



DE Department of
Engineering
Ferrara

CONFIDENTIAL

Appunti

Tecnologie Meccaniche II

CONFIDENTIAL

DE

Department of Engineering Ferrara

Via Saragat 1, 44122 Ferrara

<https://de.unife.it/it>

Università degli Studi di Ferrara

Via Ludovico Ariosto, 35 - 44121 Ferrara

<https://www.unife.it/it>

Revisioni

Revisione	Data	Autori	Descrizione
1.0	29.01.2021	XX YY	document created
1.1	28.02.2023	LN	Prima compilazione con modifiche
1.2	01.03.2023	LN	Applicazione modello alla necessità

Università degli Studi di Ferrara

[XX] Dr. Name Surname - name.surname@xxx.com
[YY] Dr. Name Surname - name.surname@xxx.com
[LN] Nicolè Lorenzo - lorenzo.nicole@edu.unife.it

Abstract

In questo elaborato si vuole riportare gli appunti circa le lezioni di Tecnologie Meccaniche II.

CONFIDENTIAL

Prefazione

...

CONFIDENTIAL

Acknowledgements

Tutto ciò che verrà trattato a lezione verrà riportato ed adattato in questo elaborato.

CONFIDENTIAL

Indice

Abstract	i
Prefazione	ii
Acknowledgements	iii
Indice	iv
Elenco delle figure	vi
Elenco delle tabelle	vii
Todo list	viii
1 Introduzione	1
1.1 Proprietà meccaniche sulla deformabilità	1
1.1.1 Tensione a freddo nelle lavorazioni a freddo	1
1.1.2 Snervamento discontinuo	2
1.2 Tessitura e anisotropia	3
1.2.1 Proprietà modificate	3
1.2.1.1 Reticolo esagonale compatto	4
1.2.1.2 Reticolo cubico	6
1.3 Effetti delle lavorazioni a freddo	6
1.3.1 Effetti della velocità di deformazione	7
1.4 Limiti di formabilità delle lamiere	8
1.4.1 Come mai le lamiere?	9
1.5 Materiali per lamiere	9
1.5.1 Acciai	10
2 Lavorazioni per asportazione di truciolo	12
2.1 Introduzione	12
2.2 Taglio ortogonale ideale	13
2.2.1 Fattore di attrito	16
2.2.2 Valutazione delle forze	16
2.3 Taglio ortogonale realistico	20
2.3.1 Truciolo continuo	20

2.3.1.1	Truciolo continuo ondulato	22
2.3.1.2	Truciolo continuo a dente di sega	22
2.3.2	Truciolo discontinuo	22
2.3.3	La rottura del truciolo	23
2.4	Taglio obliquo	23
2.4.1	Tornitura	25
2.4.2	Calcolo della forza ed energia	25
2.4.3	Temperature	27

CONFIDENTIAL

Elenco delle figure

1.1	Prove di trazione	2
1.2	Esagonale compatto	5
1.3	Reticoli cubici	5
1.4	Andamenti tipici di un acciaio dopo ricottura	8
1.5	Motivazioni delle lavorazioni a caldo	10
2.1	Taglio Ortogonale	14
2.2	Scomposizione delle forze per il taglio ortogonale	17
2.3	Andamenti delle forze per il taglio ortogonale	19
2.4	Tipologia di forze prementi sulla faccia dell'utensile	20
2.5	Taglio ortogonale reale	21
2.6	Esempi di rompi-truciolo	23
2.7	Il taglio obliquo	24
2.8	Esempio di utensile per tornitura	25
2.9	Analisi termica dell'asportazione di truciolo	27
2.10	Temperature durante le lavorazioni ad asportazione	28

Elenco delle tabelle

1.1	Vantaggi e svantaggi delle lavorazioni a freddo	6
-----	---	---

CONFIDENTIAL

Todo list

Figure: 1.3 (1) Da aggiungere il grafico tridimensionale sulla deformazione a freddo.	6
Figure: 1.3 (2) Aggiungere proiezioni del grafico precedente in due dimensioni. . .	6
■ 1.4 (3)	
Da rivedere :-/	9

CONFIDENTIAL

CAPITOLO 1

Introduzione

1.1 Proprietà meccaniche sulla deformabilità

Per un materiale metallico, le lavorazioni che si basano sulla deformazione del materiale sono:

- Forgiatura;
- Laminazione;
- Estrusione;
- Trafilatura;

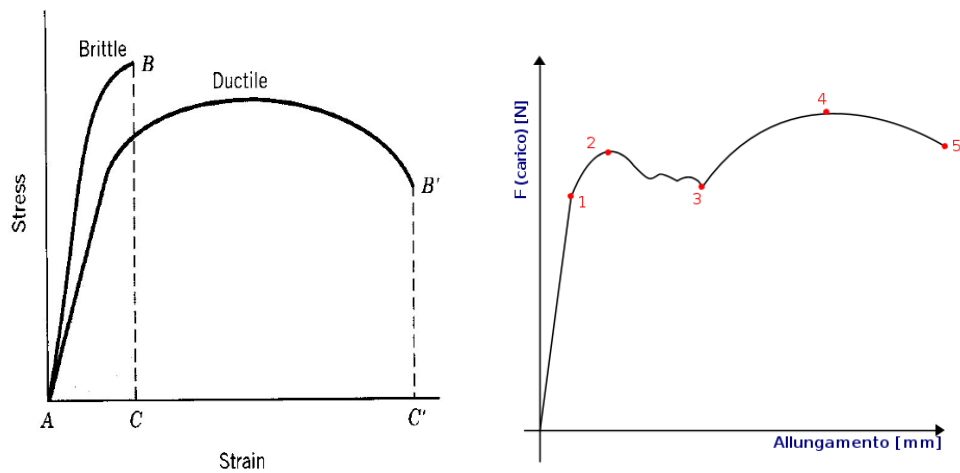
Di queste, le prime 3 provocano compressione nel materiale che, dunque, permettono al materiale metallico di mantenere le caratteristiche meccanico-fisiche. Essendo comunque compresso, il materiale risulta più duttile. Per quanto riguarda invece la trafilatura, in questo caso si ha una trazione del materiale. Il che si traduce in una perdita di duttilità dovuta alla deformazione, prima elastica e poi plastica, del materiale. Ciò altera le proprietà meccanico-fisiche. Tutto ciò è vero in particolare per lavorazioni massive: operazioni che vanno a modificare tutte e tre le dimensioni del materiale.

Se invece si prendono in considerazione le lamiere: prodotti di materiale metallico note per aver una delle tre dimensioni particolarmente ridotta, lo spessore nello specifico, la situazione cambia. Infatti non si può più considerare una qualsiasi deformazione in tutte e tre le dimensioni spaziali. Inoltre, comprimendo una lamiera si rischia di piegarla. Dunque le lavorazioni su lamiera sono in genere, ma non sempre, per trazione. Inoltre si vuol ricordare come la laminazione non sia una lavorazione su lamiera in quanto si ipotizza che la lamiera sia già laminata, dunque pronta a successivi trattamenti. La maggior parte delle lavorazioni su lamiera vengono eseguite a freddo: ciò, come si vedrà in seguito, garantirà il mantenimento di determinate caratteristiche meccanico-fisiche.

1.1.1 Tensione a freddo nelle lavorazioni a freddo

Se si osserva il grafico della prova di trazione 1.1a si osservano 2 particolari zone: comportamento elastico del materiale e comportamento plastico. Ricordando l'equazione costitutiva del materiale ovvero

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (1.1)$$



(a) Grafico ingegneristico della prova di trazione (b) Grafico prova di trazione con snervamento discontinuo

Figura 1.1: Prove di trazione

Dove i termini di 1.1 sono:

σ tensione [MPa]

K coefficiente di resistenza

ϵ fattore di incrudimento

n Sensibilità alla velocità di incrudimento

Dalla 1.1 si può intuire che il il fattore K lo si voglia particolarmente grande al fine di garantire un'alta resistenza allo snervamento. La strizione si manifesterà su una sezione "più debole" (impurità, vuoti, ecc...), da cui avrà luogo una deformazione della sezione stessa. Dunque sulla sezione si manifesterà incrudimento dovuto proprio alla trasformazione. L'incrudimento renderà la sezione molto più dura rispetto alle circostanti. Perciò si può dimostrare come il valore per cui la strizione si stabilizza è proprio pari al coefficiente n . Sotto queste ipotesi allora vale:

$$\epsilon = n \quad (1.2)$$

In generale si preferisce utilizzare materiali con coefficiente n molto alto: per cui il materiale si deforma molto prima della strizione. Dunque è più **ductile**.

1.1.2 Snervamento discontinuo

Lo snervamento discontinuo è tipico dei metalli che hanno basso valore interstiziale. Tipicamente, a fine lavorazione di tali metalli si presentano le **bande di Lüder**. Di fatto non costituiscono un difetto tecnologico, piuttosto puramente estetico. Siccome le lamiere vengono utilizzate anche per coperture, tali bande fanno sembrare il prodotto più scadente (Anche se di fatto non lo è). Il grafico 1.1b rappresenta il comportamento di un materiale a snervamento discontinuo.

1.2 Tessitura e anisotropia

La tessitura è la descrizione della presentazione, sia estetica che prestazionale, del materiale. Logicamente dipende direttamente dai grani cristallini presenti nel materiale.

