

$$q_z = p f_z \quad (\text{mm}^2) \quad \text{con } f_z \text{ avanzamento per dente in mm}$$



NOTA:

In una fresa CNC normalmente imposti in macchina l'avanzamento tavola v_f (mm/min).

Si calcola fissato f_z (mm/dente), perché è quello legato allo spessore truciolo.

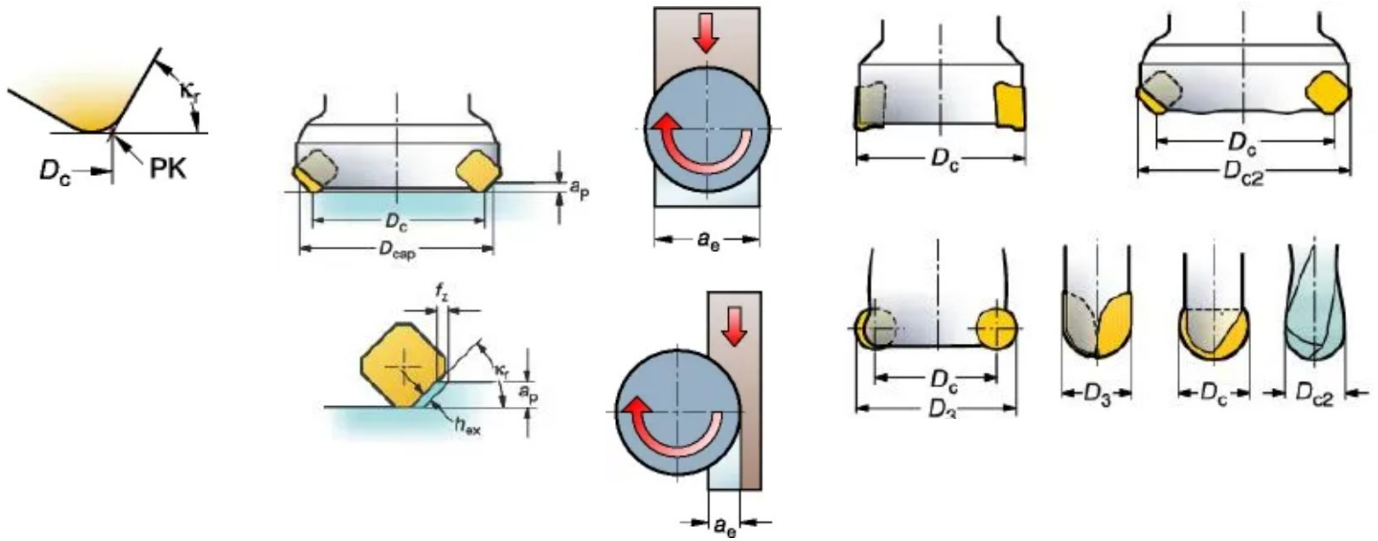
Diametro fresa D_c (mm)

Il diametro della fresa (D_c) viene misurato sul punto (PK) in cui il tagliente principale incontra il tratto piano parallelo.

Il diametro più importante da considerare è (D_{cap}), il diametro di taglio effettivo alla profondità di taglio effettiva (p) utilizzato per il calcolo della velocità di taglio effettiva. D_3 è il diametro più grande dell'inserto, per alcune frese è uguale a D_c .

Angolo di registrazione (κ_r) (gradi)

L'angolo principale del tagliente (κ_r) della fresa è il fattore dominante, in quanto incide sulla direzione della forza di taglio e sullo spessore del truciolo.



ERGAL (7075-T6) vs ACCIAIO EQUIVALENTE

La scelta tra l'alluminio aeronautico Ergal (7075-T6 → indica che la lega ha subito un trattamento di solubilizzazione, tempra e invecchiamento artificiale per massimizzare le sue prestazioni) e un acciaio strutturale o da bonifica equivalente per prestazioni meccaniche (come il C45 o il 39NiCrMo3) si basa sul bilanciamento tra il costo della materia prima e l'efficienza del ciclo produttivo complessivo.



Caratteristiche Principali

- Elemento di lega principale: Zinco (fino al 6%).
- Rapporto resistenza/peso: Eccezionalmente elevato.
- Lavorabilità: Ottima alle macchine utensili (CNC).
- Resistenza alla corrosione: Moderata (inferiore rispetto alle serie 6000 o 5000), spesso richiede anodizzazione.
- Saldabilità: Scarsa con i metodi tradizionali (richiede accorgimenti speciali).

