

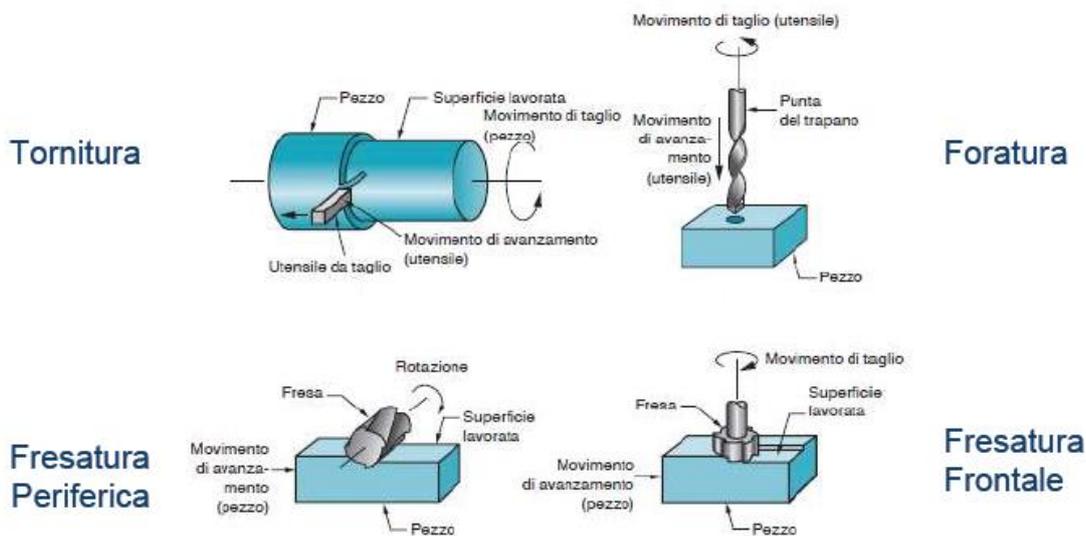
TEORIA ASPORTAZIONE DI TRUCIOLO: TAGLIO LIBERO ORTOGONALE

Introduzione

Il processo più semplice che si può realizzare mediante asportazione di truciolo prende il nome di taglio libero ortogonale; questo processo può infatti essere facilmente descritto sia da un punto di vista cinematico che dinamico. Studieremo dunque per prima cosa tale processo che, nonostante la sua semplicità, permetterà di capire il meccanismo elementare di formazione del truciolo. Ricordiamo però che tale taglio è poco usato nell'ambito industriale, al contrario invece di altre lavorazioni che risultano essere più complesse ma altrettanto diffuse a livello industriale, quali, ad esempio:

- Tornitura = in questa lavorazione industriale il taglio avviene mettendo in rotazione il pezzo e facendo avanzare l'utensile tramite un moto rettilineo. Sarà dunque necessario combinare i due moti per avere l'effetto di taglio.
- Foratura = l'utensile viene messo in rotazione e viene fatto a avanzare. Questa azione rotazionale di taglio è assiale mentre l'azione di avanzamento permette di realizzare un foro
- Fresatura = processo che si applica a pezzi prismatici, il moto di taglio viene dato all'utensile che viene messo in rotazione e il moto di avanzamento può essere dato o all'utensile o al pezzo stesso. Se l'asse dell'utensile è parallelo alla superficie del pezzo di lavorazione si parla di fresatura periferica, se invece l'asse è perpendicolare alla generatrice della superficie del pezzo di lavorazione si parla di fresatura frontale
- Rettifica

Durante queste lavorazioni sono dunque fondamentali gli utensili che potranno essere monotagliante e a taglienti multipli.



Taglio libero ortogonale

Ipotesi

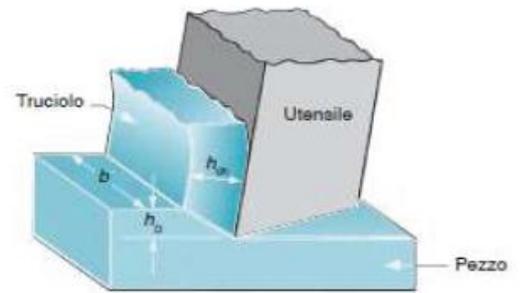
Come già detto il taglio libero ortogonale è il processo più semplice che si può realizzare mediante asportazione di truciolo. Con l'espressione "ortogonale" si sottolinea il fatto che la direzione del moto di taglio risulta essere perpendicolare al tagliente cioè lo spigolo dell'utensile che esercita la maggior parte dell'azione di taglio. Prima di descrivere tale meccanismo e comprendere come dal sovrametallo si passi al truciolo occorre effettuare delle ipotesi:

