



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 Sinterizzazione	12
2.1 La lavorazione	12
2.1.1 Produzione delle polveri	13
3 Lavorazioni per asportazione di truciolo	14
3.1 Introduzione	14
3.2 Taglio ortogonale ideale	15
3.2.1 Fattore di attrito	18

3.2.2	Valutazione delle forze	18
3.3	Taglio ortogonale realistico	22
3.3.1	Truciolo continuo	22
3.3.1.1	Truciolo continuo ondulato	24
3.3.1.2	Truciolo continuo a dente di sega	24
3.3.2	Truciolo discontinuo	24
3.3.3	La rottura del truciolo	25
3.4	Taglio obliquo	25
3.4.1	Tornitura	27
3.4.2	Calcolo della forza ed energia	27
3.4.3	Temperature	29
3.4.4	Fluidi da taglio	30
3.5	Lavorazioni al trapano	32
3.5.1	Tipologie di trapani	34
3.6	Fresatura	34
3.6.1	Fresatura periferica	35
3.6.2	Fresatura verticale	35
3.6.2.1	Fresa a codolo	36
3.7	Brocciatura e taglio di filetti	36
3.7.1	La brocciatura	36
3.7.2	Filettature	37
3.8	Produzione di ingranaggi	37
4	Variabili di processo per lavorazioni in asportazione di truciolo	39
4.0.1	Durata lavorazione e potenza macchina	40
4.0.1.1	Esempio applicativo	41
5	Macchine Utensili	42
A	Acronimi	43

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	Processi di produzione in sinterizzazione	13
3.1	Taglio Ortogonale	16
3.2	Scomposizione delle forze per il taglio ortogonale	19
3.3	Andamenti delle forze per il taglio ortogonale	21
3.4	Tipologia di forze premententi sulla faccia dell'utensile	22
3.5	Taglio ortogonale reale	23
3.6	Esempi di rompi-truciolo	25
3.7	Il taglio obliquo	26
3.8	Esempio di utensile per tornitura	27
3.9	Analisi termica dell'asportazione di truciolo	29
3.10	Temperature durante le lavorazioni ad asportazione	30

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
Figure: 3.5 (4) Tipologie di lavorazioni al trapano	32
Figure: 3.5 (5) Tipologie di punte	32
Figure: 3.5 (6) Inserire Tipologie di punte per foratura.	33
Figure: 3.5 (7) Figura con meccchie, svaso ecc	33
Figure: 3.5 (8) Aggiungere tabella con le velocità consigliate.	34
Figure: 3.5 (9) Tipologie di trapani	34
Figure: 3.6 (10) Inserire figura della fresatrice orizzontale	34
Figure: 3.7 (11) Utensile broccia.	37
Figure: 3.7 (12) utensili per filettature.	37
Figure: 3.8 (13) Possibili lavorazioni per gli ingranaggi.	38
■ 4.0 (14)	
Inserire aspetti da considerare	39
Figure: 4.0 (15) Grafico relazione durezza-temperatura-velocità	39
■ 4.0 (16)	
Sulla figura inserire anche il cartiglio per via delle descrizione delle diverse curve	39
Figure: 4.0 (17) Grafico relazione durezza-temperatura-velocità materiali non ferrosi	39
■ 4.0 (18)	
riferimenti figure	40
Figure: 4.0 (19) Costruire tabella coi riferimenti oppure inserire la figura	40
■ 4.0 (20)	
Vedi la descrizione della tabella	40
■ 4.0 (21)	
verifica	40

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;

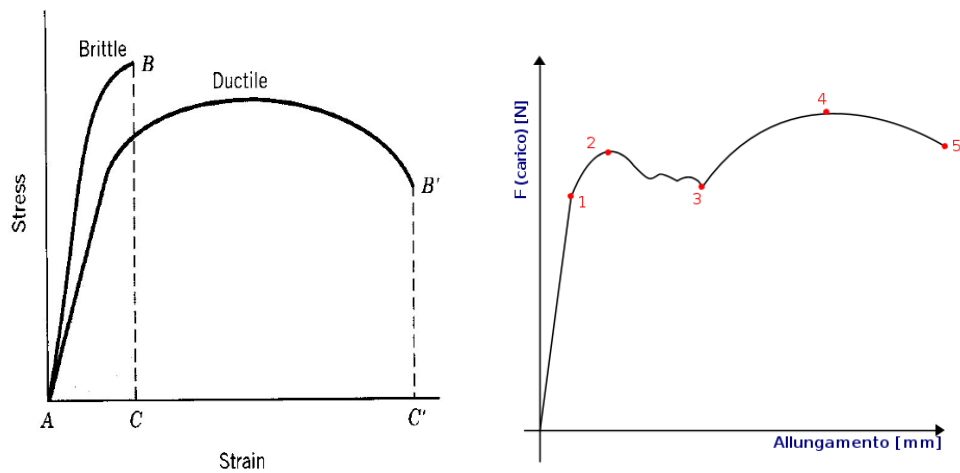
Di queste, le prime 3 provocano compressione nel materiale che, dunque, permettono al materiale metallico di mantenere le caratteristiche meccanico-fisiche. Essendo comunque compresso, il materiale risulta più duttile. Per quanto riguarda invece la trafilatura, in questo caso si ha una trazione del materiale. 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:

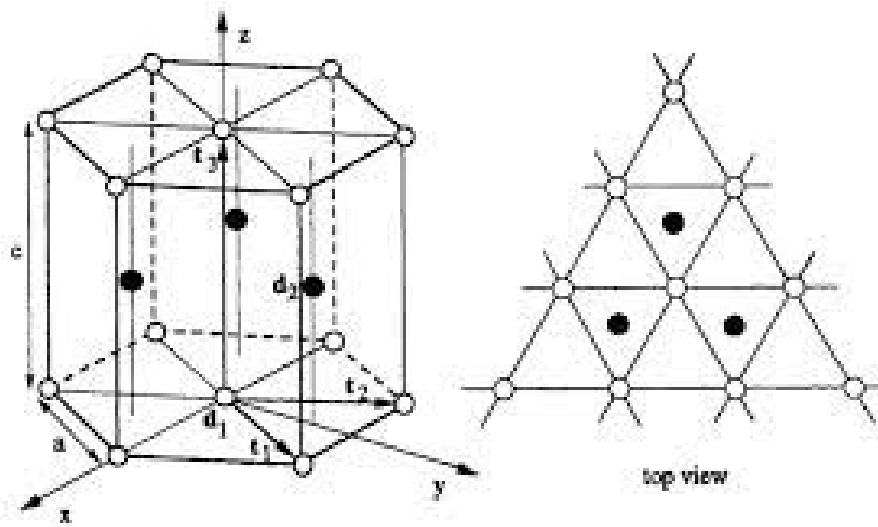


Figura 1.2: Esagonale compatto

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.

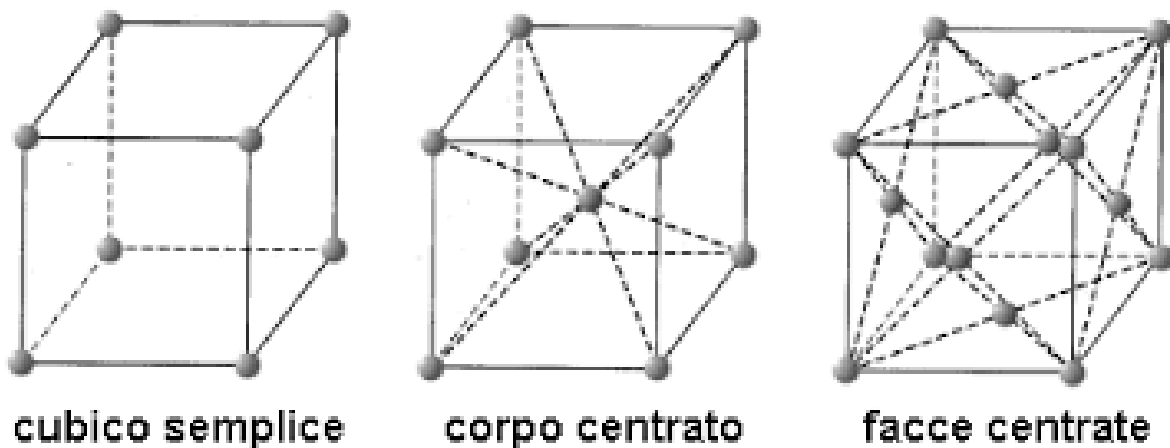



Figura 1.3: Reticoli cubici

1.2.1.2 Reticolo cubico

Per i metalli cristallizzanti a Cubico a Facce Centrate (CFC) si osserva un valore di $r \approx 0.4 \div 0.8$. Mentre per i metalli a Cubico a Corpo Centrato (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 all'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