Quando questi si presentano in forma allungata (es. post laminazione), portano a delle differenze dal punto di vista meccanico-fisico del prodotto. Portando **anisotropia**. Già si sa che i piani preferenziali di scorrimento sono quelli ad alte densità atomica e, nel caso non ce ne siano a sufficienza, il materiale tenderà a costituirne di nuovi¹.

1.2.1 Proprietà modificate

Ricordando i principali termini di descrizione delle proprietà meccanico-fisiche dei metalli:

γ Densità di snervamento

T_s Resistenza meccanica

Inoltre anche altre proprietà, non necessariamente meccaniche, vengono modificate da eventuali lavorazioni a freddo. Allora: considerando una lamiera lavorata a freddo vale:

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \quad \xrightarrow{\text{per lamiera}} \quad \epsilon_1 + \epsilon_w + \epsilon_t = 0 \quad (1.3)$$

La 1.3 definisce la *costanza della deformazione del volume principale*. Si considerano pedici diversi da quelli classici per un volume massivo in quanto stiamo considerando una lamiera, per cui i nuovi pedici indicano:

l *length*

w *width*

t *thickness*

Si ricordano, inoltre, le deformazioni per le principali grandezze:

$$\epsilon_w = \ln \frac{w_1}{w_0} \quad \epsilon_t = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (1.4)$$

Dove w_1 e h_1 sono le misurazioni dopo la prova di trazione, mentre w_0 e h_0 sono i valori iniziali. A partire dai termini sopraelencati, si può definire il parametro r definito come nella 1.5.

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (1.5)$$

Non ha un nome specifico, nonostante rappresenti la quantità di deformazione che una lamiera subisce se sottoposta a trazione. In particolare, le due deformazioni considerate sono quella in termini di spessore e quella in larghezza. Se il materiale avesse:

$$r = 1 \quad (1.6)$$

¹Si vedrà anche in seguito che la questione dei piani di scorrimento è cruciale per la qualità del materiale

potrebbe essere considerato isotropo. Più correttamente si definiscono **isotropi** tutti quei materiali per cui vale la 1.7.

$$r_0 = r_{45} = r_{90} = 1 \quad (1.7)$$

dove i fattori r sono il rapporto tra le deformazioni come sopra però ponendo la trazione con angolo tanto quando indicato dal pedice:

- r_0 Direzione laminazione
- r_{45} Direzione intermedia
- r_{90} Direzione ortogonale

Altrimenti il materiale è semplicemente **anisotropo**. L'anisotropia può essere un problema in termini di lavorazione di una lamiera: si prenda come esempio il caso della realizzazione di un contenitore per estrusione. Se il materiale fosse isotropo allora la deformazione avverrebbe in maniera uniforme su tutta la lamiera. Se, invece, il materiale è anisotropo, la deformazione diversificata produce variabilità sul bordo del prodotto. Successivamente sarebbe necessario un'operazione di *trimming* per eliminare il materiale in eccesso. L'anisotropia si può verificare in diverse forme.

$r_0 = r_{45} = r_{90} \leq 1$ allora si parla di **Anisotropia normale** alla superficie della lamiera. Se ne può misurare il valore tramite:

$$r_m = \bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2 * r_{45}}{4} \quad (1.8)$$

$r_0 \neq r_{45} \neq r_{90}$ allora si parla di **compresenza di anisotropia planare e normale** da cui si può ottenere una misura

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2 * r_{45}}{2} \quad (1.9)$$

In generale l'anisotropia si verifica quando, durante la laminazione, i reticoli cristallini si muovono per garantire i piani di scorrimento. Ora si vuole dare una rapida visione delle principali strutture cristalline nei materiali.

1.2.1.1 Reticolo esagonale compatto

I piani di scorrimento si trovano sulle superfici di base del prisma compatto. Si definisce *compatto* perché il rapporto tra l'altezza del prisma e la lunghezza di un lato di base, ovvero c/a considerando i riferimenti della figura 1.2. Si osserva che il rapporto 1.5 per materiali con reticolo cristallino High c/a è prossimo a 0:

$$r_{\text{High } c/a} = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \longrightarrow 0 \quad (1.10)$$

Nella maggior parte dei casi si vuole un rapporto r il più alto possibile. Così che la deformazione della lamiera interessi la larghezza piuttosto dello spessore. Altrimenti potrebbero sorgere problemi sulla rigidità della lamiera anche senza eseguire alcuna lavorazione. Potremmo allora dire che:

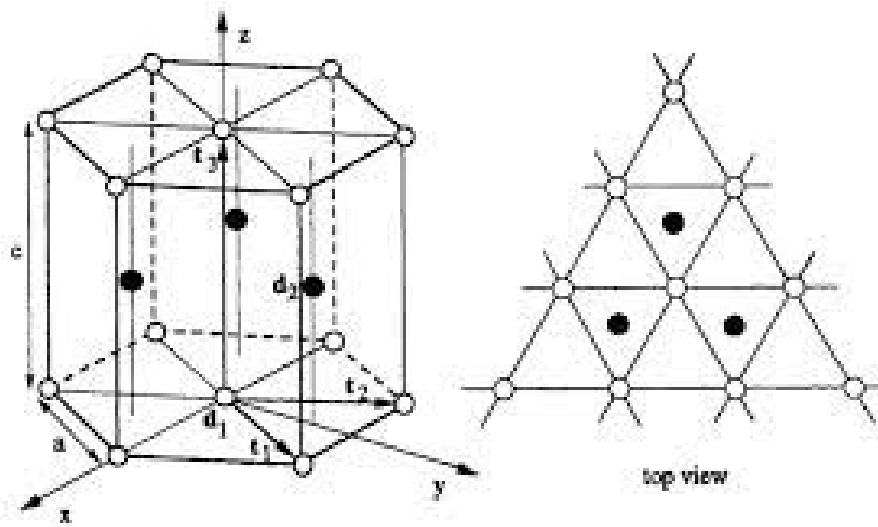


Figura 1.2: Esagonale compatto

n indichi il ritardo nella deformazione (sensibilità alla deformazione)

r indichi che tipo di deformazione si avrà.

Nel caso di materiali ad esagonale compatto ma con rapporto c/a basso si osserva:

$$r_{\text{Low } c/a} \longrightarrow \infty \quad (1.11)$$

Ad esempio per guadagnare duttilità nel titanio (Ti) si effettuano lavorazioni a caldo.

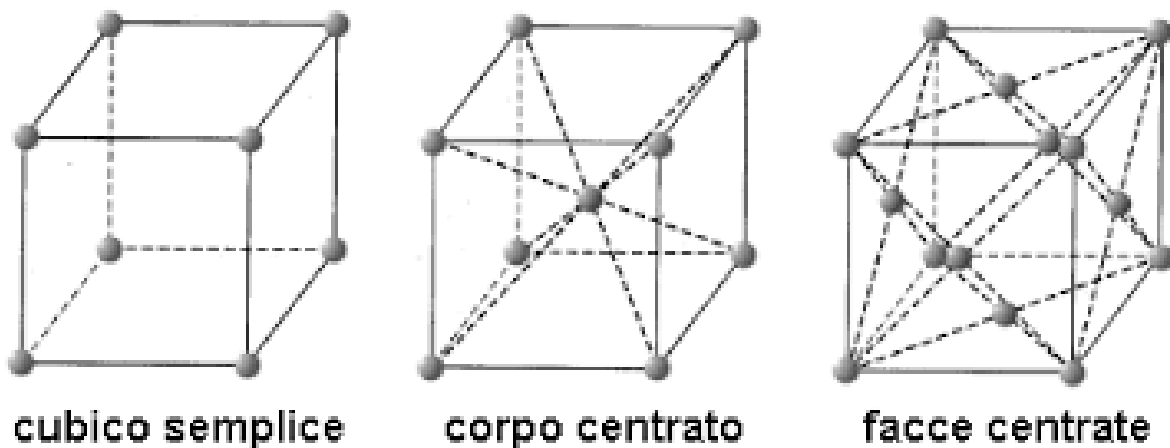



Figura 1.3: Reticoli cubici

1.2.1.2 Reticolo cubico

Per i metalli cristallizzanti a **CFC!** (**CFC!**) si osserva un valore di $r \approx 0.4 \div 0.8$. Mentre per i metalli a **CCC!** (**CCC!**) si osservano valori di $r \approx 1$.


1.3 Effetti delle lavorazioni a freddo

Come già accennato in precedenza, le lavorazioni a freddo permettono di ottenere da un materiale metallico sì la deformazione voluta. In più si garantisce al materiale maggiore durezza. Ciò è dovuto allo scorrimento delle dislocazioni, durante la lavorazione del materiale, che vengono bloccate dal bordo del grano cristallino. Di contro bisogna tenere a mente che una maggiore durezza impone una minore duttilità, considerazione che serve nel caso la lamiera debba subire diverse lavorazioni prima di divenire prodotto finito.



Missing figure

1.3 (1) Da aggiungere il grafico tridimensionale sulla deformazione a freddo.



Missing figure

1.3 (2) Aggiungere proiezioni del grafico precedente in due dimensioni.

Dunque le lavorazioni a freddo hanno diversi vantaggi e svantaggi come descritto nella tabella 1.1.

Tabella 1.1: Vantaggi e svantaggi delle lavorazioni a freddo

Vantaggi	Svantaggi
Metodo economico per indurire il materiale	Pressione sugli stampi più alti
Il prodotto è quasi finito finite le lavorazioni (in genere)	Bisogna trovare un compromesso tra durezza desiderata e consumo delle attrezzature

Per ovviare ad alcuni problemi evidenziati alla tabella 1.1, si può pensare di ricorrere a ricotture parziali o complete. Alcuni esempi sono riportati alle figure 1.4

In particolare:

Lavorazione a freddo $T < 0.3T_m$ evidenzia un chiaro incrudimento del materiale, che ne risulterà indurito.