- Il tagliente deve essere rettilineo e ortogonale alla direzione del taglio
- L'utensile deve essere più largo del pezzo così da evitare di vincolare lateralmente il flusso del truciolo

- Lo spessore del truciolo indeformato deve essere minore della larghezza del pezzo. In altre parole l'altezza del materiale che deve essere asportato deve essere minore della larghezza del pezzo stesso:

$$h_D \ll b$$

Con l'espressione "indeformato" si indica la situazione prima dell'azione dell'utensile; tale valore è un dato perché rappresenta la quantità di sovrametallo da asportare. È importante distinguere ciò che accade prima dal dopo perché l'altezza del truciolo indeformato è sempre minore dell'altezza del truciolo deformato. Quindi indeformato è prima dell'azione dell'utensile mentre deformato è dopo l'azione dell'azione utensile.



Se si verificano queste tre ipotesi allora si può e si sta parlando di taglio libero ortogonale. In questo tipo di taglio tutte le grandezze cinematiche, cioè le velocità, e dinamiche, cioè le forze, giacciono su un piano (verticale se l'azione è ortogonale).

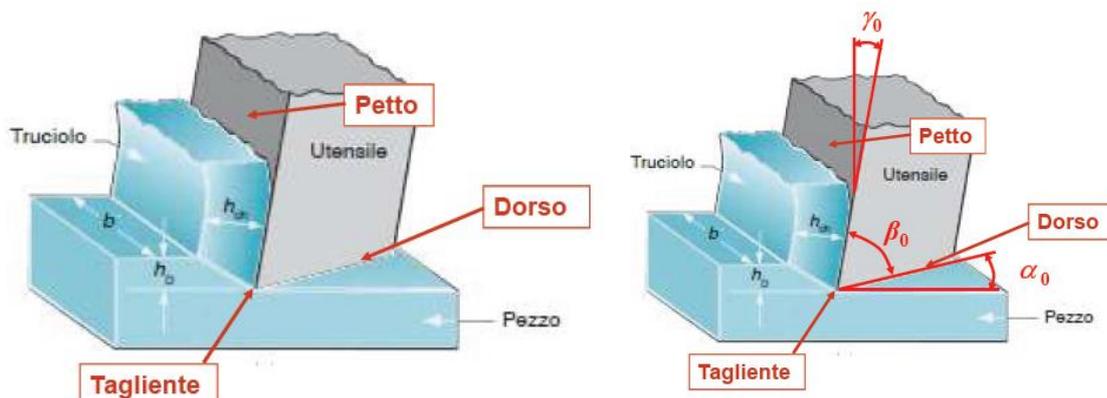
Utensile e sua terminologia

Definiamo ora la terminologia relativa all'utensile:

- Petto = superficie su cui fluisce il truciolo cioè la quota parte di pezzo che viene asportata a causa dell'effetto dell'utensile stesso
- Dorso = superficie dell'utensile che si affaccia sulla superficie del pezzo appena lavorata. Generalmente il dorso è inclinato rispetto alla superficie di un angolo α_0 per evitare lo strisciamento e quindi ridurre al minimo l'attrito. Riducendo lo strisciamento si limitano anche i costi energetici e si limita il danno che l'utensile potrebbe provocare rovinando la superficie del pezzo. Viceversa è importante non esagerare con la dimensione dell'angolo che, se risulta troppo ampio, potrebbe portare a un indebolimento dell'utensile stesso. L'angolo deve dunque essere tale da mantenere la robustezza dell'utensile e da evitare lo strisciamento del dorso sulla superficie del pezzo in lavorazione.
- Il tagliente = segmento ottenibile dall'intersezione di tra il piano che forma il petto e quello del dorso

Come già accennato l'utensile deve avere un certo angolo rispetto alla superficie del pezzo che sta lavorando, ma non solo; sono infatti presenti altri angoli importanti. Gli angoli dell'utensile sono dunque:

- Angolo di spoglia superiore γ_0 = angolo tra il petto dell'utensile e la normale alla velocità di taglio. Viene convenzionalmente definito positivo se inclinato di un angolo inferiore a 90° . Se invece è maggiore di 90° viene definito in modo negativo. Generalmente questo angolo deve avere un compreso tra: $-15^\circ < \gamma_0 < 30^\circ$
- Angolo di spoglia inferiore α_0 = angolo tra il dorso dell'utensile e la direzione della velocità di taglio. Maggiore è questo angolo inferiore sarà lo strisciamento ma elevata sarà la sollecitazione dell'utensile. Generalmente questo angolo deve avere un compreso tra: $2^\circ < \alpha_0 < 15^\circ$
- Angolo solido β_0 = angolo che sommato all'angolo di spoglia inferiore e quello superiore forma 90° : $\alpha_0 + \gamma_0 + \beta_0 = 90^\circ$



