



**Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino**

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1519A -

ANNO: 2015

# **A P P U N T I**

STUDENTE: Di Tullio

MATERIA: Tecnologia Meccanica + Eserc. Prof. Antonelli

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

Produzione → è la funzione che caratterizza l'azienda, il cui sviluppo non prescinde da un'innovazione continua. L'innovazione di processo è condizionata da fattori economici, ambientali, sociali e tecnologici. Si richiede la ridefinizione delle strategie di competizione e produzione, applicando concetti innovativi e adattandosi alla domanda con flessibilità.

Ricristallizzazioni

- ↗ Statica: dovuta a un trattamento termico successivo di riscaldamento
- ↘ Dinamica: dovuta a un processo di lavorazione plastica

$$L = L_{unif} + L_{rid} + L_{att.} \rightsquigarrow L_{unif} = \bar{\gamma} \cdot \epsilon \cdot V, \quad L_{att.} = \rho \cdot P \cdot S \cdot c$$

Il lavoro di def. plastica è irreversibile e viene trasformato in:

- Q per il 50%
- energia di legame per il 10%

$Q \approx 0$ , l'adiabaticità considerata nei processi implica un riscaldamento ulteriore del corpo lavorato.

Fattore di taratura: indica la relazione tra i valori di riferimento e i valori misurati dallo strumento (sensibilità relativa → si fissa  $\epsilon = 1$ )

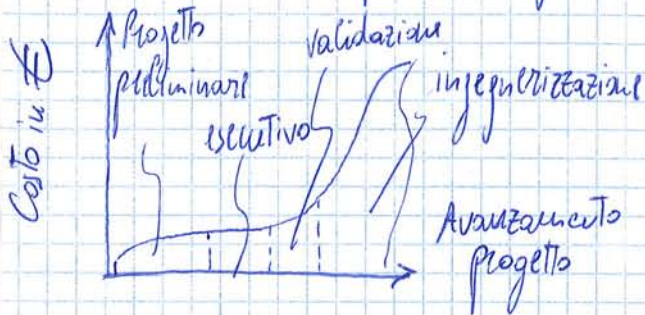
$$G = k \cdot \epsilon^n : \text{effetto di } T \text{ su } n \Rightarrow T \uparrow n \downarrow$$

Aggiunta di additivi nella lavorazione dei polimeri → plastificanti, coloranti, anti-ossidanti, lubrificanti

ERP: enterprise resource planning → pianificazione risorse dell'impresa

Concurrent engineering (produzioni simultanea): integrazioni progettazioni e fabbricazione dei prodotti per abbattimento dei tempi di vendita (time to market)

Aumento dei costi per le modifiche



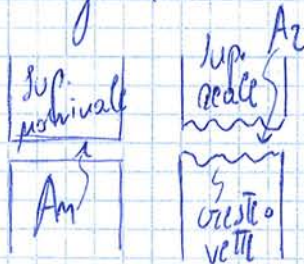
Si preferisce il parallelismo del prodotto (CE) al metodo tradizionale in linea per migliorare costi e qualità del prodotto. L'obiettivo del CE è ridurre il time-to-market migliorando la qualità con costi contenuti.

scorrimento plastico → variazioni  $\gamma$  nello scorrimento di un piano atomico sull'altro

• I MATERIALI

Panoramica materiali utilizzabili: metalli - polimeri - ceramici - compositi

Tribologia (studio dei modelli d'attrito)



Sup. di contatto nominale  $\gg$  sup. di contatto reale  
La forza di attrito è proporzionale alla forza di contatto superficiale

$A_m = A_z \Rightarrow$  sforzo di taglio = forza d'attrito (Fatt.)