Ricotture di distensione $0.3T_m < T < 0.5T_m$ Permette una ridistribuzione delle dislocazioni ma senza ricristallizzazione

Ricottura di ricristallizzazione $T > 0.5T_m$ Non è scontata la ricristallizzazione ma si ha una distensione dei grani, annullando eventuali lavorazioni a freddo precedenti.

Nonostante ciò le ricotture possono essere molto interessanti per le caratteristiche meccaniche dei materiali metallici. Ipotizzando di voler raggiungere un determinato obiettivo di duttilità del materiale. Si può raggiungere tale obiettivo semplicemente lavorando il materiale a freddo, dando una certa deformazione al pezzo. Sappiamo che così il pezzo sarà più indurito di conseguenza. C'è un ulteriore modo: se si incrudisce di più rispetto al obiettivo, attraverso una deformazione maggiore di quella desiderata, si può pensare di sfruttare una ricottura di distensione per ritornare al livello di duttilità richiesto ma garantendo un livello di durezza maggiore rispetto alla sola lavorazione a freddo. In genere vale anche il viceversa. Tale metodo viene chiamato *forte incrudimento con ricottura parziale*. Alla figura 1.4a è graficato l'andamento delle tensioni di snervamento e rottura dopo una ricottura completa. Si osserva che vengono perse completamente le caratteristiche meccaniche guadagnate tramite incrudimento per lavorazione a freddo. Alla figura 1.4b viene mostrato il processo per ottenere una determinata tensione di snervamento dopo forte incrudimento.

Ipotizzando una ricottura completa, ovvero portando il materiale a una temperatura $T > 0.5 T_m$, si può avere ricristallizzazione del metallo che porta grani a dimensioni maggiori. Bisogna anche tenere a mente l'influenza del tempo su questi processi di ricottura.

1.3.1 Effetti della velocità di deformazione

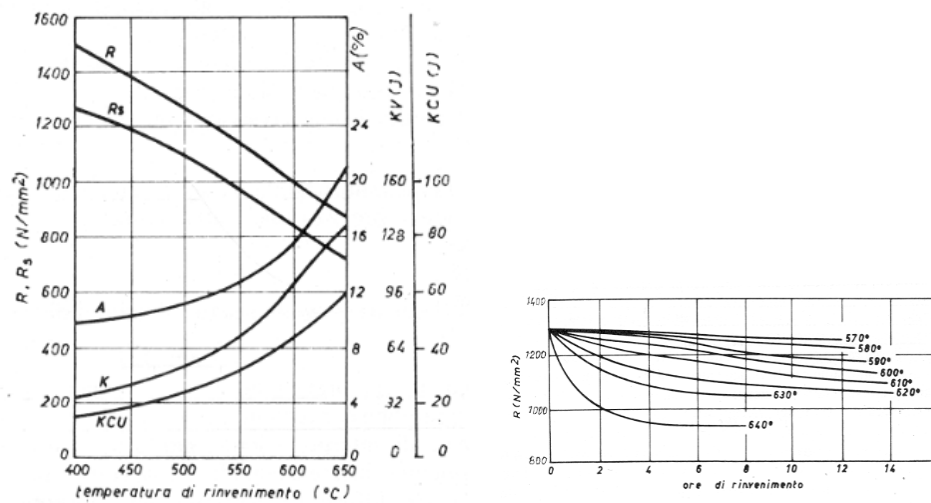
Come visto nell'equazione costitutiva 1.3, il materiale viene univocamente definito tramite tale equazione. In realtà è necessario "mettere in relazione" anche il tempo. Considerando l'equazione costitutiva per lavorazione a caldo:

$$\sigma_f = C \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (1.12)$$

Da cui si può osservare che se la temperatura aumenta allora C diminuisce e contemporaneamente m cresce. Infatti:

C è il coefficiente di resistenza alla temperatura del materiale;

m è l'indice di sensibilità alla velocità di deformazione;



(a) Duttività, snervamento e rottura dopo ricottura (b) Durata ricottura in base allo snervamento richiesto

Figura 1.4: Andamenti tipici di un acciaio dopo ricottura

è la velocità di deformazione descritta come V/h

Con una strizione diffusa, l'incrudimento è diffuso su tutto il provino. E, come si era visto anche in precedenza, ciò migliora le caratteristiche meccaniche. Se invece, la strizione è localizzata rischia di indebolire il materiale. Il fatto che sia locale indica che il materiale in quel punto è più debole e può rompersi più facilmente.

1.3.1 Definizione (Considerazione): In generale si privilegiano metalli che abbiano alta sensibilità al incrudimento e maggiore sensibilità alla velocità di strizionamento.

Si vogliono ricordare i valori per cui m porta ad un determinato comportamento il materiale:

$-0.05 < m < 0.05$ Cold working

$0.05 < m < 0.3$ Hot working

$0.3 < m < 0.7$ Superplasticity²

$m > 1$ Newtonian fluid

1.4 Limiti di formabilità delle lamiere

1. Manifestazione di strizioni localizzate.

²Valori di deformazione tipici delle lavorazioni con materiali plastici

2. Con strizione diffusa, prima della rottura.
3. Generazione delle bande di Lüder
4. Generazione della superficie a buccia d'arancia

A parte le prime due che portano a conseguenze meccaniche per cui la lamiera effettivamente non può più essere vendute o utilizzate per la produzione. La terza ha una motivazione puramente estetica: siccome le lamiere possono essere utilizzate come copertura, tale superficie può essere problematica. Non lo è dal punto di vista meccanico-fisico. La superficie a buccia d'arancia anch'essa non influisce sulle prestazioni meccaniche del prodotto³. La formazione è dovuta alla rotazione dei grani cristallini durante eventuali lavorazioni. La soluzione è quella di sfruttare, per le lamiere in particolare, materiali a grana fine.

1.4.1 Come mai le lamiere?

Le lamiere vengono largamente impiegate largamente per la produzione di oggetti metallici, e le tecniche che verranno trattate in questo corso volgono a sfruttare tale prodotti in larga scala. Principalmente le lamiere vengono sfruttate perché:

- A parità di prodotto, un oggetto pieno e uno ricavato tramite lavorazione di lamiera risulta più pesante.
- La laminazione è una lavorazione molto efficiente: si producono tanti pezzi in poco tempo e con minore energia.
- La laminazione permette di raggiungere risultati molto accurati (in termini di spessori e qualità del laminato) con poche risorse, dunque ad un costo molto basso.
- La lamiera è un prodotto "quasi" pronto all'uso.

1.4 (3)
Da rivedere :-/

1.5 Materiali per lamiera

I materiali che in industria vengono più comunemente utilizzati per lamiera sono ad esempio:

- Acciai, dolci + inossidabili
- Leghe di alluminio
- Ottoni

³C'è da dire che una maggiore porosità superficiale potrebbe stimolare la generazione di cricche in alcune lavorazioni.

- Bronzi
- Rame
- Magnesio
- Titanio

Sebbene la maggior parte dei prodotti in lamiera siano lavorati a freddo, ci sono alcuni materiali che necessitano di lavorazioni a caldo. In particolare alla figura 1.5, si presentano i motivi per cui sia necessaria la lavorazione a caldo

Ora si vedranno nel dettaglio tutte le caratteristiche e motivazioni per cui viene scelta una determinata categoria di materiali.

1.5.1 Acciai

In genere si preferiscono acciai che abbiano un tenore di carbonio minore del 0.15%, ovvero gli acciai dolci. Inoltre, bisogna includere gli acciai inossidabili: sia per motivi di mercato, che necessità operative dei prodotti finali. Essendo una gamma decisamente ampia di materiali, le lavorazioni possibili sono molteplici:

lavorazioni a caldo non vengono sfruttate troppo per gli acciai in quanto si preferisce mantenere l'incrudimento ottenuto tramite la lavorazione a freddo. Anche se si impiega per:

- Ottenere maggiore duttilità per il materiale.
- Quando le forze in gioco sono eccessive è opportuno aumentare la duttilità grazie ad una maggiore temperatura.

Si rischia di incorrere in:

- Finiture peggiori.
- Maggiore rugosità da cui derivano pure caratteristiche meccaniche peggiori.
- Non si ottiene incrudimento.

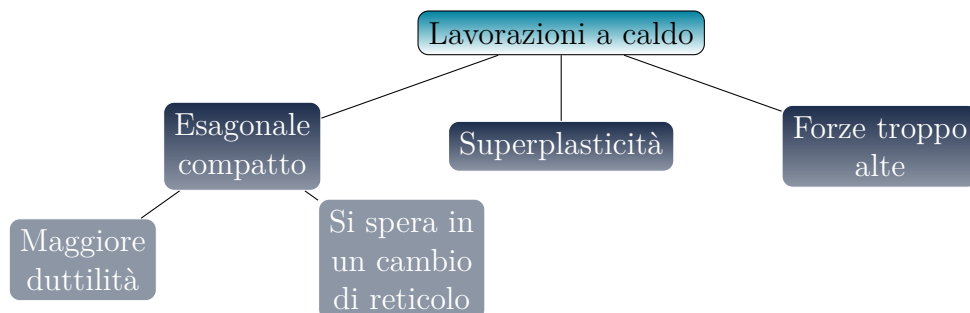


Figura 1.5: Motivazioni delle lavorazioni a caldo

Lavorazioni a freddo In industria vengono sfruttate molto più volentieri per via:

- Migliori tolleranze geometriche ottenibili.
- Migliore finitura superficiale,
- Migliori prestazioni meccaniche a parità di materiale usato.