Parametri della lavorazione: terminologia

Analizziamo ora i parametri che determinano le caratteristiche della lavorazione:

- Spessore del truciolo indeformato o spessore di taglio h_D = altezza del sovrametallo da asportare calcolato prima della lavorazione
- Spessore del truciolo deformato h_{ch} = spessore del truciolo dopo la deformazione
- Larghezza del taglio b
- Sezione del truciolo indeformato A_D = sezione nominale di truciolo che si asporta. La sezione del truciolo indeformato è definita in direzione perpendicolare alla direzione della velocità di taglio:

$$A_D = b * h_D$$

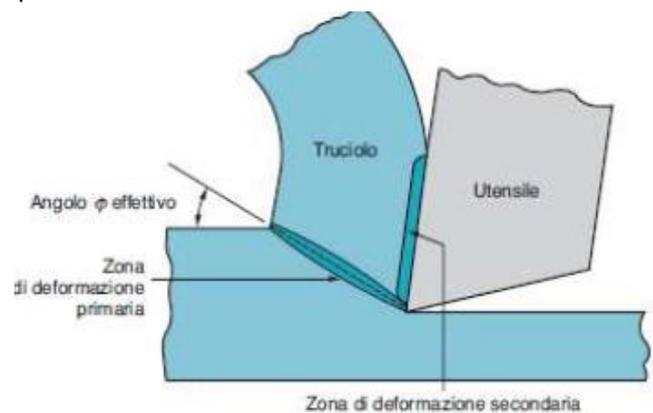
- Velocità di taglio v_c = vettore velocità relativo tra utensile e pezzo che indica la direzione del moto di taglio. Si misura in metri al minuto
- Portata o tasso di asportazione del materiale Q = indica quanto materiale viene asportato nell'unità di tempo e si calcola moltiplicando la velocità di taglio per la sezione del truciolo:

$$Q = A_D * v_c$$

Il moto di taglio è rettilineo orizzontale e continuo mentre il moto di avanzamento è un moto verticale a intermittenza che consente di avere sempre del nuovo materiale da asportare durante la lavorazione.

Prima di spiegare nello specifico come avviene la formazione di truciolo introduciamo altri tre concetti che definiscono le zone principali di deformazione del pezzo. Queste zone sono:

1. Zona di deformazione primaria = in questa zona il sovrametallo viene deformato per effetto di taglio
2. Zona di deformazione secondaria = zona all'interfaccia tra truciolo e petto dell'utensile. In questa parte dunque il truciolo viene deformato poiché a contatto con il petto dell'utensile. Per strisciante si genera calore che viene dissipato sotto forma di energia.
3. Zona di deformazione terziaria = può avvenire strisciamento tra il dorso dell'utensile e la superficie del pezzo già lavorata. Anche in questo caso si avrebbe una deformazione localizzata e una quota parte di energia dissipata.



Modello a piano di scorrimento

Lo studio che affronteremo della formazione del truciolo si baserà su un modello noto come modello a piano di scorrimento e non a zona di deformazione: tale modello, che risulta essere uno dei più semplici possibili, consiste nel considerare la deformazione come avvenente su un singolo piano e non su una zona estesa. Nello specifico non analizzeremo la deformazione della zona primaria ma la deformazione del piano passante per tale zona. Lo svantaggio di descrivere un modello di deformazione come un modello a piano e non a zone è che si considera implicitamente un fenomeno istantaneo. Tale modello è dunque ideale; anche perché il materiale subirebbe una variazione di velocità istantanea e quindi una variazione finita che nella realtà non è possibile.

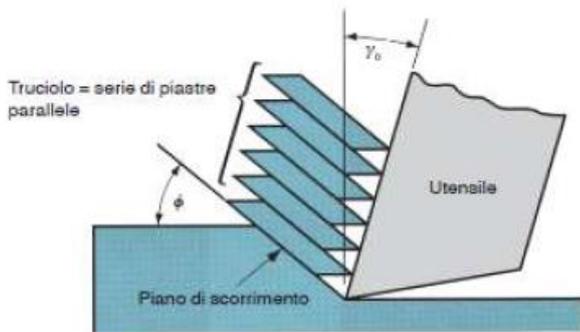
Formazione del truciolo

L'utensile sollecita il materiale davanti a sé finché quest'ultimo si deforma plasticamente nella zona primaria: i grani di questa zona si allungano e si dispongono come in figura. La deformazione è quindi la conseguenza del fatto che lo sforzo di taglio supera la resistenza a taglio del materiale stesso generando così lo scorrimento del piano all'interno del pezzo: ciò implica la trasformazione del sovrametallo in truciolo. Nella zona cerchiata gli sforzi normali saranno talmente elevati da comportare una compenetrazione delle due superfici che sono