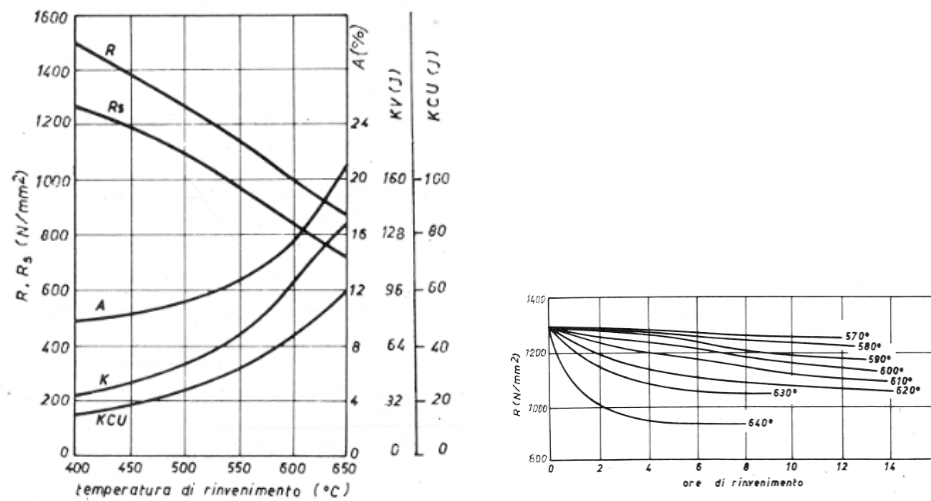
Come visto nell'equazione costitutiva 1.3, il materiale viene univocamente definito tramite tale equazione. In realtà è necessario "mettere in relazione" anche il tempo. Considerando l'equazione costitutiva per lavorazione a caldo:

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

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.

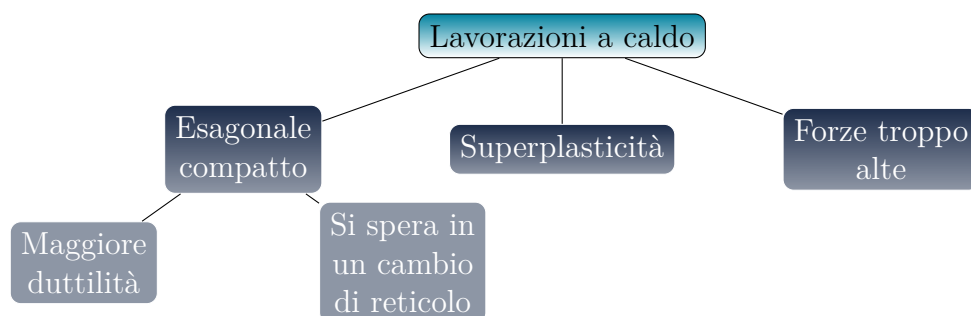


Figura 1.5: Motivazioni delle lavorazioni a caldo

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

Sinterizzazione

Permette di realizzare oggetti a partire da polveri di un materiale.

Perché sfruttare la sinterizzazione?

I motivi sono molteplici e possono essere:

- controllo accurato della struttura richiesta;
- controllo della composizione chimica;
- formabilità;
- Quando non si vogliono macrosegregazioni;
- realizzare dei componenti in materiali con temperatura di fusione particolarmente alta.

A differenza di altre lavorazioni è necessario parametrizzare la forma delle polveri, in quanto da quei parametri si possono ottenere le caratteristiche meccaniche del lavorato finale. Inoltre la forma della polvere può essere determinante sulla lavorazione.

Per i prodotti lavorati in sinterizzazione si parla di **Net-Shape**: ovvero, la lavorazione porta dei semilavorati già molto vicini alla forma finale di vendita del prodotto. Ciò permette di usare tutto il materiale, senza avere sprechi dovuti a delle lavorazioni che per ottenere la forma finale, devono eliminare parte di esso.

Data la lavorazione è possibile controllare la porosità del prodotto come si vedrà successivamente. In generale non si ottengono particolari caratteristiche meccaniche anche se alle volte si possono ottenere delle caratteristiche migliori di altre lavorazioni già viste.

Bisogna prestare attenzione al discorso della porosità: troppa porosità residua può essere punto di fragilità del materiale portando alla formazione di cricche. In più non sono facili da lavorare in post-produzione. Quindi il processo di produzione deve essere near net-shape il più possibile.

2.1 La lavorazione

Alla figura 2.1 sono riportati i principali possibili processi per le lavorazioni di sinterizzazione.

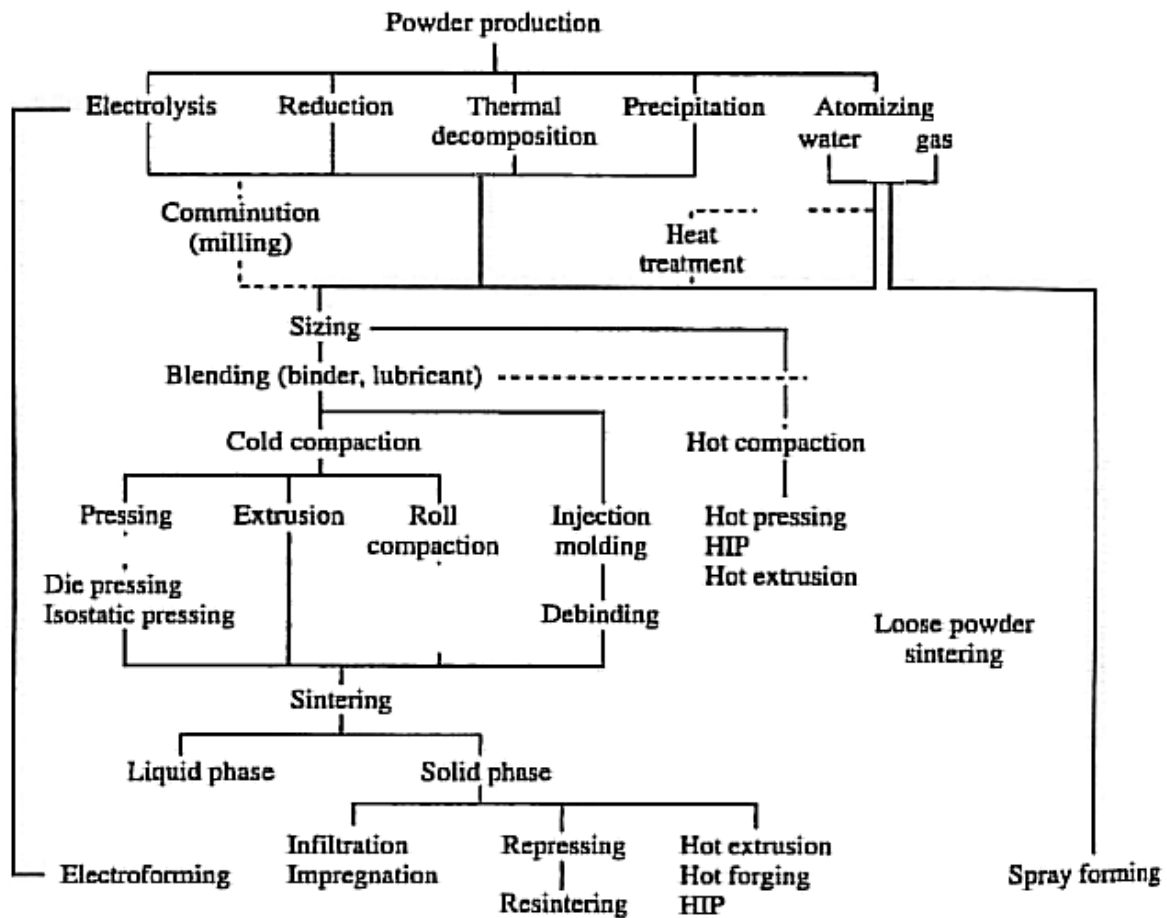


Figura 2.1: Processi di produzione in sinterizzazione

In generale il processo di sinterizzazione deve passare attraverso tre principali processi:



Sarà anche la la sequenza delle trattazioni successive.

2.1.1 Produzione delle polveri

CAPITOLO 3

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.

3.1 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 3.1 sono riportati alcuni vantaggi e svantaggi di tali lavorazioni.

Esempio. 3.1.1: 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.