Tensione tangenziali di attrito

$\tau_a = \frac{F_{att}}{A_m}$

$\mu$ : coeff. d'attrito  
 $p$ : pressione

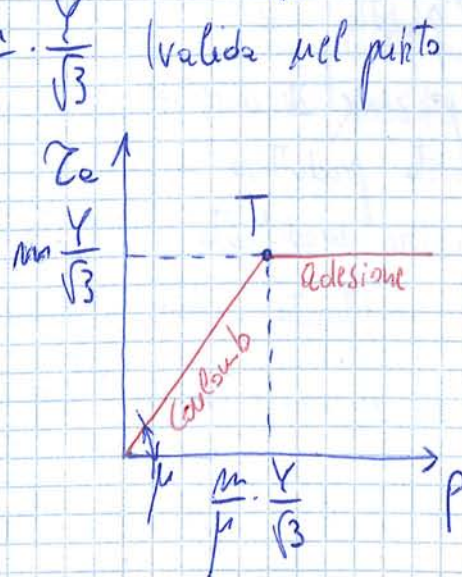
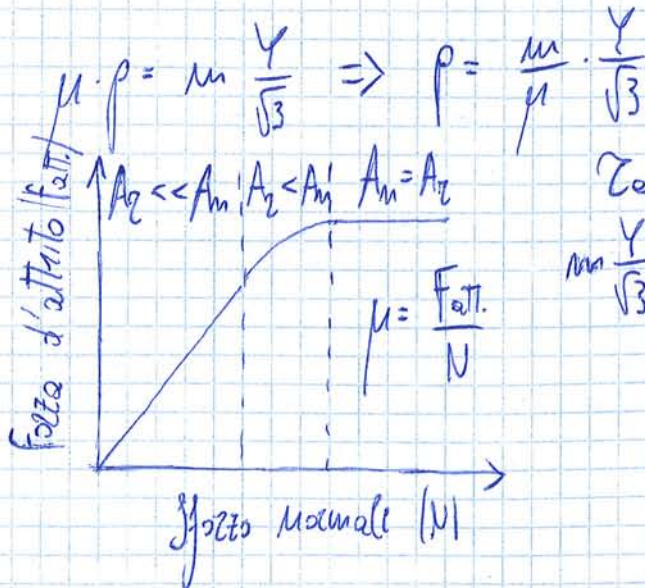
modelli validi:

- di Coulomb
- dell'adesione

$\tau_a = \mu \cdot p$

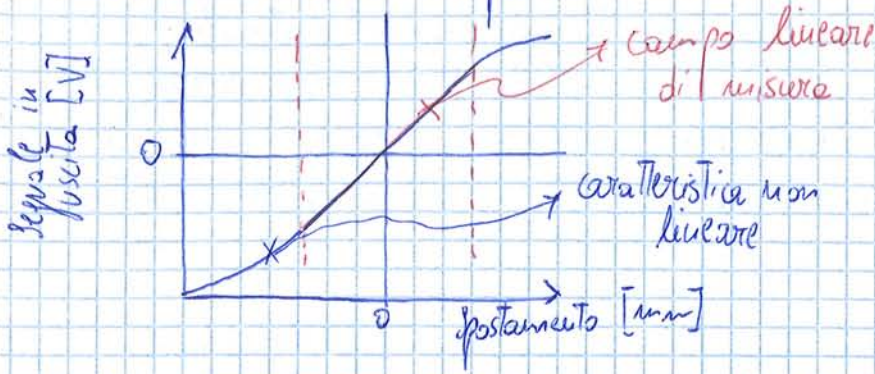
$\tau_a = m \cdot \frac{Y}{\sqrt{3}}$

$Y$ : Tensione di scorrimento plastico al taglio ( $R_{p0.2}$ )  
 $m$ : fattore d'attrito



I lubrificanti diminuiscono  $\mu$

### Trasduttore induttivo di spostamento



⇒ È possibile valutare il campo di linearità del trasduttore

\* precisioni della misura

- \* - Accuratezza: massima differenza tra il valore misurato  $U$  e il valore di riferimento della grandezza misurata (massimo errore previsto della misura)
- Ripetibilità: misurando ripetutamente la stessa grandezza nelle stesse condizioni, è la capacità di mantenere la stessa misura
- Riproducibilità: come ripetibilità solo due gli oggetti misurati sono sottoposti a condizioni diverse
- Risoluzione: più piccolo incremento di misura leggibile
- Stabilità: la grandezza misurata rimane stabile nel tempo
- Precisione: rapidità con cui lo strumento effettua la misurazione

Misure dimensionali (lunghezze): calibro a corsoio (analogico o digitale), manico (per il decimo di mm), micrometro (range 0-25mm), macchina a coordinate (CMM) (misure su superfici)

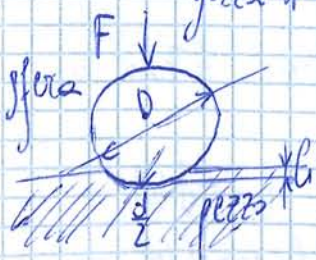
Misure di durezza: comode da fare in ambito industriale per misurare indirettamente a molte caratteristiche del materiale

Durezza di un materiale → resistenza secondo il punto di vista fisico mineralogico metallurgico (resistenza superficiale che si oppone alle penetrazioni del corpo)

Si fa riferimento a delle scale convenzionali e per le tipologie di prove si distinguono:

"prove di macrodurezza" (grande impronta lasciata → danneggiano il materiale)

- Brinell: si fa penetrare nel pezzo una sfera d'acciaio di diametro  $D$  con una forza  $F$ . Si misura l'impronta dall'impronta.