fortemente a contatto tra loro. Si creano così delle micro saldature all'interfaccia che sono estremamente resistenti. In questa zona il modello di attrito di Coulomb non funziona perché la forza normale è estremamente elevata e quindi l'area a contatto è molto più simile al valore nominale:

ATTRITO DI COULOMB	NO ATTRITO COULOMB
$A_c \ll A$	$A_c \cong A$

Dove A_c è l'area a contatto mentre A è quella nominale. Dunque la forza di contatto assume un valore estremamente elevato da comportare la compenetrazione delle superfici; di conseguenza l'area di contatto sarà simile all'area nominale. In questo caso non vale l'attrito di Coulomb e quindi gli sforzi non generano strisciamento ma scorrimento. La deformazione è istantaneamente concentrata in un piano e dipende dalle τ .



Allontanandosi dal tagliente le forze di contatto normali diminuiscono e quindi diminuiranno anche gli sforzi σ . Ciò fa sì che l'area di contatto delle microsaldature diminuisca man mano che ci si allontana dal tagliente fino a quando l'area di contatto sarà molto minore a quella nominale; in questa situazione si ritorna al modello di strisciamento coulombiano. Ci sarà dunque una porzione dove vi è adesione e una dove invece c'è strisciamento. Se osservassimo la superficie del truciolo potremmo notare in modo evidente la porzione di adesione e quella di strisciamento. **Nel grafico vengono rappresentati gli sforzi normali e quelli tangenziali in funzione dei punti di contatto tra pezzo ed utensile. Nell'ipotesi di materiale completamente plastico ci sono alcune zone costanti.**

Tipologie di truciolo

Analizziamo ora le tipologie di forme del truciolo:

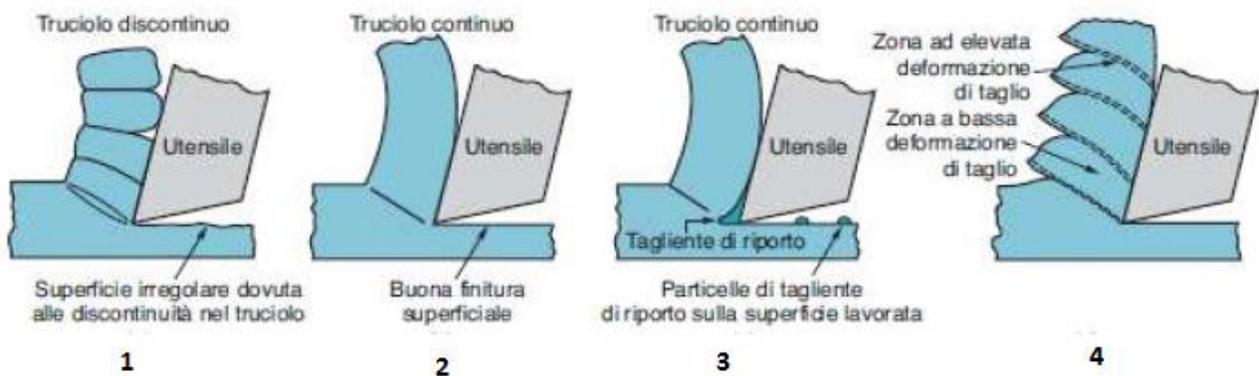
1. Discontinuo = durante la lavorazione il truciolo viene rotto e si distacca in piccoli frammenti che si allontanano gli uni dagli altri. Questo tipo di truciolo è tipico di materiali fragili. È una condizione generalmente desiderata perché permette la facile evacuazione del truciolo dalla zona di taglio
2. Continuo = caratteristica tipica dei materiali duttili, il truciolo è continuo e si avvolge su se stesso durante la lavorazione. Occorre dunque prevedere un sistema per evacuarlo altrimenti si potrebbe avere una problematica di:
 - Avvolgimento del truciolo sulla macchina stessa che ne danneggerebbe il funzionamento
 - Avvolgimento del truciolo sulla superficie lavorata con conseguente problemi indesiderati.
 - **Avvolgimento su ...**

È una situazione indesiderata che si cerca di evitare mediante l'uso di dispositivi rompi truciolo.