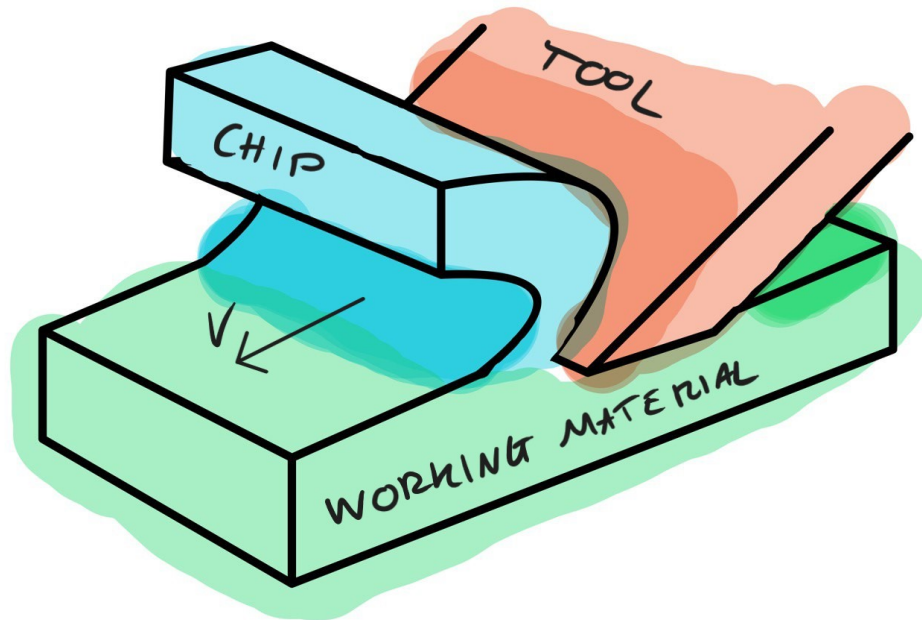
In industria, vengono relegate ad operazioni di finitura del prodotto, dove con una singola passata si cerca di completare il prodotto e metterlo sul mercato. Per l'artigianato invece si ha un utilizzo più intensivo, dove con una passata si cerca di ottimizzare la quantità di materiale asportato.

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

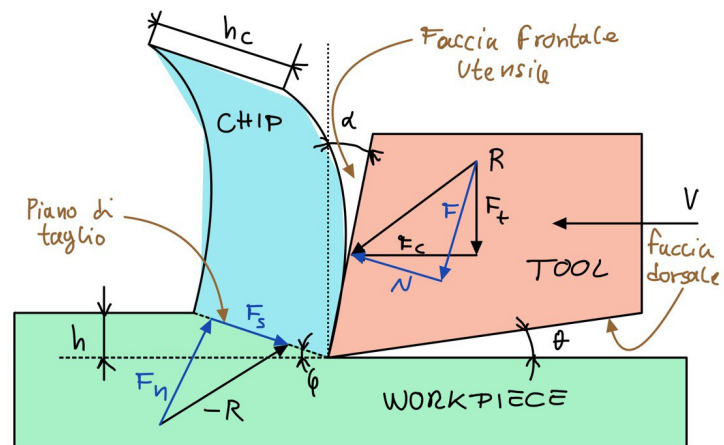
3.2 Taglio ortogonale ideale

Alla figura 3.1 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 3.2.



(a) Visualizzazione del taglio ortogonale



(b) Parametri del taglio ortogonale

Figura 3.1: Taglio Ortogonale

3.2.1 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:

$$r_c = \frac{h}{h_c} = \frac{l_c}{l} := \text{Rapporto di taglio} \quad (3.1)$$

Dove:

l_c è la lunghezza del truciolo

l è la lunghezza del taglio

Mentre:

$$F = K \cdot A \quad (3.2)$$

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 3.1b; 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

$$\tan \phi = \frac{r_c \cos \alpha}{1 - r_c \sin \alpha} \quad (3.3)$$

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:

$$\dot{\gamma} = \frac{v_s}{d} = \frac{\cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \frac{v}{d} [s^{-1}] \quad (3.4)$$

nella tecnica, si osservano i seguenti valori:

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

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

3.2.1 Fattore di attrito

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

$$\mu = \frac{\tau_i}{p} \quad (3.5)$$

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 (3.5) non descrive completamente il comportamento. Si è sviluppato un **fattore di attrito** adatto a tale fenomeno:

$$m = \frac{\tau_i}{K} \quad (3.6)$$

Dove K è la tensione tangenziale all'interfaccia truciolo-utensile. Nella pratica viene preferito il fattore descritto dalla (3.6) perché più facile da calcolare. Oltre al fatto che permette di descrivere correttamente il fenomeno dello sticking.

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

3.2.2 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 3.2. 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:

$$\begin{cases} F_c = R \cos(\alpha + \psi) & \text{Forza di taglio} \\ F_t = R \sin(\alpha + \psi) & \text{Forza di spinta dell'utensile} \end{cases} \quad (3.7)$$

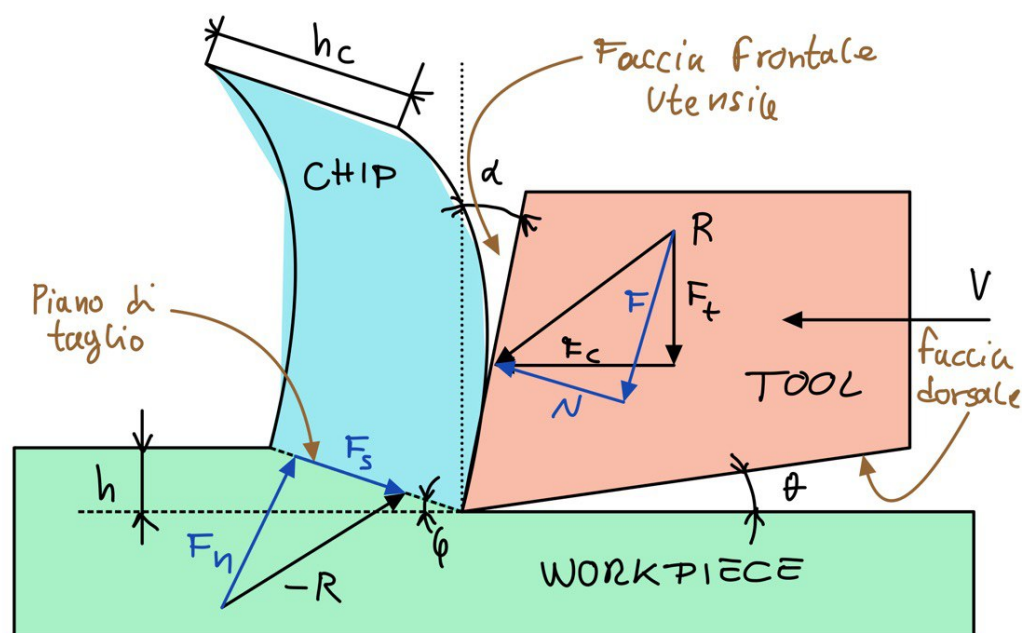


Figura 3.2: Scomposizione delle forze per il taglio ortogonale

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 3.2.

$$\begin{cases} N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \\ F = F_c \sin \alpha - F_t \cos \alpha \end{cases} \quad (3.8)$$

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

$$\beta = \frac{F}{N} \approx \mu \quad (3.9)$$

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.

$$F_s = k \cdot A \quad (3.10)$$

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:

$$\phi = 45^\circ - \frac{1}{2}(\beta - \alpha) \quad (3.11a)$$

$$\phi = 45^\circ - (\beta - \alpha) \quad (3.11b)$$

Sebbene indichino la relazione degli stessi parametri con due relazioni differenti (3.11), entrambe hanno uno scopo preciso e nascono da considerazioni differenti.

(3.11a) Si sviluppa partendo dalla considerazione che il sistema tenda a consumare la minima energia.