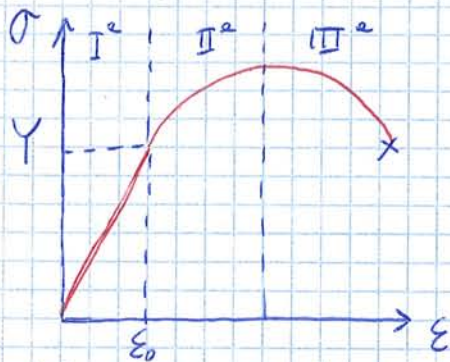
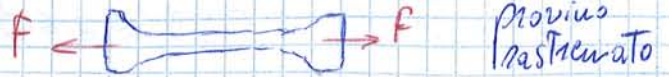


Durezza Brinell:  $HB = \frac{P}{S}$    
 ~ carico applicato  $P = \frac{F}{g}$    
 ~ superficie di contatto  $S = \frac{A}{g}$

$HB$  è la pressione di contatto  $[\frac{N}{cm^2}]$    
 $h$  è la profondità dell'impronta  $[\frac{kgf}{mm^2}]$  sì!

$$S = \frac{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2} \Rightarrow HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{1}{g} \cdot \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

# PROVE MECCANICHE DISTRUTTIVE



Ci si concentra sul secondo tratto della curva: zona di deformazione plastica. La strizione rappresenta la zona più debole, il punto d'instabilità del provino (nel processo produttivo non ci si deve avvicinare).

F: forza     $S_0$ : sezione iniziale     $S$ : sezione vera (effettiva)

$\Delta l$ : variazione di lunghezza

$l_0$ : lung. nominale iniziale

Tensione nominale:  $\sigma_m = \frac{F}{S_0}$

(allungamento differenziale provino)  $l$

Tensione reale:  $\sigma = \frac{F}{S}$

Deformazione nominale:  $e = \frac{\Delta l}{l_0}$

Def. infinitesima  $d\varepsilon = \frac{dl}{l} \Rightarrow \varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l}$

$\Rightarrow$  La deformazione naturale si ottiene da:  $\varepsilon = \int d\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$

$l$ : lung. finale     $\varepsilon$ : valore vero di deformazione

Vale la proprietà additiva su deformazione naturale:

$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon \approx E \text{ campo elastico} \\ \varepsilon \neq E \text{ campo plastico} \end{array} \right.$

$\varepsilon = \ln \frac{l_1}{l_0} + \ln \frac{l_2}{l_1} = \ln \frac{l_2}{l_0}$

Caso  $l_0 \rightarrow l_1 + l_1 \rightarrow l_2$

$e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} + \frac{l_2 - l_1}{l_1} = \frac{l_1^2 - 2l_0l_1 + l_0l_2}{l_0l_1}$

[Sommando le def. nominali si ottiene un risultato corretto  $\Rightarrow S_0$  è costante.]

$\varepsilon = \ln \frac{l_2}{l_0}$  Def. naturale

$e = \frac{l_2 - l_0}{l_0}$  Def. nominale    Caso  $l_0 \rightarrow l_2$

Nella def. plastica il volume si conserva:  $l_0 \cdot S_0 = l \cdot S \Rightarrow \frac{l}{l_0} = \frac{S_0}{S} \Rightarrow \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \dots$

Passaggio da tensioni reali a tensioni nominali:  $\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{S} \cdot \frac{S_0}{S_0} = \sigma_m \cdot \frac{S_0}{S} = \sigma_m \cdot \frac{l}{l_0}$

Per la conservazione del volume vale:  $e = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 = \frac{S_0}{S} - 1$

Formula finale:  $\sigma = \sigma_m \cdot \frac{S_0}{S}$  e  $e = \frac{S_0}{S} - 1 \Rightarrow \sigma = \sigma_m (1 + e)$