3. Con tagliente di riporto (build up edge) = tale truciolo modifica la geometria nominale dell'utensile a causa del riporto, deposizione del materiale sull'utensile stesso. Avviene a basse velocità di taglio, 50/60 metri al minuto poiché a causa di questa bassa velocità e a causa dell'effetto dell'adesione, le microsaldature non riescono a rompersi e quindi il

materiale a contatto con l'utensile si raffredda e scambia calore con l'utensile. Il materiale diventa più difficile da deformare, contemporaneamente le basse velocità di taglio fanno sì che non si riesca ad evacuare il truciolo quindi si crea una pila di materiale incrudito sopra al tagliente. Si genera questo materiale che rimane incollato sulla superficie del tagliente e che aumenta sempre di più. Ciò genera una serie di problemi quali ad esempio la modifica della geometria dell'utensile, infatti l'angolo superiore di spoglia tende ad aumentare nel tempo

4. Ondulato o segmentato = lo spessore del truciolo deformato non è costante a causa della variazione di resistenza a deformazione molto brusca. Questo truciolo è tipico del titanio, materiale che varia ampiamente la sua resistenza a deformazione in funzione della temperatura. Le zone a bassa deformazione di taglio sono caratterizzate da deformazioni più marcate mentre le zone ad elevate deformazione di taglio sono caratterizzata da deformazioni meno marcate.



Grandezze dinamiche legate al taglio libero ortogonale

È ora importante comprendere la relazione tra le forze e gli sforzi che comportano la formazione di truciolo. Comprendere le forze che agiscono grazie all'utensile sul pezzo permette anche di comprendere che tipo di truciolo si formerà. Tra l'utensile e il pezzo si sviluppa una forza risultante R che può essere scomposta secondo tre direzioni significative cioè lungo il petto, il piano di scorrimento e la direzione di taglio. Queste forze non sono note a priori ma possono essere misurate o previste con modelli matematici.

Analizziamo ora matematicamente le forze:

$$F_{\gamma} = R \sin \beta \quad \text{è // al petto}$$

$$F_{\gamma n} = R \cos \beta \quad \text{è } \perp \text{ al petto}$$

$$F_c = R \cos(\beta - \gamma_0) \quad \text{è // alla velocità di taglio} \quad \rightarrow \quad \text{stimabile attraverso una cella di carico}$$

$$F_f = R \sin(\beta - \gamma_0) \quad \text{è // alla direzione di avanzamento} \quad \rightarrow \quad \text{stimabile attraverso una cella di carico}$$

$$F_{sh} = R \cos(\phi + \beta - \gamma_0) \quad \text{è // al piano di scorrimento}$$

$$F_{shn} = R \sin(\phi + \beta - \gamma_0) \quad \text{è } \perp \text{ al piano di scorrimento}$$

Conoscendo F_c , F_f e γ_0 si può stimare anche la risultante delle forze mediante il teorema di Pitagora. Sottolineiamo che F_c e F_f sono solo stimate, non si conosce il vero valore della misura a causa di fattori d'influenza come il rumore; tutte le grandezze stimate e non effettive si indicano con una ^:

$$F_{\gamma} = \widehat{F}_f \cos \gamma_0 + \widehat{F}_c \sin \gamma_0 \quad \rightarrow \quad \widehat{F}_{\gamma}$$

$$F_{\gamma n} = \widehat{F}_c \cos \gamma_0 - \widehat{F}_f \sin \gamma_0 \quad \rightarrow \quad \widehat{F}_{\gamma n}$$

$$\widehat{F}_{\gamma} = \widehat{R} \sin \widehat{\beta} \quad \rightarrow \quad \widehat{\beta}$$

$$\widehat{F}_{\gamma n} = \widehat{R} \cos \widehat{\beta} \quad \rightarrow \quad \widehat{\beta}$$

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

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

$$AB = \frac{h_D}{\sin \phi}$$

$$A_{sh} = AB * b = \frac{h_D b}{\sin \phi}$$

$$F_c = R \cos(\beta - \gamma_0) \quad \rightarrow \quad R = \frac{F_c}{\cos(\beta - \gamma_0)}$$

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

Cerchiamo ora di capire come trovare e ricavare l'angolo ϕ che è l'unica incognita nell'equazione sopra scritta. Esistono tre modelli diversi per trovarlo:

1. Modello di Pijspanen = è un modello che si basa sul principio del piano di scorrimento e non zone di scorrimento. Secondo questo modello l'azione dell'utensile spinge degli elementini di materiali rigido secondo la direttrice del piano di scorrimento. Secondo quest'idea il truciolo si forma per spostamento di elementi di materiale che scorrono lungo il piano di scorrimento. Il truciolo potrebbe dunque essere assimilato a una serie di piastre parallele. È un modello semplificato ma che può essere osservato in alcuni trucioli. Grazie a questa intuizione calcola la deformazione angolare di questi elementini. Per applicare tale modello occorre effettuare una serie di ipotesi:

- Modello di formazione del truciolo a piano di scorrimento: non presuppone l'analisi di una zona bensì di un piano
- Truciolo fluente cioè senza discontinuità. Quindi materiale in lavorazione omogeneo ed isotropo
- Larghezza del truciolo inalterata prima e dopo la sua deformazione dell'utensile
- Assenza di tagliente di riporto
- Truciolo non incrudito per effetto della deformazione plastica quindi materiale plastico nelle deformazioni di taglio: anche questa non è un'ipotesi restrittiva poiché si può presupporre che il materiale a comportamento elastico aumentando la temperatura
- Deformazione è quindi lo scorrimento di materiale di un pezzo del truciolo inizia quando il τ_{max} è pari a τ_{lim} di scorrimento del materiale (che è costante)

Le ipotesi sino ad ora fatte non sono troppo vincolanti, elenchiamo ora le ultime due ipotesi che risultano essere decisamente vincolanti:

- Condizioni di taglio tali da impedire la formazione del BUE
- Utensile perfettamente affilato quindi assenza di usura e assenza di strisciamento sulla superficie lavorata (no strisciamento tra il dorso e il pezzo). Ipotesi vera solo quando si utilizza un utensile nuovo, ricordiamo che la vita media di un utensile è di circa un'ora di lavoro
- Assenza di attrito tra il petto dell'utensile e il truciolo stesso. Anche questa ipotesi è irrealistica. Ipotesi che non ci sia dispersione di calore causata da questo attrito e ignora tutto ciò che accade durante lo strisciamento.

Nelle ipotesi sopra citate secondo tale modello l'angolo ϕ assume un valore da minimizzare la deformazione angolare dunque si calcolano le deformazioni, e si impone la derivata di questa tangente pari a 0:

$$AC = AD + DC$$

$$AD = AB \cos \phi$$

$$BD = AB \sin \phi$$

$$AD = BD \cot \phi$$

$$DC = BC \sin(\phi - \gamma_0)$$

$$BD = BC \cos(\phi - \gamma_0)$$

$$DC = BD \tan(\phi - \gamma_0)$$

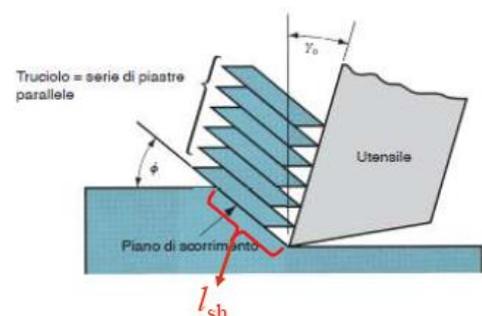
$$\gamma_s = \frac{AC}{BD} = \frac{BD \cot \phi + BD \tan(\phi - \gamma_0)}{BD} = \cot \phi + \tan(\phi - \gamma_0)$$

$$\frac{d\gamma_s}{d\phi} = 0 \rightarrow \phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma_0}{2}$$

2. Modello del fattore di ricalcamento = si ricava l'angolo a partire dal fattore di ricalcamento cioè una misura dello stato di deformazione del truciolo:

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

$$h_{ch} > h_D \rightarrow r_c < 1$$



Tale fattore può essere ricavato sperimentalmente attraverso misure di lunghezza, sfruttando la costante del volume e della larghezza) oppure attraverso misure di massa del truciolo:

$$h_D b_D l_D = h_{ch} b_{ch} l_{ch} \rightarrow r_c = \frac{h_D}{h_{ch}} = \frac{b_{ch} l_{ch}}{b_D l_D} = \frac{l_{ch}}{l_D} \quad b_D = b_{ch} = b \quad \text{misure di lunghezza}$$

$$\rho h_D b_D l_D = \rho h_{ch} b_{ch} l_{ch} \rightarrow r_c = \frac{h_D}{h_{ch}} = \frac{\rho b_{ch} l_{ch}}{\rho b_D l_D} = \frac{\rho b_{ch} l_{ch}}{\rho b_D l_D} * \frac{h_{ch}}{h_{ch}} = \frac{M}{\rho b_D l_D h_{ch}} \quad \text{misure di massa}$$