(3.11b) 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 3.3.(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

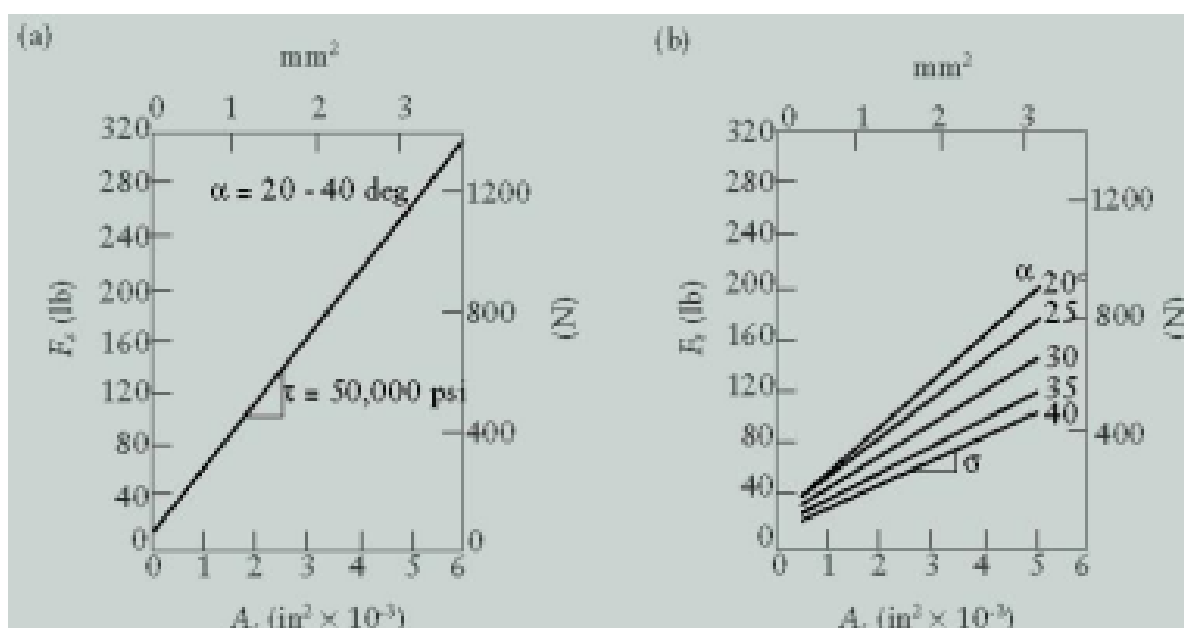


Figura 3.3: Andamenti delle forze per il taglio ortogonale

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 3.3.(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 3.4 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 .

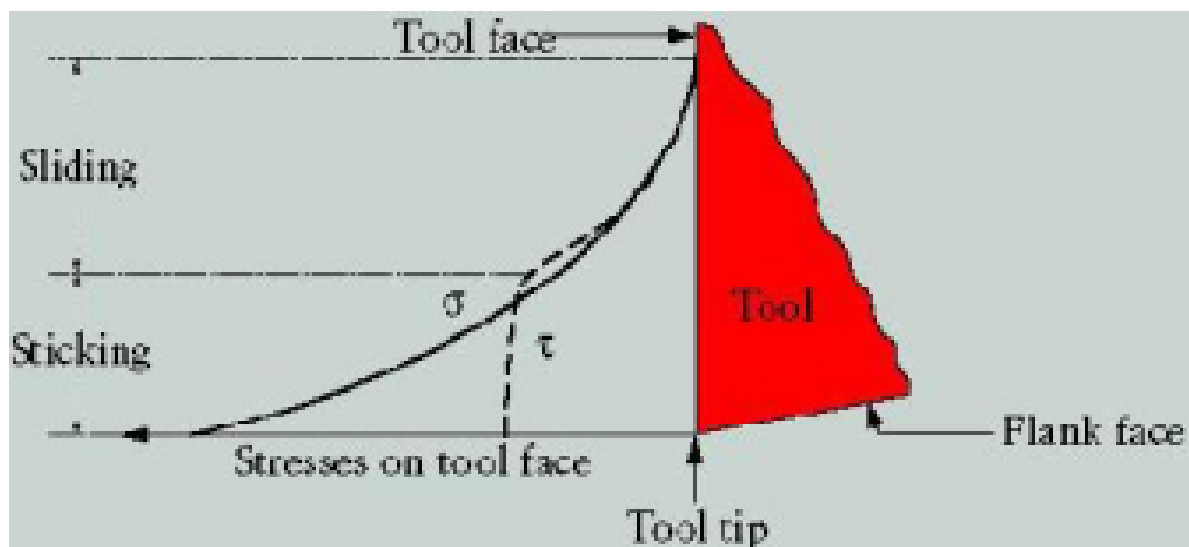


Figura 3.4: Tipologia di forze prementi sulla faccia dell'utensile

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.

3.3 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 3.5a.

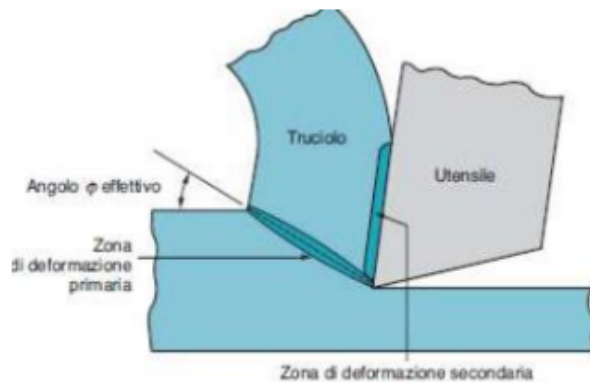
Inoltre si osserva una zona deformata plasticamente, per cui si presenta un incremento della resistenza pari a quasi 3 volte la durezza nominale del pezzo lavorato.

Analizzando il comportamento del truciolo si possono verificare delle situazioni, come illustrato in figura 3.5b:

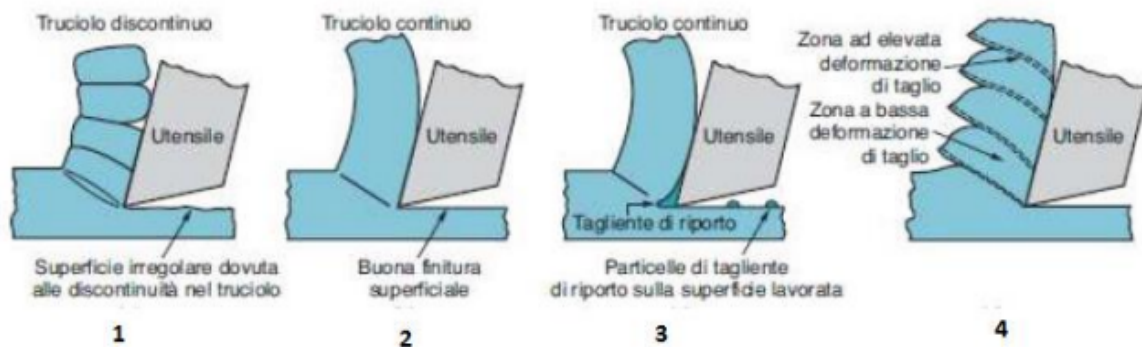
3.3.1 Truciolo continuo

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 3.5: 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

3.3.1.1 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.

3.3.1.2 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.

3.3.2 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.

3.3.3 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 3.6 un dettaglio.

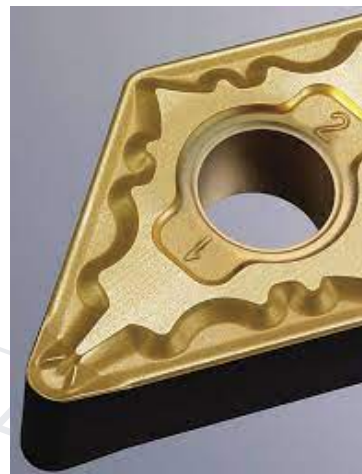


Figura 3.6: Esempi di rompi-truciolo

3.4 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.

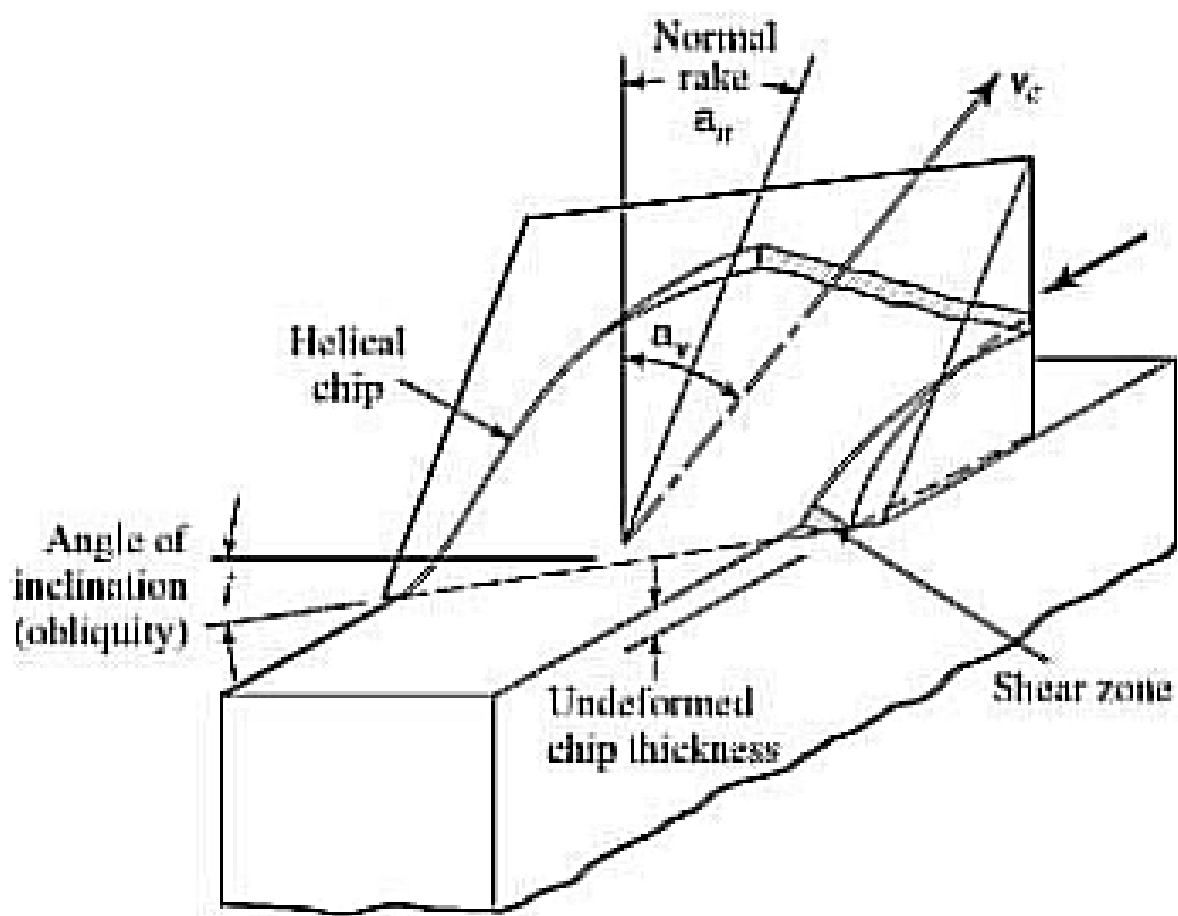
$$\alpha_e := \text{Angolo di spoglia efficace} \quad (3.12)$$