Settori di Applicazione

- Aerospaziale: Strutture di velivoli, parti di satelliti e componenti sottoposti a forti stress.
- Automotive e Motorsport: Componenti per moto da corsa, parti di telai e bielle ad alte prestazioni.
- Sport e Outdoor: Telai di biciclette di alta gamma, moschettoni da arrampicata, componenti per armi da fuoco.
- Meccanica di precisione: Attrezzature, stampi per materie plastiche e dime di montaggio.

Proprietà Meccanica / Fisica	Valore Tipico (Ergal 7075-T6)
Densità	2,81 g/cm ³
Carico di rottura a trazione (R _m)	570 MPa
Limite di snervamento (R _{p0,2})	500 MPa
Allungamento a rottura (A ₅)	11%
Durezza Brinell (HBW)	150
Modulo di elasticità (E)	71.700 MPa

ANALISI DEI COSTI DIRETTI E INDIRETTI

Costo della Materia Prima (al chilogrammo)

L'Ergal ha un prezzo di mercato sensibilmente superiore all'acciaio comune. Il costo al kg dell'Ergal oscilla tra i 7 e gli 11 EUR, mentre l'acciaio da bonifica si attesta tra i 2 e i 4 EUR.

L'Ergal risulta quindi circa tre volte più costoso se acquistato esclusivamente a peso.

Il Fattore Correttivo del Volume (Densità)

L'Ergal ha una densità di 2,81 g/cm³, pari a circa un terzo di quella dell'acciaio (7,85 g/cm³). Di conseguenza, a parità di volume (stesse dimensioni del blocco grezzo di partenza), il peso dell'alluminio si riduce di due terzi. Questo compensa quasi totalmente il divario di prezzo iniziale sul materiale grezzo.

Costi e Tempi di Lavorazione (Fresatura e Tornitura CNC)

L'Ergal offre un'ottima lavorabilità alle macchine utensili. Permette velocità di taglio e di avanzamento molto elevate, riducendo i tempi di lavorazione sui centri di lavoro CNC dal 40% al 60% rispetto all'acciaio. L'usura degli utensili è minima, abbattendo i costi di consumo dei taglienti.

Trattamenti Superficiali e Protettivi

L'Ergal è sensibile alla corrosione ambientale rispetto ad altre leghe di alluminio e richiede quasi sempre un processo di anodizzazione (estetica o dura), che comporta un costo fisso aggiuntivo per lotto. L'acciaio standard richiede trattamenti come zincatura, brunitura o verniciatura per prevenire l'ossidazione, oppure trattamenti termici mirati per aumentarne la durezza superficiale.

SINTESI APPLICATIVA

Conviene l'Ergal (7075-T6) quando:

- Il componente finale richiede ampie sessioni di svuotamento dal pieno (alta asportazione di truciolo).
- Il risparmio di peso è un requisito fondamentale del progetto (es. motorsport, aeronautica, ciclismo).
- Si desidera ridurre il tempo di occupazione della macchina CNC.

Conviene l'Acciaio Equivalente quando:

- La lavorazione meccanica è ridotta al minimo (es. piastre semplici o profilati strutturali).
- Il componente deve operare ad alte temperature senza perdere le proprietà meccaniche.
- È richiesta una durezza superficiale elevatissima per resistere a usura da strisciamento continuo.

TABELLA COMPARATIVA DEI FATTORI ECONOMICI

Parametro	Acciaio Equivalente (es. C45)	Ergal (7075-T6)	Impatto sul Costo del Progetto
Prezzo indicativo al kg	2,00 EUR - 4,00 EUR	7,00 EUR - 11,00 EUR	L'Ergal ha un costo iniziale superiore a parità di peso.
Densità (Peso specifico)	~ 7,85 g/cm ³	~ 2,81 g/cm ³	L'Ergal pesa 1/3; a parità di volume la spesa iniziale si livella.
Velocità di lavorazione CNC	Ridotta (Avanzamenti lenti)	Elevatissima (Alte asportazioni)	L'Ergal abbate sensibilmente il costo orario del centro CNC.
Usura utensili e ricambi	Medio-alta (Sostituzioni frequenti)	Molto bassa (Lunga durata utensili)	Minori costi vivi di officina per la lavorazione dell'Ergal.
Finitura e protezione richiesti	Zincatura, brunitura o verniciatura	Anodizzazione (Tecnica o decorativa)	L'anodizzazione dell'Ergal incide soprattutto sui piccoli lotti.