Passaggio da deformazione naturale a nominale:

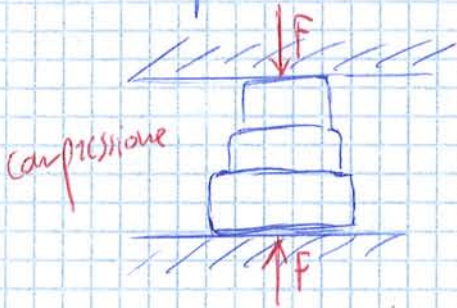
[Per piccole deformazioni è valido  $e \approx \ln(1+e)$ ]

$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$      $e = \frac{l}{l_0} - 1 \Rightarrow \varepsilon = \ln(1+e)$

(Nella compressione la condizione di instabilità non esiste)

$$\Rightarrow \int \left( \frac{d\sigma}{d\varepsilon} - \sigma \cdot \frac{dS}{S} \cdot \frac{S}{dS} \right) = 0 \Rightarrow \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \quad \text{stirazione con opportune sostituzioni.}$$

Test di compressione → Barreling: indica una deformazione maggiore delle sezioni più lontane dai punti d'applicazione dello sforzo (è dovuto all'attrito superficiale, subisce una diminuzione con lubrificazione).



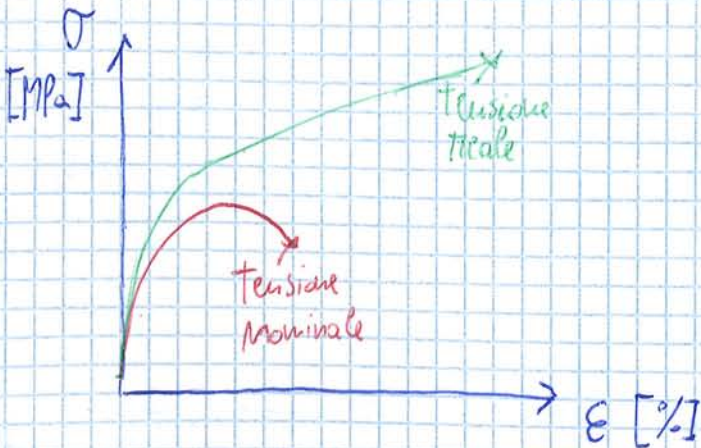
La combinazione Tensione + compressione alternata diminuisce lo sforzo necessario per raggiungere lo snervamento del materiale (Bauslinger Effect)

Elaborazione dei dati: ipotesi di volume costante  $l_0 \cdot S_0 = l \cdot S$   
 area della superficie del provino  $S_0 = \frac{\pi}{4} \cdot D_0^2$   
 deformazione naturale  $\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{l_0}{S}$

Tabella dei dati

$\Delta l$	F	S	$\sigma_n$	e	$\sigma$	$\varepsilon$
[mm]	[kN]	[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
...	...	...	...	...	...	...

Caratteristica  $\sigma$ - $\varepsilon$  di un acciaio (C 40)



Con gli ultrasuoni è possibile rilevare il grado di omogeneità, la presenza di vuoti, fessure e altre imperfezioni, entità delle discontinuità, localizzazione delle zone alterate, variazioni delle proprietà dei materiali nel tempo, stima del modulo elastico e della resistenza del materiale.

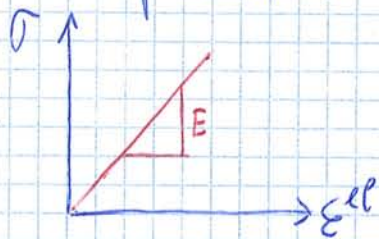
Radiografia → rilevamento della struttura interna attraverso la variazione di attenuazione che subisce un fascio di raggi X in funzione degli spessori del pezzo attraversati. Per spessori maggiori si utilizzano raggi  $\gamma$  (fino a 150 mm) o acceleratori lineari. Le dimensioni minime rilevabili sono dell'1% dello spessore del pezzo, per sensibilità maggiori si utilizzano gli ultrasuoni.