$$\alpha_n := \text{Angolo di spoglia normale} \quad (3.13)$$

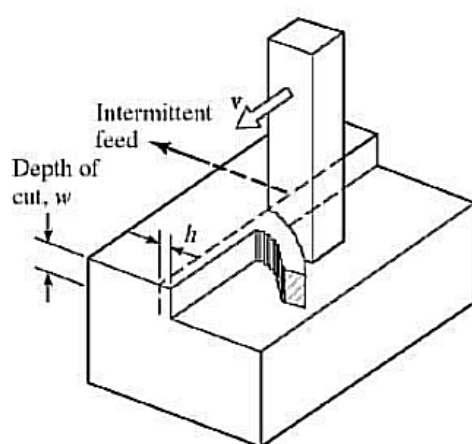
$$\text{In generale: } \alpha_e > \alpha_n \quad (3.14)$$

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

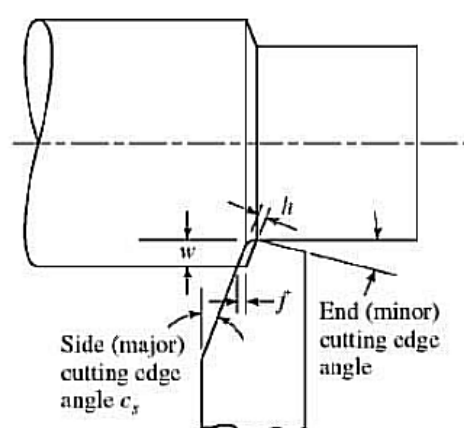
Nel caso in cui il tagliente non sia più grande del pezzo in lavorazione, lo spessore del truciolo indeformato non è più sufficiente a descrivere i fenomeni legati a questo. Dunque è necessario parlare di **avanzamento** f . Inoltre si introduce la **profondità di passaggio** w .



(a) Schema del taglio obliquo



(b) Parametri del taglio ortogonale per confronto



(c) Ulteriori parametri del taglio obliquo

Figura 3.7: Il taglio obliquo

3.4.1 Tornitura

Un esempio di tornitura è riportato alla figura 3.7c.

- 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.

3.4.2 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**.

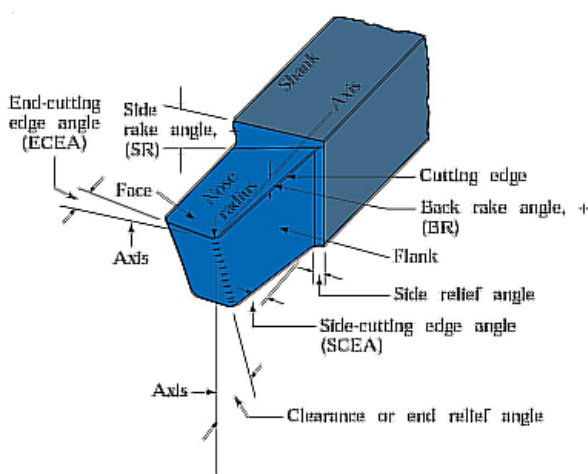


Figura 3.8: Esempio di utensile per tornitura

$$p_c = \frac{\overbrace{F_c}^{\text{Componente parallela alla velocità di taglio}}}{h \cdot w} \quad (3.15)$$

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

$$l := \text{lunghezza di taglio} \quad (3.16)$$

3.4.1 Definizione (Pressione ed energia di taglio specifica):

$$p_c = \frac{F_c}{h \cdot w} \quad (3.17a)$$

$$E_1 = p_c \cdot \frac{l}{l} [\text{Ws/m}^3] \quad (3.17b)$$

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

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

$$k_1 = \frac{1}{E_1} \quad (3.18)$$

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.

$$E = k \cdot h \cdot p \cdot l \quad (3.19)$$

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:

$$\frac{E_d}{h \cdot p \cdot l} \neq \text{cost.} \quad (3.20)$$

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:

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

$$E = E_1 \left(\frac{h}{h_{\text{ref}}} \right)^{-a} = E_1 \cdot h^{-a} \quad (3.21)$$

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:

$$\text{Power}(W) = \frac{E \cdot V_t}{\eta} \quad (3.22)$$

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

$$F_c = \frac{\text{Power}(W)}{v} \quad (3.23)$$

3.4.3 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.

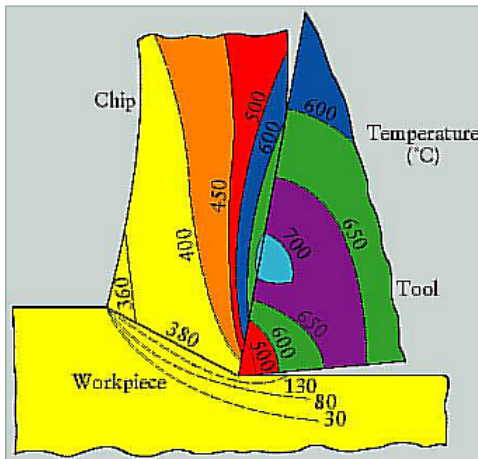


Figura 3.9: Analisi termica dell'asportazione di truciolo

Come si vede dalla figura 3.9, 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 3.9, 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.

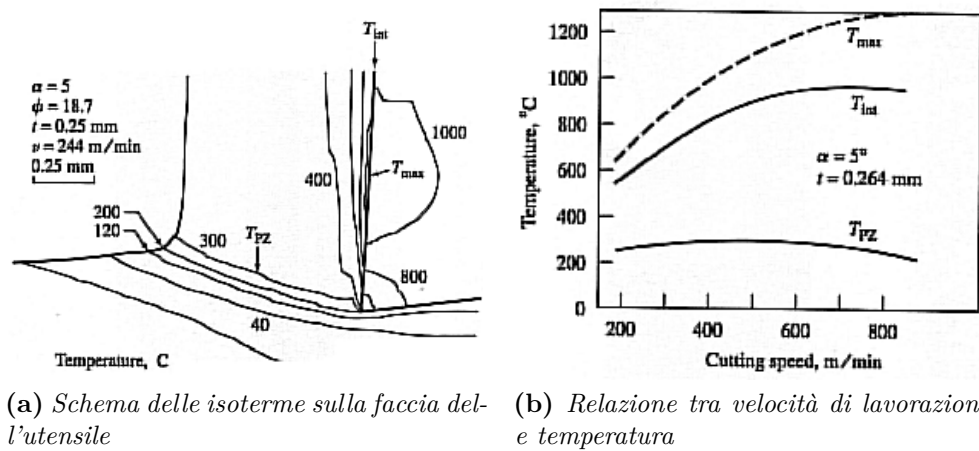


Figura 3.10: Temperature durante le lavorazioni ad asportazione

$$T_t = E \left(\frac{v \cdot h}{k \cdot \rho \cdot c} \right)^{1/2} \quad (3.24)$$

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.

3.4.4 Fluidi da taglio

In industria ed artigianato, queste lavorazioni vengono spesso effettuate con l'assistenza dei fluidi da taglio. Questi hanno diverse funzioni per la lavorazione, tipo:

Lubrificazione si cerca di abbassare l'attrito nella lavorazione, per favorire un'asportazione più agile. Il problema sta nel portare il fluido nella zona di lavorazione, impedito dal movimento del truciolo. Perciò aumentando la velocità di lavorazione si ha una lubrificazione meno efficace.