CONFIDENTIAL

CAPITOLO 2

Lavorazioni per asportazione di truciolo

Il principio di funzionamento delle lavorazioni per asportazione di truciolo è differente da quanto visto fin ora. Nelle lavorazioni per deformazione plastica si avevano delle deformazioni lente. *"Per cui il materiale aveva il tempo di adattarsi"*. Per l'asportazione di truciolo così non può essere. Infatti si suppone che il materiale venga rotto, tra l'altro il più rigidamente possibile. Dunque le deformazioni richieste devono essere a più alta velocità. Ciò però crea delle problematiche non indifferenti:

- deformazioni veloci non sono rappresentabili tramite prove classiche.
- Si rende necessario idealizzare il processo e man mano aggiungere ipotesi più realistiche.

2.1 Introduzione

Nelle lavorazioni viste fin ora si portava il materiale a deformazione, anche per la tranciatura nel momento in cui il materiale subiva una deformazione critica fino all'innescio di cricche da cui poi avveniva la separazione del materiale. Per l'asportazione del truciolo non può essere così: la deformazione avviene in tempi molto più rapidi, per cui il materiale ha comportamenti differenti da quelli visti in precedenza. Inoltre, considerando il materiale di scarto, per le lavorazioni a deformazione si può recuperare ed eventualmente riciclare. Per le lavorazioni ad asportazione la cosa è molto più complicata e difficile. Il valore del truciolo è pressoché nullo e il suo recupero può essere complicato per via delle molteplici varietà di materiale che possono subire tali lavorazioni. Alla tabella 2.1 sono riportati alcuni vantaggi e svantaggi di tali lavorazioni.

Esempio. 2.1.1: Vantaggi e Svantaggi

Vantaggi	Svantaggi
Si possono ottenere tolleranze migliori	Tempo ciclo molto più lento
Buona finitura superficiale	Scarti di materiale non recuperabili
Adatti alla lavorazione di pezzi unici	
Costo macchina relativamente basso	Spesso è richiesta alta lavorazione manuale

In industria si sta cercando di eliminare queste lavorazioni per via del tempo ciclo molto elevato. Sebbene, in abito artigianale stiano avendo un forte sviluppo, sia in termini di automazione, dunque di tecnologia a bordo macchina; sia di lavorazioni permesse dalle macchine. Altro grande punto a favore di tali lavorazioni è sicuramente l'adattabilità per qualsiasi materiale.

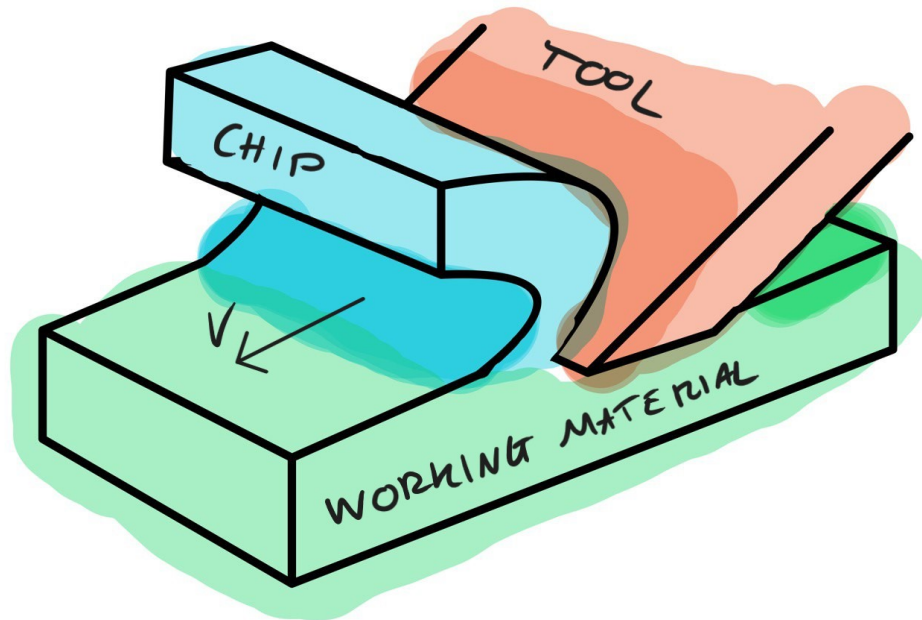
In industria, vengono relegate ad operazioni di finitura del prodotto, dove con una singola passata si cerca di completare il prodotto e metterlo sul mercato. Per l'artigianato invece si ha un utilizzo più intensivo, dove con una passata si cerca di ottimizzare la quantità di materiale asportato.

Come punto di partenza è utile considerare applicazioni in cui il processo sia completamente idealizzato.

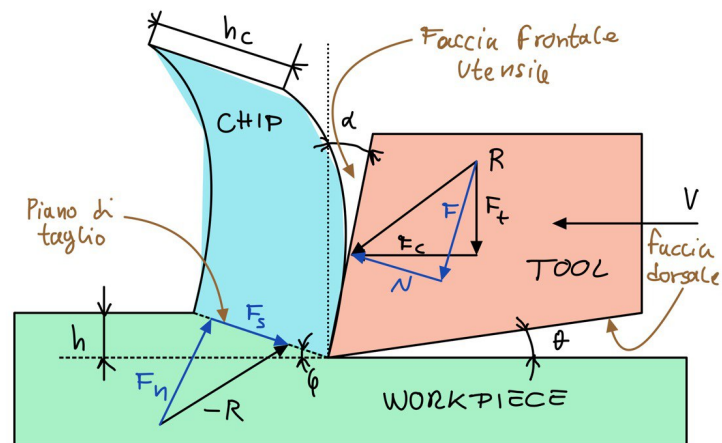
2.2 Taglio ortogonale ideale

Alla figura 2.1 sono rappresentati degli esempi di taglio ortogonale.

Si dice che il taglio è ortogonale quando la lama dell'utensile è ortogonale alla direzione della velocità di taglio. Allora si possono definire diversi parametri come riportato nella definizione 2.2.



(a) Visualizzazione del taglio ortogonale



(b) Parametri del taglio ortogonale

Figura 2.1: Taglio Ortogonale

2.2.1 Definizione (Parametri del taglio ortogonale):

α Angolo di spoglia superiore o frontale. Da cui

Se $\alpha > 0$ allora si dice che l'utensile ha angolo acuto,

Se $\alpha < 0$ allora si dice che l'utensile ha angolo ottuso.

θ Angolo di spoglia inferiore

ϕ Angolo di taglio

h Spessore di taglio indeformato

h_c Spessore del truciolo

Come ipotesi ideale, si considererà che tutta la deformazione del materiale avverrà solamente sul piano di taglio. Allora, dai parametri del taglio ortogonale si possono ottenere:

$$r_c = \frac{h}{h_c} = \frac{l_c}{l} := \text{Rapporto di taglio} \quad (2.1)$$

Dove:

l_c è la lunghezza del truciolo

l è la lunghezza del taglio

Mentre:

$$F = K \cdot A \quad (2.2)$$

ovvero, la forza necessaria a tagliare il pezzo sarà proporzionale all'area A del piano di taglio dovuta dalla lunghezza del piano stesso per la profondità del pezzo in senso ortogonale alla figura 2.1b; in più sarà proporzionale alla pressione K esercitata dall'utensile sul pezzo. Inoltre, si può intuire che: per abbassare l'intensità della forza complessiva per il taglio sarebbe opportuno aumentare ϕ , così da limitare l'estensione del piano di taglio e di conseguenza la sua area. Si può ottenere una stima dell'angolo di taglio tramite

$$\tan \phi = \frac{r_c \cos \alpha}{1 - r_c \sin \alpha} \quad (2.3)$$

considerando che il rapporto di taglio lo si può misurare abbastanza facilmente dato che: lo spessore di taglio lo si decide in base alla lavorazione da effettuare, mentre lo spessore del truciolo lo si può misurare abbastanza facilmente. Dunque è evidente che l'angolo α lo si vuole molto grande, in modo da generare piani di taglio molto piccoli: garantendo la necessità di applicare una forza minore.

Risulta utile prestare attenzione alla successiva considerazione. Il valore di deformazione che si raggiunge con le lavorazioni per asportazione di truciolo è nettamente più alte che non le deformazioni per lavorazioni tramite deformazione. Giusto per dare un'idea dell'ordine di grandezza:

$$\dot{\gamma} = \frac{v_s}{d} = \frac{\cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \frac{v}{d} [s^{-1}] \quad (2.4)$$

nella tecnica, si osservano i seguenti valori:

Lavorazione per deformazione $\approx 1 \div 10 \text{ [s}^{-1}\text{]}$

Lavorazione per asportazione $\approx 1000 \text{ [s}^{-1}\text{]}$

2.2.1 Fattore di attrito

Sappiamo che il fattore di attrito ricopre importante ruolo per quanto riguarda questo tipo di lavorazioni. Ci si deve prestare attenzione.

$$\mu = \frac{\tau_i}{p} \quad (2.5)$$

Di base, questa sarebbe la definizione principale di fattore di attrito. Si nota che passata la tensione tangenziale di Von Misess, l'attrito tende a calare, nonostante nell'equazione non sia previsto tale comportamento. Ciò è dovuto al fatto che per calcolare il fattore di attrito si considera un materiale indeformabile, quando nella realtà del taglio ortogonale, non può essere. Dunque il materiale sarà **indeformabile** fino alla tensione di Von Misess, passata quella bisogna considerarlo **deformabile**. Perciò l'equazione (2.5) non descrive completamente il comportamento. Si è sviluppato un **fattore di attrito** adatto a tale fenomeno:

$$m = \frac{\tau_i}{K} \quad (2.6)$$

Dove K è la tensione tangenziale all'interfaccia truciolo-utensile. Nella pratica viene preferito il fattore descritto dalla (2.6) perché più facile da calcolare. Oltre al fatto che permette di descrivere correttamente il fenomeno dello sticking.