### • MECCANICA DEI MATERIALI

Il comportamento plastico del materiale è indipendente da quello elastico. La deformazione totale è pari alla somma delle due:

$$\epsilon^{\text{TOT}} = \epsilon^{\text{el}} + \epsilon^{\text{pl}}$$

Il comportamento elastico lineare è approssimabile con la legge di Hooke



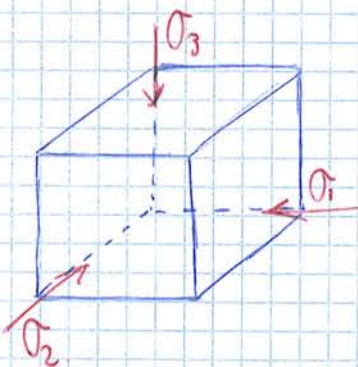
$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

nel modello ideale non è presente l'isteresi: il passaggio tra tensione e deformazione è istantaneo.

### Analisi triassiale delle tensioni:

Tensioni principali assiali:  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$

Tensione media: 
$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$



Trazione uniaassiale → unica direzione principale  $\sigma_1 = \sigma$   
 $\Rightarrow \sigma_2 = \sigma_3 = 0$

(Esempio: prova di trazione su provino a osso di cane  $\sigma_1 = \sigma$ )

Legge di Hooke per tensioni triassiali:

$$\begin{cases} \epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu (\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \epsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu (\sigma_3 + \sigma_1)] \\ \epsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu (\sigma_2 + \sigma_1)] \end{cases}$$

$0 \leq \nu \leq 0,5$  coeff. di Poisson



sollecitazioni. Un criterio di snervamento fornisce una relazione univoca tra lo stato tensionale e il limite di snervamento: ( $\sigma_1 = \sigma_{max}$ ,  $\sigma_3 = \sigma_{min}$ )

- Criterio di Tresca ( $\sigma_{max}$ )

$$\sigma_1 - \sigma_3 = Y \rightarrow \text{limite di snervamento}$$

- Criterio di Von Mises  
(energia di distorsione max)

$$|\sigma_1 - \sigma_2|^2 + |\sigma_2 - \sigma_3|^2 + |\sigma_3 - \sigma_1|^2 = 2Y^2$$

L'energia di distorsione è responsabile della deformazione plastica (per cui non è applicabile a tutti i materiali). Dal punto di vista energetico trazione e compressione forniscono lo stesso valore  $\rightarrow E_n \propto \frac{1}{2} \cdot \sigma^2$

Quando si raggiunge un valore di tensione attribuibile al valore di tensione equivalente (secondo il criterio scelto), allora si arriva allo snervamento del materiale con deformazione plastica.

Tresca  $\sigma_{eq}^T = \sigma_1 - \sigma_3 = Y$

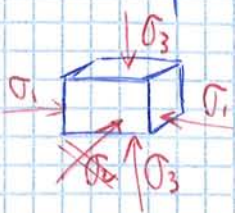
Von Mises  $\sigma_{eq}^{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{|\sigma_1 - \sigma_2|^2 + |\sigma_2 - \sigma_3|^2 + |\sigma_3 - \sigma_1|^2}$

La tensione equivalente coincide con il limite di snervamento. La deformazione equivalente moltiplicata per  $\sigma_{eq}$  dà il lavoro di deformazione!

$$\epsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{|\epsilon_1 - \epsilon_2|^2 + |\epsilon_2 - \epsilon_3|^2 + |\epsilon_3 - \epsilon_1|^2}$$

Casi specifici analizzati:

- Tensione piana  $\sigma_2 = 0$ ,  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$

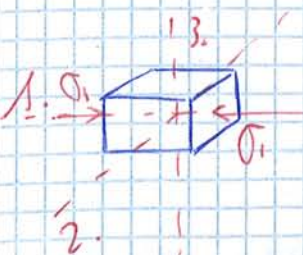


$$\sigma_{eq}^T = \sigma_1 - \sigma_3 = Y$$

$$2\sigma_{eq}^{VM2} = |\sigma_1 - \sigma_2|^2 + |\sigma_2 - \sigma_3|^2 + |\sigma_3 - \sigma_1|^2 = 2Y^2$$

$$2\sigma_1^2 - 2\sigma_1\sigma_3 + 2\sigma_3^2 = 2Y^2 \Rightarrow \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2 = Y^2$$