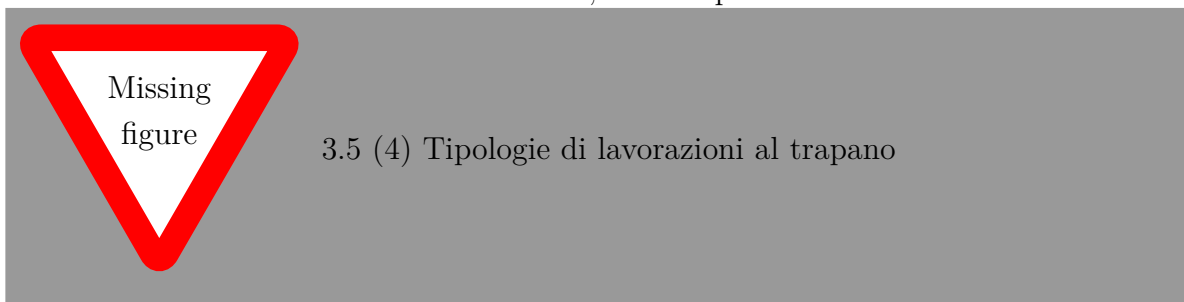
Raffreddamento Diminuendo la temperatura sulla faccia dell'utensile si può lavorare a velocità più alte. Al contempo questo rappresenta un problema: se l'utensile non è costantemente immerso nel materiale, il raffreddamento potrebbe diventare uno shock termico per via delle forti variazioni di temperature.

Rimozione del truciolo Utilizzando dei sistemi ad alta pressione si possono sfruttare gli utilizzi precedenti mentre si spostano i trucioli dalla zona di lavorazione.

CONFIDENTIAL

3.5 Lavorazioni al trapano

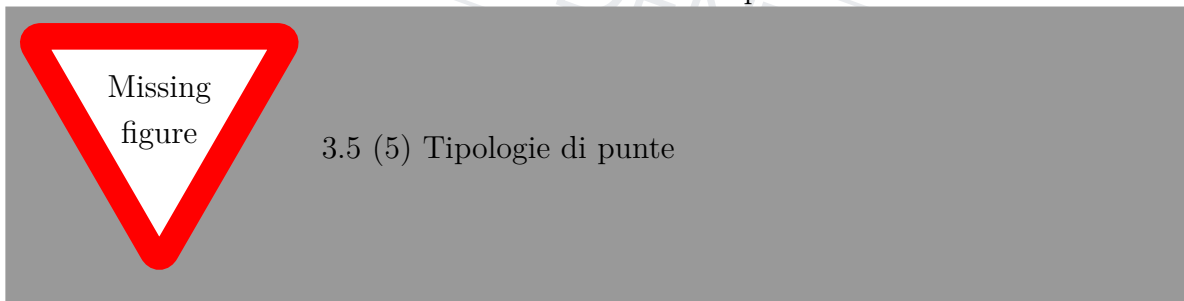
È una macchina utensile molto diffusa. In realtà realizza una sola lavorazione: crea dei fori. Data la necessità di creare dei fori, se ne capisce la fundamentalità.



dalla figura si può vedere che esistono diverse punte da trapano. Si può già fare un confronto tra le punte da trapano e gli utensili monotagliente visti per il tornio. In genere l'utensile monotagliente tende a flettere parecchio, mentre nelle punte da trapano le forze sono bilanciate per via della forma del tagliente. In più le punte presentano delle scanalature elicoidali che dovrebbero assolvere a due funzioni:

- rimuovere il truciolo dalla zona di taglio
- favorire la lubbrificazione del tagliente

In realtà non fanno correttamente nessuna delle due operazioni.



Nella foratura le forze sono bilanciate. Più importante è da considerare: Man mano che ci si avvicina all'asse della punta i taglienti lavorano ad una velocità di taglio minore, per cui la finitura superficiale peggiora. È per questo motivo che i taglienti delle punte da trapano non arrivano al centro della punta. Dunque la punta è realizzata con forma conica in modo tale da spostare il materiale in lavorazione verso le zone di lavorazione laterali. Insomma funge da scalpello allontanando il materiale dall'asse di rotazione. Saranno dopo i taglienti ad asportarlo effettivamente. Tra l'altro, la forza per spostare il materiale è la maggiore parte di forza utilizzata per tale lavorazione. Infatti di solito si utilizza prima una foratura più fina per una prima asportazione, poi viene eseguita la foratura principale che porta il foro alla dimensione desiderata.

Ovviamente lo scalpello della punta si usura e dunque si dovrà applicare maggiore forza alla punta. Per cui la forma dello scalpello si è evoluta in modo da rendere minore la forza di spinta da applicare alla punta. IN più sulle scanalature elicoidali sono presenti delle scanalature ulteriori che fungono da rompitruciolo.

Ulteriore problematica è quella dello spostamento dell'asse della punta. Allora si utilizza una punta da centri per "indicare" alla punta da trapano la direzione di foratura.

L'angolo dell'elica rappresenta l'angolo di spoglia periferica della punta. L'angolo di spoglia diminuisce avvicinandosi al centro della punta. Per favorire lo spostamento del truciolo, spesso si utilizzano delle punte con angolo d'elica particolarmente elevato.



3.5 (6) Inserire Tipologie di punte per foratura.

Dove c'è dello spazio grigio indica il fatto che si deve eseguire un prima foratura prima di usare quell'utensile.

1. Punta da trapano classica;
2. Va usato dopo l'utensile precedente e semplicemente allarga il foro
3. Realizza un foro a due diametri detta anche *step-drilling*
4. Realizza un gradino su un foro già realizzato, viene detta anche *lamatura*
5. Stesso obbiettivo della precedente *Utensile a lamare*
6. stesso del precedente *Utensile a svasare*
7. Utensile di *alesatura* va semplicemente a rifinire il foro fatto in precedenza.
8. Punta da centri, realizza un piccolo foro per guidare la punta da trapano.
9. È un utensile utilizzato in particolare per lavorazioni su lamiera.

In generale le punte da trapano sono degli utensili di materiali monoblocco. Esistono anche delle punte da trapano che presentano degli inserti. Certo si hanno dei fori un po' maggiori per via delle dimensioni degli inserti. Eventualmente si ricorre a dei trattamenti termochimici per aumentare la durata della punta.

Ulteriori utensili sono mostrati in figura



3.5 (7) Figura con mecchie, svaso ecc

Le Mecchie sono utilizzate per realizzare fori di piccola profondità. Le macchine di forma conica permettono di realizzare dei fori in base alla profondità a cui si spinge la punta a diametro variabile. Spesso usate per lavorazioni su lamiera.



3.5 (8) Aggiungere tabella con le velocità consigliate.

3.5.1 Tipologie di trapani



3.5 (9) Tipologie di trapani

Le punte da alesaggio hanno scanalature piccole, questo perché si ha meno materiale da rimuovere, in più si ha una maggiore rigidità dell'utensile per via del maggiore spessore del centro. In generale gli utensili alesatori hanno angoli di elica molto piccoli o addirittura cilindriche.

3.6 Fresatura

È la lavorazione più versatile che si può fare in officina, permette di realizzare la più grande varietà di forme. Un esempio è quello della fresatrice orizzontale: determinato dall'asse di rotazione dell'utensile.



3.6 (10) Inserire figura della fresatrice orizzontale

L'utensile può presentare taglienti elicoidali sia cilindrici. Siccome la varietà di lavorazioni è alta, anche la gamma di utensili è piuttosto ampia.

L'evoluzione della lavorazione ha portato al fatto che gli utensili non sono sostenuti da due "cerniere". Piuttosto si utilizzano utensili fissati a singolo punto. Il tipo ideale di fresatura si chiama *fresatura periferica*.

3.6.1 Fresatura periferica

Come anticipato, l'utensile può essere ad elica o a scanalature cilindriche. In genere si preferisce il tagliente a d elica perché subisce meno urti e si possono avere più taglienti immersi sul materiale contemporaneamente. Le eliche possono essere in concordanza o opposizione. La differenza, oltre che alle direzioni di lavorazione e alimentazione sta anche nel metodo di asportazione. Infatti nella lavorazione in concordanza il tagliente incontra immediatamente la superficie del lavorato. Ciò provoca urti più alti al tagliente e in potrebbe incontrare pure degli ossidi che rendono il materiale più duro. Mentre la lavorazione in opposizione presenta un problema di deformazione elastica: siccome lo spessore indeformato è nullo, il tagliente andrà a schiacciare il materiale andandolo a subire il successivo comportamento elastico.