2.2.2 Definizione (Sticking): *Fenomeno di aderenza tra il truciolo e l'utensile.*

2.2.2 Valutazione delle forze

Per la valutazione delle forze messe in gioco per tale lavorazione si considereranno i tre attori separatamente e man mano sovrapponendone gli effetti.

Porta utensile

Considerando la scomposizione delle forze della figura 2.2. Al porta utensile si può, operativamente, applicare una cella di carico per valutare la risultante applicata. Celle di carico più moderne possono eventualmente valutare già le componenti di tale risultante. allora possiamo ottenere i moduli delle forze:

$$\begin{cases} F_c = R \cos(\alpha + \psi) & \text{Forza di taglio} \\ F_t = R \sin(\alpha + \psi) & \text{Forza di spinta dell'utensile} \end{cases} \quad (2.7)$$

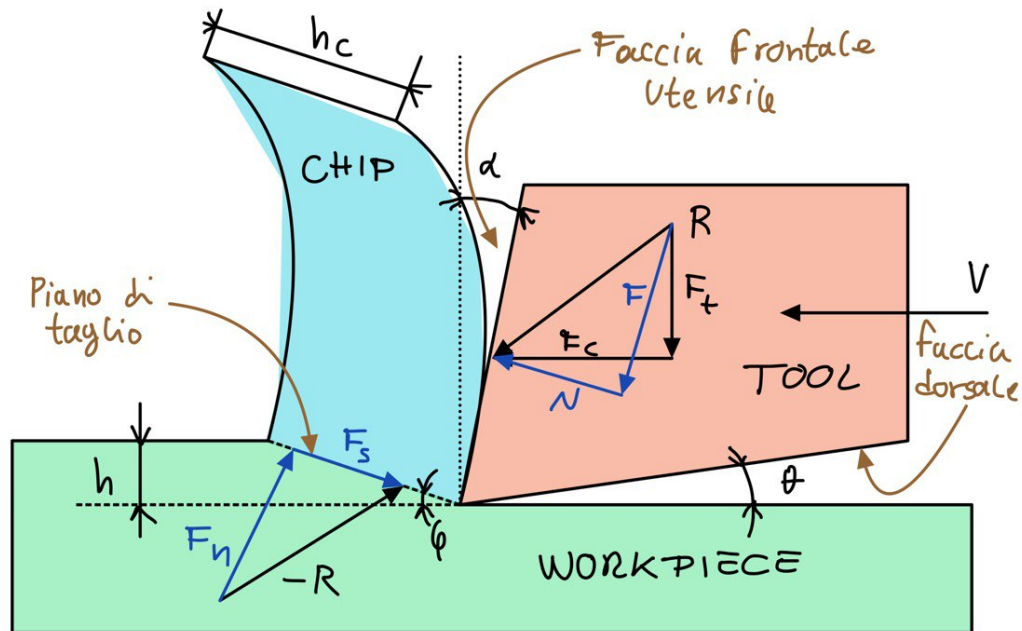


Figura 2.2: Scomposizione delle forze per il taglio ortogonale

Si possono definire ulteriori scomposizioni di forze: se prima la scomposizione avveniva su proiezioni degli assi di riferimento rispetto al pezzo lavorato; ora si possono definire delle scomposizioni rispetto all'utensile.

Utensile

Sempre in riferimento alla figura 2.2.

$$\begin{cases} N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \\ F = F_c \sin \alpha - F_t \cos \alpha \end{cases} \quad (2.8)$$

L'angolo relativo tra R e N viene indicato con β e viene definito come **angolo d'attrito sulla faccia dell'utensile**. Vale:

$$\beta = \frac{F}{N} \approx \mu \quad (2.9)$$

Notare che β è una sottospecie di coefficiente di attrito, infatti dipende proprio da quest'ultimo.

Pezzo lavorato

Lato pezzo lavorato si può vedere la totalità delle forze in gioco. in particolare si devono evidenziare le forze:

F_n risulta essere un contributo idrostatico per il materiale, dunque ne aumenta la duttilità. Aspetto che rende il taglio più difficoltoso. Ciò si risolve aumentando l'angolo del piano di taglio ϕ che si vedrà successivamente.

F_s è la vera e propria forza resistente al taglio. Si sviluppa come relazione della pressione di taglio resistente del materiale e l'area del piano di taglio.

$$F_s = k \cdot A \quad (2.10)$$

Per rendere il taglio più agevole, si può ridurre l'area del piano di taglio nei modi che vedremo in seguito.

Riprendendo l'angolo del piano di taglio ϕ , si hanno migliori condizioni lavorative nel caso questo risulti essere molto grande. Dalla letteratura si evidenziano le seguenti relazioni tra i vari angoli scomposti le forze viste fino a prima:

$$\phi = 45^\circ - \frac{1}{2}(\beta - \alpha) \quad (2.11a)$$

$$\phi = 45^\circ - (\beta - \alpha) \quad (2.11b)$$

Sebbene indichino la relazione degli stessi parametri con due relazioni differenti (2.11), entrambe hanno uno scopo preciso e nascono da considerazioni differenti.

(2.11a) Si sviluppa partendo dalla considerazione che il sistema tenda a consumare la minima energia.

(2.11b) Viene detta di Upper Bond: ovvero ha l'obiettivo di valutare la massima forza necessaria per eseguire il taglio.

Per entrambi i casi risulta evidente che per aumentare ϕ si possono percorrere due strade:

- ↘ β siccome β dipende dall'attrito tra truciolo e utensile, indipendentemente dallo sticking, si può abbassare come angolo lubrificando l'interfaccia tra i due.
- ↗ α Aumentare l'angolo della faccia dell'utensile non è sempre una strada percorribile, infatti si avrebbero utensili molto fini e fragili che tenderebbero a consumarsi molto facilmente.

Nel grafico 2.3.(a) è rappresentato l'andamento della forza di taglio F_s giacente sul piano di taglio. Si osserva che tale forza aumenta all'aumentare dell'area del piano di taglio. Dunque è importante diminuire proprio quest'ultima: attraverso le strategie per

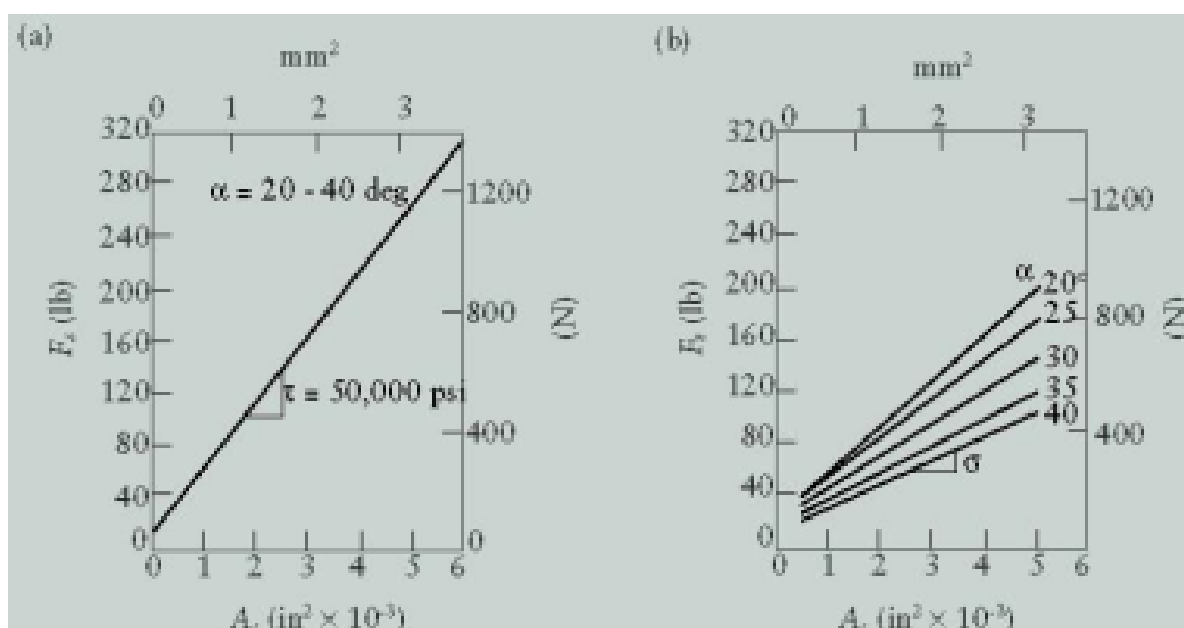


Figura 2.3: Andamenti delle forze per il taglio ortogonale

aumentare ϕ viste in precedenza. Oltretutto tale andamento non è influenzato dall'angolo di spoglia superiore. L'ipotesi che porta a tale costruzione sta nel fatto che il materiale è supposto non incrudente. Infatti: raggiunto tale valore di sforzo tangenziale τ il materiale si rompe. Nel caso di materiale incrudente: si avrà una curva più che lineare, in quanto la deformazione porterà all'irrigidimento nella zona di taglio che necessiterà di maggiore forza per avere la separazione del materiale.