- Tensione uniassiale  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ,  $\sigma_1$



$$\sigma_{eq}^T = \sigma_1 = Y$$

$$\sigma_{eq}^{VM} = \frac{\sigma_1}{\sqrt{3}}$$

$$\sigma_{eq}^{VM} = \sigma_1 = \pm Y$$

$$\begin{cases} \epsilon_1 \propto \frac{2}{3} \sigma_1 \\ \epsilon_2 \propto \frac{\sigma_2 - \sigma_m}{\sqrt{2}} = -\frac{\sigma_1}{3} \Rightarrow \epsilon_1 = -2\epsilon_2 = -2\epsilon_3 \\ \epsilon_3 \propto -\frac{\sigma_1}{3} \end{cases}$$

Deformazioni equivalenti:  $d\epsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\epsilon_1 - d\epsilon_2)^2 + (d\epsilon_2 - d\epsilon_3)^2 + (d\epsilon_3 - d\epsilon_1)^2}$

Casi semplificati:   
 - Assialsimmetrico  $\epsilon_{eq} = \epsilon_1$   
 - Def. piana  $\epsilon_{eq} = 1,15 \cdot \epsilon_1$

Per la conservazione del volume vale  $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$

nel caso di incoordinamento  $\sigma_{eq} = Y(\epsilon_{eq})$   $Y(\epsilon_{eq}) = C \cdot \epsilon_{eq}^m$

Imponendo la legge costitutiva esponenziale con lavoro di deformazione pari a L:

$\sigma = C \cdot \epsilon^m \Rightarrow L = V \cdot \int_0^{\epsilon_{jin}} \sigma_{eq} \cdot d\epsilon_{eq} = V \cdot \int_0^{\epsilon_{jin}} C \epsilon^m d\epsilon$

si ottiene  $L = V \cdot C \cdot \frac{\epsilon_{jin}^{m+1}}{m+1}$  con incoordinamento

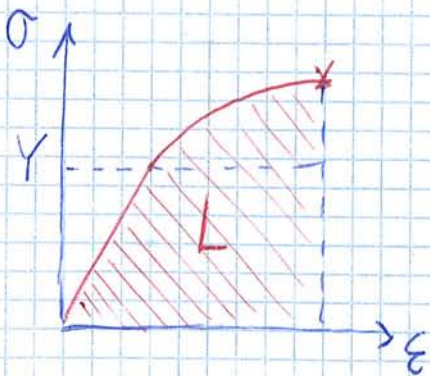
Senza incoordinamento  $\rightarrow \frac{L}{V} = \int_0^{\epsilon_{jin}} \sigma_{eq} d\epsilon_{eq} = \int_0^{\epsilon_{jin}} Y \cdot d\epsilon_{eq} = Y \cdot \epsilon$

Considerazione da fare per capire meglio  $\frac{dL}{V} = \frac{F \cdot ds}{V} = \frac{F \cdot ds}{A \cdot s} = \frac{F}{A} \cdot \frac{ds}{s} = \sigma d\epsilon$

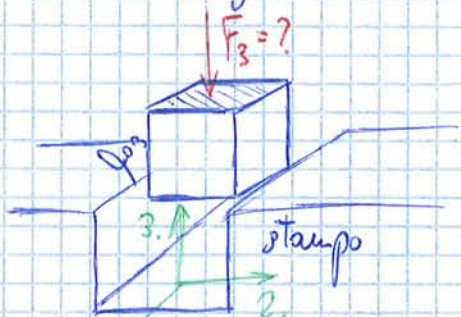
Si definisce tensione media:  $\bar{Y} = \frac{1}{\epsilon_{jin}} \int_0^{\epsilon_{jin}} \sigma_{eq} \cdot d\epsilon_{eq}$

nel caso di incoordinamento (tensione media di plasticità)  $\bar{Y} = C \cdot \frac{\epsilon_{jin}^m}{m+1}$   $L = V \cdot \bar{Y} \cdot \epsilon$  (lavoro uniforme)

L rappresenta il lavoro plastico a tensione media di deformazione.  $\bar{Y}$  può essere applicata nel caso uniforme e non.



1.4) Si vuole comprimere un corpo di forma cubica di lato 100 mm dentro lo stampo in modo da portare l'altezza a 50 mm. Il corpo è stimato rigido plastico con tensione di snervamento  $Y = 200 \text{ MPa}$  e viene deformato con attrito nullo. Calcolare la forza di compressione.