Nota il fattore di ricalcamento si può ottenere il valore dell'angolo di scorrimento come segue:

$$r_c = \frac{h_D}{h_{ch}} = \frac{l_{sh} \sin \phi}{l_{sh} \cos(\phi - \gamma_0)}$$

$$\tan \phi = \frac{r_c \cos \gamma_0}{1 - r_c \sin \gamma_0}$$

3. Modello di Ernest Marchant = tale modello ha come obiettivo rimuovere l'ipotesi di assenza di attrito del modello di Pijspanen. Cerca dunque di basarsi su ipotesi più realistiche e quindi di fatto considera le stesse ipotesi non restrittive del primo modello dunque accetta l'attrito. Si basa sull'analisi dell'energia di deformazione e non sulla deformazione angolare. Secondo questo modello l'angolo minimizza l'energia dell'effetto di taglio:

$$E = \tau_{sh} A_{sh} * AC$$

$$\frac{dE}{d\phi} = 0 \rightarrow \phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma_0}{2} - \frac{\beta}{2}$$

dove:

E energia
 $\tau_{sh} A_{sh}$ forza F_{sh}
 AC spostamento

Tale risultato è ragionevole perché emerge la dipendenza con l'angolo di attrito β . La stima fatta dal primo modello è una sovrastima perché a causa dell'attrito l'angolo ϕ è inferiore di quello calcolato da Pijspanen.

Per capire quando applicare uno dei tre modelli occorre conoscere le ipotesi in cui si trova. Quando l'attrito sarà meno importante (condizioni di lubrificazione) si considererà il primo modello, se si lavora con poca lubrificazione magari per motivi economici si stima meglio l'angolo ϕ utilizzando il terzo modello, quando invece si può conoscere il fattore di ricalcamento conviene usare il secondo metodo.

Generalmente lo spessore del truciolo deformato è maggiore dello spessore del truciolo indeformato. Questo proprio a causa dell'attrito. Capiamo che non considerare l'attrito implica che il fattore di copertura sia sempre uguale a 1 mentre nella realtà è minore di 1:

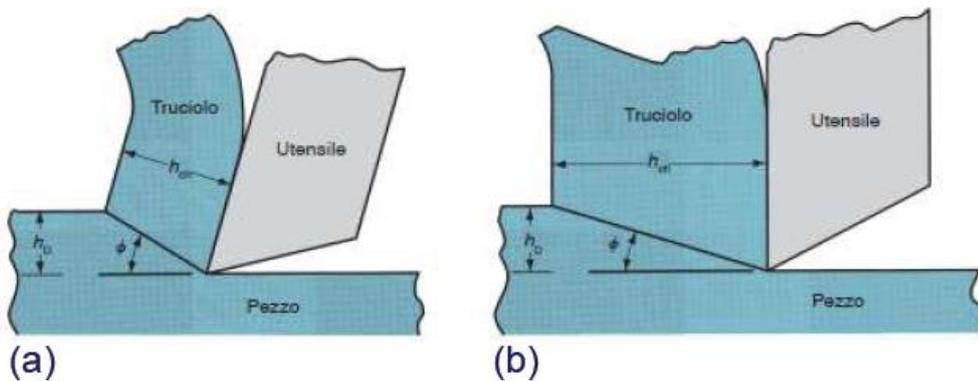
$$r_c = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\gamma_0}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\gamma_0}{2} - \gamma_0\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\gamma_0}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\gamma_0}{2}\right)}$$

Relazione di potenza ed energia nell'asportazione di truciolo

Analizziamo ora l'effetto dell'angolo del piano di scorrimento ϕ :

- Se ϕ è maggiore allora l'area del piano di scorrimento è inferiore
- Se ϕ è minore allora l'area del piano di scorrimento è maggiore

Notiamo dunque che l'angolo del piano di scorrimento aumenta all'aumentare dell'angolo di spoglia superiore ortogonale secondo l'equazione di Merchant.