Nel grafico 2.3.(b) viene rappresentata la forza normale al piano di taglio F_n . Questa dipende dall'angolo di spoglia superiore. L'effetto di tale forza è stato già evidenziato: questa fornisce una specie di compressione idrostatica sul piano di taglio portando il materiale ad essere più duttile. Ciò spesso si traduce in un truciolo continuo che però è problematico per la continuazione della lavorazione: in quanto ingombrante e pericoloso.

Nel grafico 2.4 viene riportato il dettaglio sulla faccia superiore dell'utensile. Si possono vedere due sezioni distinte:

Sliding in questa sezione si presenta lo scivolamento del truciolo sulla faccia dell'utensile. Questo porta una certa forza resistente contro l'utensile di tipo τ : ovvero di sforzo tangenziale. Si ha uno strisciamento completamente regolato dal coefficiente di attrito. Tale resistenza si annullerà nel momento in cui c'è distacco tra truciolo e faccia.

Sticking nella zona di adesione si manifesta un particolare fenomeno per cui il materiale del lavorato si accumula sulla punta dell'utensile. Ciò permette di generare una zona di ristagno che favorisce la separazione del materiale tra quello tagliato e il truciolo. Di fatto in alcune occasioni può essere benefico per il tagliente in quanto diventa uno strato protettivo. La resistenza portata da tale fenomeno diventa di pura deformazione σ .

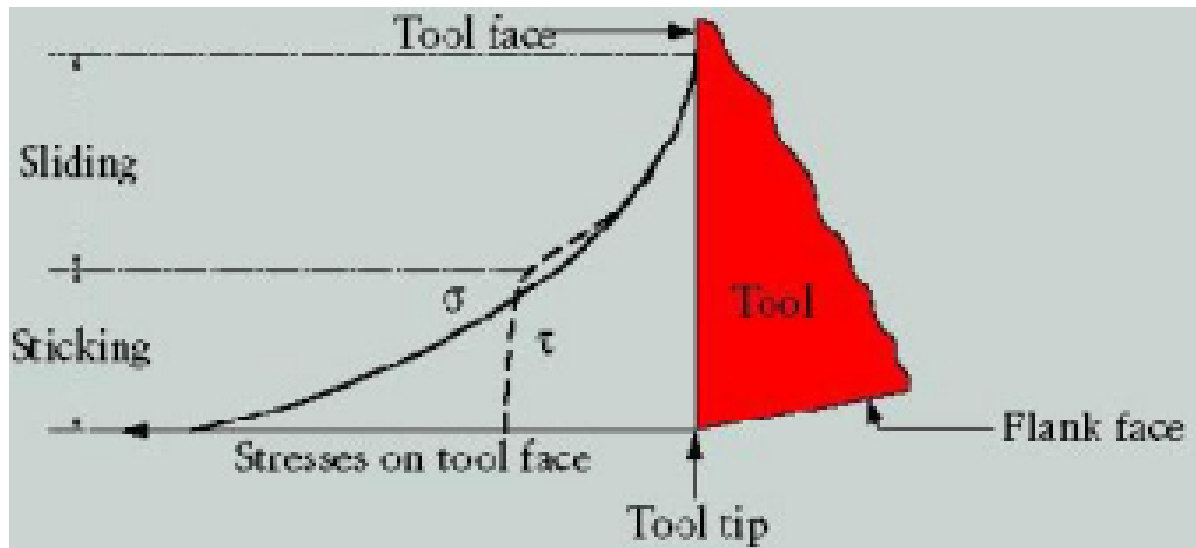


Figura 2.4: Tipologia di forze prementi sulla faccia dell'utensile

Al momento non si è ancora approfondita la finalità dell'angolo di spoglia inferiore θ . Idealmente servirebbe ad evitare lo strisciamento tra utensile e lavorato. Siccome nella realtà bisogna considerare anche il ritorno elastico, non è possibile ottenere un perfetto distaccamento tra utensile e lavorato. Dunque un po' di strisciamento si verifica in qualsiasi occasione. Ciò provoca usura dell'utensile. Tra l'altro questo tipo di usura è la più severa per l'utensile.

2.3 Taglio ortogonale realistico

Il taglio del materiale non avviene più nel piano di taglio, bensì sulla zona di taglio detta anche **Zona di taglio primaria** mostrato in figura 2.5a.

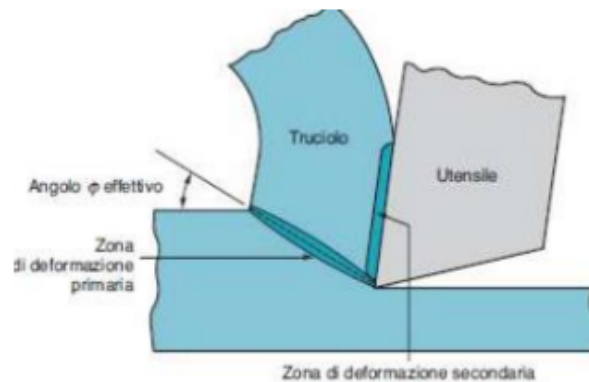
Inoltre si osserva una zona deformata plasticamente, per cui si presenta un incremento della resistenza pari a quasi 3 volte la durezza nominale del pezzo lavorato.

Analizzando il comportamento del truciolo si possono verificare delle situazioni, come illustrato in figura 2.5b:

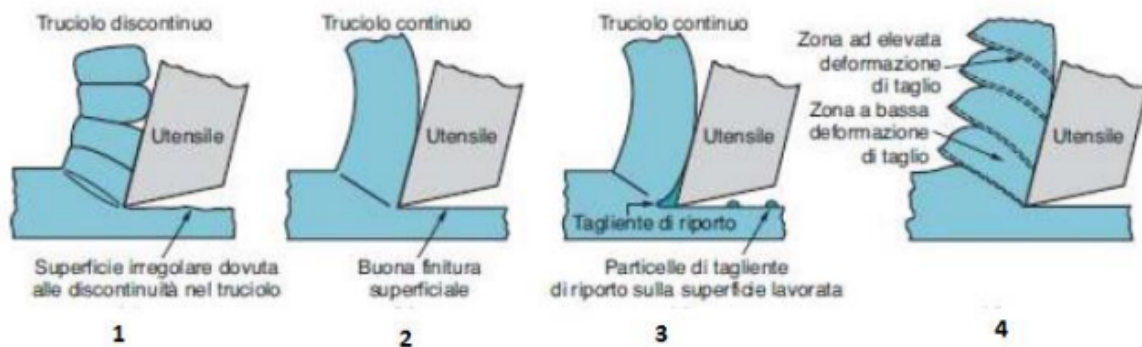
2.3.1 Truciolo continuo

Si verifica per velocità abbastanza basse. Come dice il nome Truciolo forma un continuo filamento di materiale. Risulta più semplice lubrificare la faccia dell'utensile, abbassando β come avevamo visto in precedenza per diminuire la dimensione del piano di taglio. Dunque la zona di taglio resta più sottile e la superficie uscirà dalla lavorazione con una finitura migliore.

Se da questa situazione si aumenta la velocità di lavorazione, si va a formare una zona detta: **tagliente di riporto**. Ciò è dovuto all'aumento della velocità con conse-



(a) Schematizzazione del taglio ortogonale realistico



(b) Tipologie di truciolo

Figura 2.5: Taglio ortogonale reale

guente formazione della zona di ristagno davanti alla faccia dell'utensile. In particolare il tagliente di riporto:

- α aumenta per via per effetto della zona di ristagno, per ciò si abbassa la forza di taglio.
- In qualche misura protegge la faccia dell'utensile.
- Può depositarsi sulla faccia del lavorato intaccandone la finitura superficiale.

Aumentando ulteriormente la velocità; la zona di taglio primario si assottiglia ulteriormente. Comincia ad instaurarsi il fenomeno dello *stiching*. Il fenomeno si deve principalmente al riscaldamento del materiale il quale crea adesione sulla faccia del tagliente. Sarà, dunque, necessario aumentare la forza di taglio.

Si può già intuire che la velocità di taglio sarà strettamente legata alla temperatura generata durante la lavorazione.

Rimanendo nel tema del truciolo continuo si può verificare una situazione di truciolo continuo ma ondulato

2.3.1.1 Truciolo continuo ondulato

È dovuto ad una variazione periodica nella forza di taglio. Possono esserci diversi motivi per cui si verifichi tale variazione:

- Superficie rugosa, limita lo scorrimento del tagliente.
- Presenza di vibrazioni autoeccitate: se le vibrazioni sono dovute a forti variazioni nella superficie di taglio.
- Distacchi del tagliente di riporto che va ad aderire alla superficie del materiale lavorato. Impone una maggiore forza perché l'utensile "deve" far aderire tale riporto sulla superficie.
- Vibrazioni forzate: generate dalla macchina e in genere dovute agli elementi elastici della macchina.
- Quando si rompe il tagliente di riporto, portandosi via anche un pezzo del tagliente vero e proprio.

Altra situazione particolare, di cui tenere nota, è la casistica in cui si forma il truciolo a dente di sega.