In generale si sfrutta la fresatura in concordanza nel caso in cui si predilige una migliore finitura superficiale e il materiale non è stato trattato a caldo: per cui non presenta ossidi superficiali che potrebbero consumare molto rapidamente i taglienti. Altrimenti si sfrutta la fresatura in opposizione al netto delle peggiori tolleranze dimensionali ottenibili per via del ritorno elastico e la maggiore rigidità della macchina necessaria per via dello scambio di forze che si va a verificare durante la lavorazione.

La lavorazione in definitiva viene detta anche *spianatura*. A differenza di quanti visto per la piallatrice o l'alatrice, la lavorazione risulta più veloce in quanto non è necessaria la corsa di ritorno e l'utensile può essere parecchio largo.

La spianatura può essere realizzata anche tramite utensile a sbalzo monotagliente.

3.6.2 Fresatura verticale

In questo caso si ha l'asse dell'utensile in verticale rispetto al lavorato. Attenzione che l'utensile è a sbalzo e non più fissato a due punti, quindi generalmente più rigido. Può essere che queste macchine sfruttino una tecnologia ibrida per cui possono realizzare sia lavorazioni in verticale che in orizzontale.

Come mai si preferisce un'utensile a sbalzo rispetto ad uno più rigido magari fissato in due punti?

È più facile cambiare utensile e può essere fatto automaticamente. Anche l'accessibilità alla zona di lavoro non è da sottovalutare. L'affermazione di tali macchinari è, dunque, puramente pratico. Per cui si preferisce che l'utensile sia a sbalzo.

3.6.2.1 Fresa a codolo

La fresa a codolo è molto simile ad un trapano, ma la punta non presenta lo scalpello in virtù del fatto che l'elica non ha lo scopo di effettuare una foratura. Bensì l'elica ha lo scopo di evitare degli urti del tagliente che teoricamente potrebbe essere perfettamente cilindrico. la tipica lavorazione di questa macchina è l'ottenimento di oggetti a piani paralleli. Si ottengono dei gradini per via della lavorazione a piani paralleli, quindi sarà necessaria una successiva passata di finitura per ottenere una forma continua. Tra l'altro, i piani non per forza devono essere orizzontali, possono essere anche verticali o a diversa inclinazione. Indubbiamente l'automazione di queste macchine è fondamentale. Le quali possono realizzare delle forme che non sarebbero ottenibili con altre macchine. In generale macchine ad alta automazione vengono anche chiamate *centro di lavoro*. Sono delle macchine ad alta automazione che uniscono i vantaggi delle principali lavorazioni per asportazione di truciolo. Realizzano lavorazioni su tutte e 5 le facce del pezzo (La faccia di riferimento è quella appoggiata al portapezzo). In inglese Flexible Manufacturing Systems (FMS).

Una prodotto tipico di queste lavorazioni sono gli stampi.

Il controllo numerico

Asse controllato quando di quell'asse se ne può controllare posizione e velocità

Quanti assi controllati per ogni tipo di lavorazione?

Per il trapano ad esempio è sufficiente un solo asse, l'avanzamento della punta. Per il tornio ne bastano due: uno in direzione ortogonale all'asse di rotazione del pezzo e uno in direzione parallela. Per la fresatrice invece sono 3.

Negli assi mandrino, si controllano solamente la velocità quindi non viene considerato come asse controllato.

Quando si parla di macchine a più assi (4,5) si possono avere delle rotazioni dell'utensile. Eventualmente si possono sfruttare degli utensili a testa sferica (opportunamente inclinati per non avere velocità nulle sull'asse di rotazione).

3.7 Brocciatatura e taglio di filetti

3.7.1 La brocciatatura

si ha sempre un'utensile di forma, di cui se ne controlla solo il moto primario. Ciò è possibile perché l'avanzamento viene realizzato per cui sarà il tagliente ad avanzare autonomamente. La maggior parte del materiale verrà asportata dai taglienti detti di sgrossatura per poi essere finiti dai taglienti di finitura. Ad ogni componente da realizzare il suo utensile.

Solitamente si eseguono dei fori non circolari. Si effettua da prima un foro circolare per poi passare con la *broccia* che realizza forme particolare come richiesto.



3.7 (11) Utensile broccia.

Si tratta di un utensile parecchio costoso per via del fatto che è un utensile massiccio. Viene utilizzato solitamente per la produzione in grande serie, per ammortizzare meglio il costo. I taglienti asportano il materiale in maniera progressiva, a differenza di quanto visto per altri utensili precedenti. Da considerare l'eventuale deflessione dell'utensile posta dalla resistenza meccanica del materiale lavorato, soprattutto per brocciature esterne. Per quelle interne non sussiste il problema. La broccia può essere spinta nel materiale oppure tirato. Se spinto si sfruttano delle brocche piuttosto corte per via dell'ampia deflessione che si va a generare. Discorso diverso nel caso in cui l'utensile viene tirato, per cui si possono avere brocche fino a 2m.

3.7.2 Filettature

L'operazione non è molto diversa da quella precedente: cambia il tipo di moto applicato all'utensile: nella filettatura si ha un moto di rotazione elicoidale per cui l'utensile avanza radialmente e longitudinalmente.



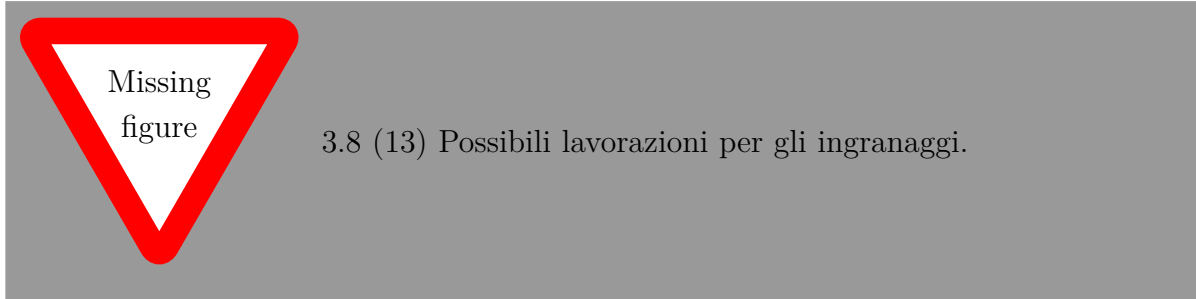
3.7 (12) utensili per filettature.

Normalmente la filettatura viene realizzata tramite deformazione plastica, si ha incrudimento per lavorazione a freddo, non si asporta materiale e dunque le fibre del materiale non vengono tagliate orientandole in senso assiale rispetto alla filettatura dando ulteriore resistenza meccanica.

3.8 Produzione di ingranaggi

Per la produzione di ingranaggi si sfruttano quasi tutte le lavorazioni che si sono viste in precedenza. In particolare, gli ingranaggi per applicazioni critiche, sono ancora

realizzati tramite lavorazioni per asportazione di truciolo. Spesso sono lavorazioni di forma, con moto alternativo (caso della lamatura), oppure rotativo (caso della fresatura).



Più complicata è la realizzazione di ingranaggi conici. Si devono utilizzare degli utensili di forma, su macchine più adatte per tale scopo.

CONFIDENTIAL

CAPITOLO 4

Variabili di processo per lavorazioni in asportazione di truciolo

GLi aspetti principali da considerare per tali lavorazioni sono:

-

La prima decisione necessaria è la sequenza delle operazioni da eseguire. Per ogni lavorazione bisogna scegliere velocità di taglio e avanzamento in funzione dei materiali del pezzo e utensile. Anche la fase della lavorazione va tenuta in conto, sgrossatura e finitura hanno due obbiettivi diversi e necessitano considerazioni diverse.

La finitura superficiale e le tolleranze dimensionali richieste vengono ottenute eseguendo un taglio di finitura con valori piccoli di avanzamento e profondità di passata. Per cui in caso di oggetti *near net-shape*, che possono presentare degli ossidi per via di lavorazioni a caldo precedenti, deve tenere in considerazione che un'operazione di finitura andrà a consumare maggiormente l'utensile: sapendo che il cambio utensile può essere svantaggioso in termini di finitura superficiale.

In una piccola officina il tempo non è un fattore eccessivamente importante. Spesso ci si basa sull'esperienza dell'operatore per gestire la lavorazione. Diverso è il discorso per un'azienda ad alta produttività, in cui per tenere basso il tempo ciclo di produzione è critico. In questo caso, il *set-up* può essere particolarmente problematico, allora alcuni enti hanno costituito col tempo, dei manuali da cui prendere spunto per realizzare una lavorazione abbastanza rapidamente e senza eccessivo consumo dell'utensile.