Analisi della potenza nel taglio ortogonale

La potenza del taglio ortogonale dipende da diversi fattori quali la geometria, le forze, la potenza, l'energia, i costi e la scelta delle macchine. La potenza di taglio è data dal prodotto tra forza e velocità. Consideriamo entrambe le componenti delle forze F_c e F_f . Dunque scriviamo la potenza come:

$$P_c = F_c v_c + F_f v_f = \text{potenza di taglio} + \text{potenza di avanzamento}$$

La potenza di avanzamento è molto inferiore della potenza di taglio quindi può essere trascurata. Per passare dalla potenza richiesta nella lavorazione alla potenza richiesta dalla macchina occorre tenere presente il rendimento che varia con il variare del tipo di macchina. La potenza assorbita dal motore e quindi dalla macchina si calcola come:

$$P_g = \frac{P_c}{\eta} = \frac{P_c}{E}$$

Un approccio alternativo al modello a piano di scorrimento per la valutazione della forza e della potenza di taglio è la pressione taglio cioè un fattore k_c che è a tutti gli effetti una pressione e se moltiplicato con A_D da F_c :

$$k_c = \frac{F_c}{A_D}$$

La pressione di taglio k_c è funzione di:

- Spessore di truciolo indeformato
- Dell'area della sezione del truciolo indeformato A_D
- Delle proprietà meccaniche del materiale in lavorazione
- Del materiale dell'utensile e dalla geometria del tagliente
- Della velocità di taglio
- Delle condizioni di lubrificazione della zona di taglio

La pressione di taglio potrebbe essere stimata sperimentalmente ma poi andrebbe usato solo per le condizioni adottate nella sperimentazione quindi non si risolverebbe il problema. Se invece si utilizza come definizione la seguente il problema si semplifica:

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

Tale espressione venne ricavata da Kronenberg che introdusse una nuova costante nota come pressione di taglio specifico k_{cs} . Tale valore sarà una costante stimabile. Il modello è generalizzato perché vale per tutte le asportazioni di truciolo, grazie al denominatore che può variare modificando gli opportuni esponenti. La pressione di taglio specifico dipende

principalmente dal materiale da lavorare. Si definisce come la pressione di taglio necessaria per asportare una sezione di truciolo di 1 mm^2 con h_D pari a 1 mm e larghezza 1 mm . Con gli attuali materiali per utensili γ è nulla quindi quel fattore è pari a 1. Dunque si può stimare F_c :

$$\frac{k_{cs}}{h_D^x} = \frac{F_c}{A_D} \rightarrow F_c = \frac{k_{cs}}{h_D^x} A_D = \frac{k_{cs}}{h_D^x} (h_D b) = k_{cs} h_D^{1-x} b$$

Analisi della temperatura nel taglio ortogonale

Occorre infine studiare la temperatura che si genera all'interfaccia tra utensile e pezzo per due diversi motivi:

1. Fornisce un'idea di quanto il pezzo sia sollecitato dai cicli termici
2. Permette di comprendere la portata del fluido refrigerante che occorre. Il fluido refrigerante riduce la temperatura all'interfaccia, lubrifica e favorisce l'allontanamento del truciolo. Diminuendo l'attrito grazie all'effetto lubrificante del fluido refrigerante si riduce anche l'energia dissipata

Per stimare la temperatura è possibile sfruttare due diversi modelli analitici che la legano ad alcune grandezze note. Il primo modello è noto come equazione di Cook; tale equazione può essere utilizzata per calcolare l'aumento della temperatura sulla superficie di contatto utensile-truciolo durante la lavorazione per asportazione di truciolo:

$$\Delta T = \frac{0,4 k_c}{\rho C} \left(\frac{v_c h_D}{K} \right)^{0,333}$$

Dove:

ΔT aumento della temperatura media sulla superficie di contatto utensile-truciolo [$^{\circ}\text{C}$]

k_c pressione di taglio dell'operazione $\left[\frac{\text{Nm}}{\text{mm}^3} = \frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \right]$

ρ densità del materiale

C calore specifico del materiale lavorato $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \right]$

v_c velocità di taglio $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

h_D spessore del truciolo indeformato [m]

K diffusività termica del materiale $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$

L'altra equazione utile per la stima della temperatura è la relazione di Trigger che stabilisce un legame tra la velocità e la temperatura:

$$T = K v_c^m$$

Questa equazione ha il vantaggio di essere molto semplice da applicare, lo svantaggio è che tiene presente solo la velocità di taglio mentre l'equazione di Cook considera anche altri aspetti legati al taglio. Il coefficiente moltiplicativo K così come l'esponente m dipendono dagli altri parametri di taglio, esclusa la velocità, e dal materiale. La scelta tra le due equazioni dipende dal dettaglio dell'analisi che si vuole effettuare. Fisicamente si può misurare la temperatura all'interfaccia attraverso opportuni sistemi che misurano le emissioni visive. Si può anche effettuare una misura indiretta misurando la temperatura del truciolo e ricavando quella all'interfaccia, noto che nei processi di taglio circa l'80% di calore è presente nel truciolo dopo il taglio stesso. Ovviamente la misura sarà affetta da un'incertezza elevata.