2.3.1.2 Truciolo continuo a dente di sega

Costituito da sezioni a diversa deformazione, la successione di zone spesse a bassa deformazione a zone fine di alta deformazione. Le cause di tale comportamento è da imputarsi a:

- bassa conduttività termica del materiale, per cui non riesce a smaltire il calore generato dalla lavorazione.
- Ciò spiega l'alternanza delle zone ad alta deformazione e bassa deformazione: le sezioni a bassa deformazione sono caratterizzate da un'alta temperatura relativa per cui l'utensile taglia più facilmente il materiale. Una volta asportata una sezione di materiale, viene automaticamente smaltito del calore "bloccato" nel materiale. Dunque la sezione successiva trova un calore minore, per cui il tagliente fa più fatica a tagliare e deforma di più il materiale. Per questo motivo le sezioni ad alta deformazione sono più fine.

Ultima casistica di truciolo, è quella del truciolo discontinuo.

2.3.2 Truciolo discontinuo

Si verifica in situazioni di velocità estremamente basse su macchine scadenti a bassa rigidità. Altre situazioni per cui si va ad avere truciolo discontinuo sono:

- Per materiali che contengono inclusioni e fasi secondarie che alzano le tensioni. Ciò provocano delle continue rotture di truciolo.
- Situazioni di stick-slip.

Sebbene il truciolo continuo sia ricercato per favorire una finitura superficiale migliore, spesso non è possibile tenere trucioli particolarmente lunghi. Durante la lavorazione un truciolo lungo può essere d'intralcio all'operatore e alla macchina.

Allora si ha la necessità di rompere il truciolo.

2.3.3 La rottura del truciolo

È particolarmente facile coi materiali fragili, più complicato per quei materiali duttili che tendono a formare dei trucioli continui. Allora si ricorre a opportuni **rompi-truciolo**, inserti che possono essere fissati all'utensile o già disegnati su esso, per favorire la rottura del truciolo ponendo ulteriore deformazione al materiale asportato. I rompi-truciolo hanno uno specifico valore efficace di rottura del truciolo dipendente dalla profondità dello spessore indeformato: questa è una caratteristica della forma e dimensione geometrica del rompi-truciolo. In figura 2.6 un dettaglio.

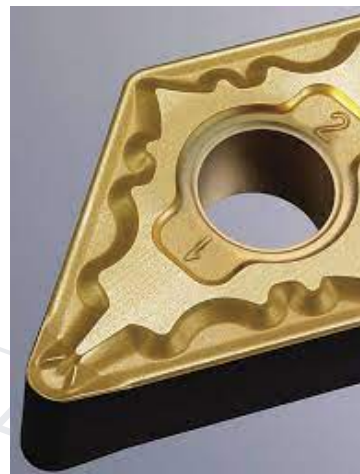


Figura 2.6: Esempi di rompi-truciolo

2.4 Taglio obliquo

Viene sfruttato maggiormente dalle aziende. Garantisce una lavorazione che necessita di maggiore forza per il taglio, ma la vita del utensile è più lunga.

A differenza del taglio ortogonale dove si veniva a formare un truciolo continuo a forma di spirale. Nel taglio obliquo si forma un truciolo a forma elicoidale, che ha una propria tendenza geometrica a spostarsi via dal punto di lavorazione. Si evita la necessità di rompere il truciolo, anche se è una pratica che comunque viene mantenuta. È opportuno definire un nuovo angolo di spoglia superiore.

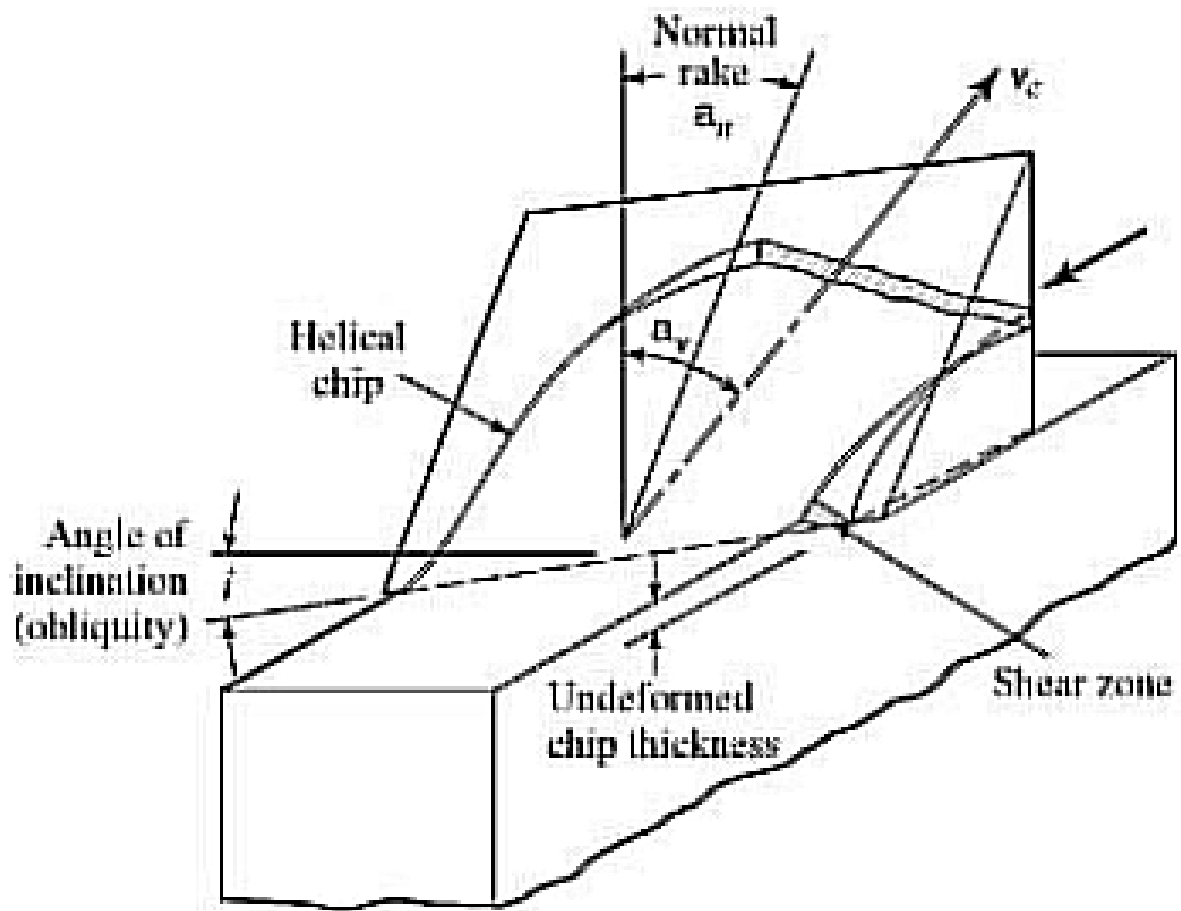
$$\alpha_e := \text{Angolo di spoglia efficace} \quad (2.12)$$

$$\alpha_n := \text{Angolo di spoglia normale} \quad (2.13)$$

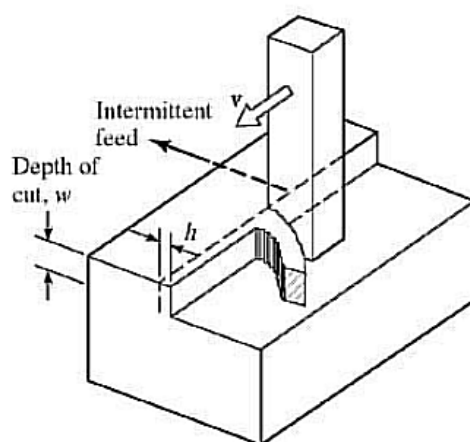
$$\text{In generale: } \alpha_e > \alpha_n \quad (2.14)$$

Vale che più il tagliente è inclinato, più aumenta α_e e di conseguenza F_c diminuisce.

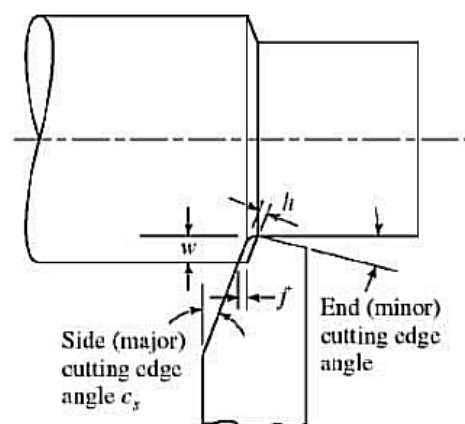
Nel caso in cui il tagliente non sia più grande del pezzo in lavorazione, lo spessore del truciolo indeformato non è più sufficiente a descrivere i fenomeni legati a questo. Dunque è necessario parlare di **avanzamento** f . Inoltre si introduce la **profondità di passaggio** w .



(a) Schema del taglio obliquo



(b) Parametri del taglio ortogonale per confronto



(c) Ulteriori parametri del taglio obliquo

Figura 2.7: Il taglio obliquo

2.4.1 Tornitura

Un esempio di tornitura è riportato alla figura 2.7c.

- utensile con tagliente inclinato
- f è ortogonale al tagliente e rappresenta l'avanzamento;
- w è la profondità di passata
- h è lo spessore di truciolo indeformato.

Con l'utensile inclinato si ha una maggiore forza necessaria al taglio, però si aumenta considerevolmente la durata dell'utensile. Indubbiamente la caratterizzazione del tagliente risulta più complicata. Si ha l'ulteriore vantaggio di avere un utensile che può presentare più taglienti.