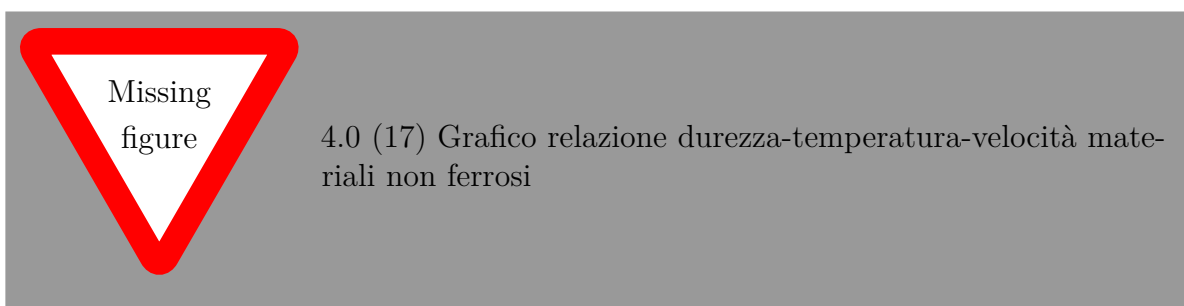
Ricordiamo che l'usura dell'utensile è determinata dalla temperatura raggiunta dall'utensile. la temperatura, a sua volta, dipende dalla velocità di taglio.



4.0 (15) Grafico relazione durezza-temperatura-velocità

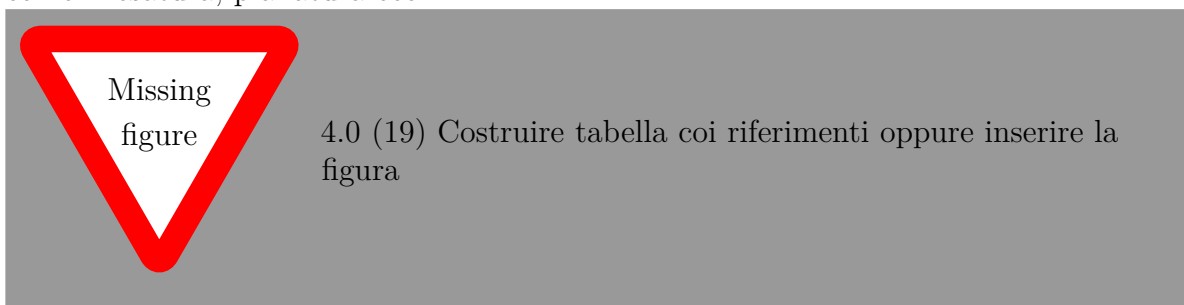
4.0 (14)
Inserire
aspetti
da con-
siderare

4.0 (16)
Sulla
figura
inserire
anche
il car-
tiglio
per via



I grafici precedenti aiutano a scegliere i principali 3 parametri per le operazioni di sgrossatura. Gli avanzamenti vanno scelti in funzione delle durezza dei materiali in cui si va a lavorare. In generale i grafici danno un'indicazione generica, un punto di partenza prudente, per la lavorazione. Le stime si basano sul portare la durata dell'utensile accettabile per circa 1-2 ore. Tramite prove tecnologiche, si può accelerare la lavorazione se l'utensile arriva ad un tempo superiore alle 2 ore. I riferimenti sono per un'operazione di tornitura. I manuali danno, in genere, i parametri di riferimento per altre operazioni come: fresatura, piallatura ecc...

4.0 (18)
riferimenti
figure



Z_p e Z_f sono dei coefficienti da moltiplicare ai riferimenti ottenuti dalla tornitura alle altre lavorazioni.

La foratura con punta da trapano viene trattata a parte per via della sua natura. In generale si hanno dei valori piuttosto simbolici tipo $v = 0.5v_s$ per il ferro e $v = 0.6v_s$ per materiali non ferrosi. Anche la brocciatura ha dei parametri diversificati per cui viene descritta a parte. Per esempio anche la profondità del foro gioca un ruolo importante nel controllo della temperatura.

4.0 (20)
Vedi la
descrizione
della
tabella

Altri miglioramenti in termini di velocità si differenziano in base al materiale dell'utensile: per utensili ceramici si possono quasi raddoppiare le velocità di lavorazione (ovviamente da vedere nel caso specifico).

4.0 (21)
verifica

Non bisogna dimenticare anche altri aspetti tipo: rigidità della macchina, il pezzo da ottenere, elementi di fissaggio, ecc...Una macchina di alto livello riesce ad assorbire le vibrazioni non cedendole all'utensile: ottenendo un controllo migliore sulla lavorazione.

4.0.1 Durata lavorazione e potenza macchina

Una volta scelti i parametri di velocità e avanzamento di solito si stimano:

- la quantità di volume da rimuovere.

- la velocità di rimozione del truciolo
- Dai parametri precedenti si può stimare la durata della lavorazione come $t_c =$

$$\frac{\overbrace{v_c}^{\text{velocità di taglio}}}{\underbrace{V_t}_{\text{volume rimosso}}}$$

- Si stimano energia specifica e successivamente la potenza richiesta dalla macchina.

Si ricorda che la velocità di asportazione è data dalla velocità di taglio per la sezione trasversale del truciolo: spessore indeformato e profondità di passata.

4.0.1.1 Esempio applicativo

Si vuole allargare un foro in un getto in acciaio con un utensile in carburo. Il diametro iniziale è $D_i = 130\text{mm}$ a $D_f = 138\text{mm}$. Si vuole suggerire velocità di taglio e avanzamento, profondità e potenza necessaria.

Soluzione

Da manuale si ottengono:

- UTS del materiale: in questo caso $UTS = 485\text{MPa}$.
- da cui si ricava $HB = 3 * 485 * 9.8 = 150\text{kg/mm}^2$.

Allora possiamo stimare;

- Profondità di passata: $w = (138 - 130)/2 = 4\text{mm}$,
- Dal grafico otteniamo: $v_s = 1.8\text{m/s}$ che può essere aumentata del 20% per via dell'utensile usa-e-getta al carburo da cui: $v_s = 1.8 * 1.2 = 2.16\text{m/s}$

Siccome stiamo trattando una tornitura di interni:

- avanzamento: $f_s = 0.5\text{mm}$
- siccome $Z_f = 1$ allora $f = 0.5\text{mm}$
- Area trasversale truciolo: $A = f * w = 0.5 * 4 = 2\text{mm}^2$
- Volume asportato: $V_t = A * v_s = 4320\text{mm}^3/\text{s}$

Per calcolare la potenza:

- Dalla tabella: $E_1 = 2.1\text{Ws/mm}^2$
- Energia spesa: $E = E_1 * h^{-a} = 2.59\text{Ws/mm}^2$
- Da cui la potenza: $P = \frac{2.59 * 4320}{0.7} = 16\text{kW}$
- la forza di taglio: $P_c = \frac{15956}{2.16} = 7.4\text{kN}$

CAPITOLO 5

Macchine Utensili

Spesso il cliente chiede delle macchine con delle specifiche particolari in base alle lavorazioni che necessita. In generale sono le dimensioni che differenziano le macchine. Può capitare che ci siano delle necessità particolari per delle operazioni molto particolari.

Un caso particolare è rappresentato dalle macchine esapodi: presentano sei colonne che possono allungarsi e accorciarsi. Il vantaggio è che data la geometria impedisce alle colonne di flettere ma solo di porsi in trazione e compressione. Ciò dovrebbe garantire altissima precisione e accuratezza nella lavorazione ma non hanno avuto grande successo per via del grande ingombro rispetto al volume lavorabile. Dunque poco adatte per una lavorazione industriale.

Si era già accennato lo sviluppo delle macchine a controllo numerico. La diffusione di tali macchine è dovuta all'integrazione tra macchina e processore.

Ulteriore problematica ed eventuale miglioramento delle macchine sta nella capacità di assorbire le vibrazioni.

Passando ad un altro aspetto: ovvero la stabilità termica. In generale una macchina provoca calore nella lavorazione. Dunque è necessario considerare l'eventuale dilatazione termica dovuta all'incremento della temperatura. Allora sono state sviluppate delle tecniche di controllo adattativo: ovvero le macchine riescono a compensare delle variazioni durante la lavorazione, proprio come la dilatazione termica. Per esempio può essere rilevata la variazione dimensionale di un pezzo proprio per dilatazione termica, allora si può adattare la profondità dell'utensile per compensare tale variazione. Per questo scopo devono essere montati dei sensori abbordo macchina. Eventualmente è necessario scegliere dei motori della macchina che possano compensare eventuali errori nel posizionamento come i motori a passo.

APPENDICE A

Acronimi

CCC	Cubico a Corpo Centrato
CFC	Cubico a Facce Centrate
FMS	Flexible Manufacturing Systems
CS	Cubico Semplice
TR	Technical Report

CONFIDENTIAL