2.4.2 Calcolo della forza ed energia

Siccome per via del tipo di lavorazione non siamo in grado di sfruttare la deformazione per flusso plastico a causa della velocità decisamente superiore. È decisamente importante sapere quanta energia o potenza è necessaria per effettuare la lavorazione. Perché tale potenza sarà quella che il motore della macchina deve fornire all'utensile.

A differenza della lavorazione per deformazione plastica in cui la "pressa" deve fornire una certa pressione per permettere la deformazione. Nell'asportazione si possono cambiare alcuni parametri in base anche punto della lavorazione si è. Continuando a lavorare il pezzo.

Resta evidente come la parametrizzazione della lavorazione sia definitivamente importante: in modo da garantire la continuazione della lavorazione, cambiando alcune condizioni senza interromperla. Anche per il fatto che fermando la lavorazione peggiora la finitura.

Nella definizione dell'energia necessaria si sa che si va a commettere un'errore di circa il 20%. Di fatto sarebbe necessario conoscere β , ma non è facile da valutare. Allora si può valutare la **pressione di taglio**.

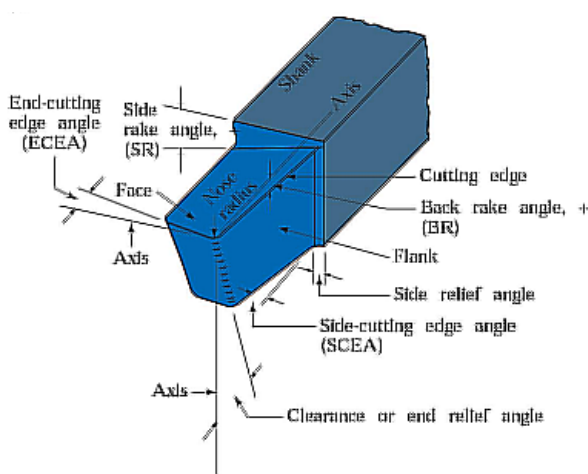


Figura 2.8: Esempio di utensile per tornitura

$$p_c = \frac{\overbrace{F_c}^{\text{Componente parallela alla velocità di taglio}}}{h \cdot w} \quad (2.15)$$

Per ottenere una forma di energia basta integrare la pressione o forza per la lunghezza del lavoro eseguito ovvero:

$$l := \text{lunghezza di taglio} \quad (2.16)$$

2.4.1 Definizione (Pressione ed energia di taglio specifica):

$$p_c = \frac{F_c}{h \cdot w} \quad (2.17a)$$

$$E_1 = p_c \cdot \frac{l}{l} [\text{Ws/m}^3] \quad (2.17b)$$

Dove p_c è la pressione specifica di taglio e E_1 è l'energia specifica.

2.4.2 Definizione (Fattore di rimozione): Si può definire anche il Fattore di rimozione del materiale:

$$k_1 = \frac{1}{E_1} \quad (2.18)$$

dove k_1 rappresenta la quantità di materiale asportato da una macchina a motore a potenza unitaria.

I 3 parametri non sono costanti per un materiale perché dipendono anche dai parametri di processo quali spessore di truciolo indeformato, angolo di spoglia e velocità di taglio. L'energia spesa nella zona di taglio primaria e la quantità di materiale rimosso sono proporzionali allo spessore di truciolo indeformato.

$$E = k \cdot h \cdot p \cdot l \quad (2.19)$$

Nella zona di taglio primaria la pressione specifica, l'energia specifica e il fattore di rimozione del materiale sono costanti del materiale. L'energia consumata sul dorso dell'utensile è indipendente dallo spessore di truciolo indeformato, possiamo ritenerla quasi costante. Quindi vale:

$$\frac{E_d}{h \cdot p \cdot l} \neq \text{cost.} \quad (2.20)$$

A questo punto si è definita una relazione in cui si può già definire la forza necessaria. C'è da tenere in considerazione l'usura dell'utensile: in quanto quest'ultima tende a richiedere una maggiore pressione da parte del tagliente per tagliare. Siccome l'usura del tagliente è un argomento che richiede la considerazione di diversi parametri e che tali non possono sempre essere determinati così facilmente. Semplicemente si aggiunge un 30% in più all'energia necessaria.

Ulteriori parametri derivati dai precedenti sono:

2.4.3 Definizione (Ulteriori Parametri): Sono delle derivazioni dei parametri visti precedentemente.

$$E = E_1 \left(\frac{h}{h_{\text{ref}}} \right)^a = E_1 \cdot h^a \quad (2.21)$$

Dove E è l'energia di lavorazione, $h_{\text{ref}} = 1\text{mm}$ è lo spessore indeformato di riferimento e $a \approx 0.3$. Da cui si può definire la potenza necessaria per la lavorazione:

$$\text{Power}(W) = \frac{E \cdot V_t}{\eta} \quad (2.22)$$

Dove V_t è la velocità di taglio, η il rendimento della macchina. Da cui si può ottenere la forza necessaria per il taglio:

$$F_c = \frac{\text{Power}(W)}{v} \quad (2.23)$$

2.4.3 Temperature

Siccome la lavorazione prevede di "muovere" del materiale dentro se stesso questo provoca un accumulo di energia danti alla faccia dell'utensile. Tale energia rimane nella maggior parte nel truciolo.

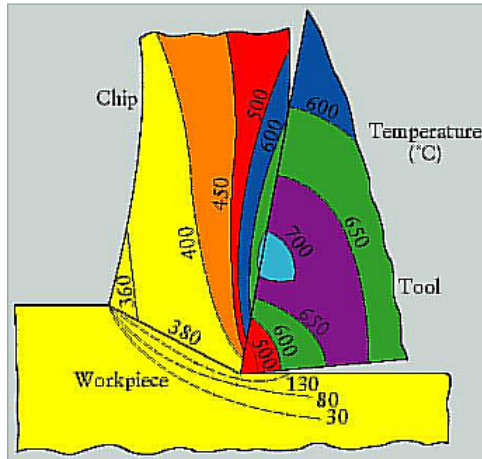


Figura 2.9: Analisi termica dell'asportazione di truciolo

Come si vede dalla figura 2.9, le temperature raggiunte non sono da trascurare: si può arrivare a $\approx 1000^\circ\text{C}$ sulla faccia dell'utensile. Sappiamo che con l'aumento della temperatura, aumentano il numero di dislocazioni interne al materiale che diventa più duttile dunque più facile da lavorare.

La maggior parte dell'energia resta interna al truciolo che, portando con se del calore, abbassa la temperatura del lavorato. Resta il calore trasferito all'utensile, il quale tende ad aumentare la temperatura considerevolmente. Infatti, come si vede proprio dalla figura 2.9, è proprio l'utensile a mostrare le temperature più alte. Ciò impone che il materiale dell'utensile debba essere di un materiale alto resistente a caldo.

Come fatto in precedenza, si è cercato di relazionare la temperatura con la velocità di lavorazione: legame che fisicamente è noto ma non così facile da porre analiticamente.

$$T_t = E_1 \left(\frac{v \cdot h}{k \cdot \rho \cdot c} \right)^{1/2} \quad (2.24)$$

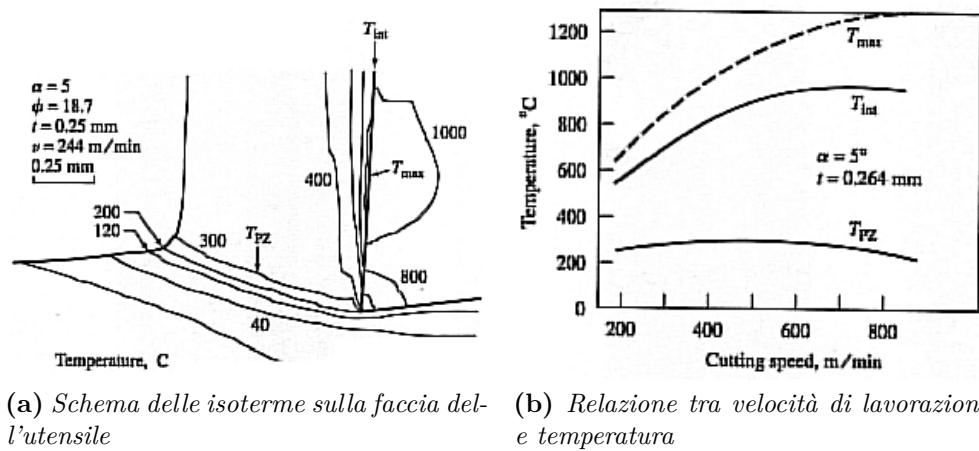


Figura 2.10: Temperature durante le lavorazioni ad asportazione

Dove:

- E_1 Energia specifica
- v Velocità di taglio
- h Spessore di truciolo indeformato
- k Conduttività termica
- ρ Densità
- c Calore specifico

Se ne ottiene una stima della temperatura media sulla faccia dell'utensile. Come spesso succede nei sistemi fisici reali, tutta l'energia donata dalla macchina al materiale viene trasformata in calore. Indubbiamente durante le lavorazioni non si deve superare la temperatura di fusione del materiale lavorato: altrimenti si va ad ottenere una lavorazione molto grossolana di cui non si riesce a controllarne i parametri. I materiali a bassa fusione risultano più facili da lavorare. Inoltre, per lavorazioni di finitura particolarmente restrittive, bisogna considerare le variazioni dimensionali dovute alla dilatazione termica.

2.4.4 Fluidi da taglio