$\epsilon_2 = 0$       Cons. del volume:  $l_{01} \cdot l_{02} \cdot l_{03} = l_{f1} \cdot l_{f2} \cdot l_{f3}$

0: inizio    f: fine processo

$$l_{f1} = \frac{100^3 \text{ mm}^3}{l_{f2} \cdot l_{f3}} = 200 \text{ mm}$$

$$l_{f2} = 100 \text{ mm}$$

$$l_{f3} = 50 \text{ mm}$$

La direzione 1. non è vincolata  $\sigma_1 = 0$ , per la deformazione piana  $\epsilon_2 = 0$ , quindi si ottiene:

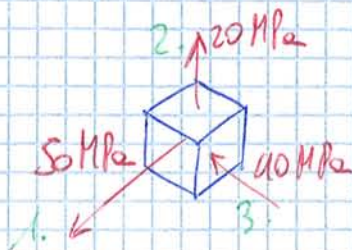
$$Y = \frac{\sqrt{3}}{2} |\sigma_1 - \sigma_3|$$

$\sigma_1 = 0$

$$\sigma_3 = -Y \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} = -231 \text{ MPa}$$

$$F_3 = \sigma_3 \cdot S_f = \sigma_3 \cdot l_{f1} \cdot l_{f2} = -4620000 \text{ N} = -4620 \text{ kN}$$

1.5) Un metallo snerva plasticamente sotto lo stato di tensione seguente. Calcolare la tensione di snervamento secondo Tresca e Von Mises. Lo stato di tensione determina  $\epsilon_1 = 0,4$   $\epsilon_2 = 0,2$ , calcolare  $\epsilon_3$



$$\sigma_1 = 50 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 20 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = -40 \text{ MPa}$$

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

Tresca  $Y^T = \sigma_1 - \sigma_3 = 90 \text{ MPa}$

Von Mises  $Y^{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{|\sigma_1 - \sigma_2|^2 + |\sigma_2 - \sigma_3|^2 + |\sigma_3 - \sigma_1|^2} = 79,4 \text{ MPa}$

conservazioni del volume:  $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$

$$\epsilon_3 = -\epsilon_1 - \epsilon_2 = -0,6$$

## MODULO B1

### LA PRODUZIONE INDUSTRIALE

Ciclo completo di semilavorati → Dalle materie prime carbon fossile, minerale di ferro e fangenti, viene ricavata ghisa grezza. Per la produzione degli acciai si affina la ghisa grezza e con la colata in continuo, mediante dei rulli vengono prodotti semilavorati (bramme, blumi e billette). Tramite lavorazioni successive si ottengono i prodotti finiti come barre, profilati e lamiera con la laminazione a caldo e nastri, fili metallici con la laminazione a freddo.

Le lavorazioni si distinguono in: - formatura (fonderia, metallurgia delle polveri, galvanoplastica)

- deformazione plastica con materiale grezzo (laminazione, estrusione, stampaggio, trafilatura, laminatura)

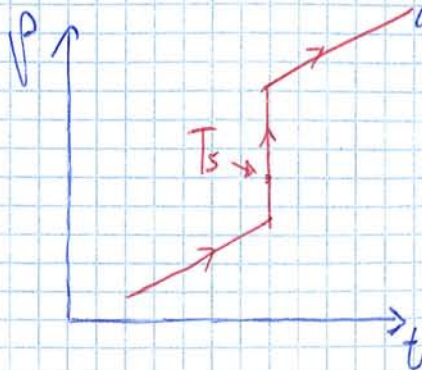
- asportazione di truciolo, operazioni di perfezionamento (tornitura, foratura, fresatura, rettificatura, elettroerosione, taglio laser)

In seguito si procede con l'assemblaggio (saldatura, incollaggio, chiodatura, imbullonatura)

• IL PROCESSO DI FUSIONE → È alla base dei processi industriali di formatura a loro volta punto di partenza per molti processi di lavorazione. La fonderia è la branca che si occupa di ottenere oggetti metallici tramite la fusione e la colata in appositi stampi cavi.

La fusione è il fenomeno di transizione della materia solida in liquido, durante la fusione la temperatura rimane costante e si ha un calo di densità con conseguente aumento di volume. Durante la solidificazione la distribuzione di temperatura nel pezzo non è uniforme, si solidifica prima l'esterno del pezzo e successivamente il cuore (gradiente di temperatura)

- Andamenti della temperatura e della densità in funzione del tempo (solidificazione)



$T_s$ : temperatura di solidificazione

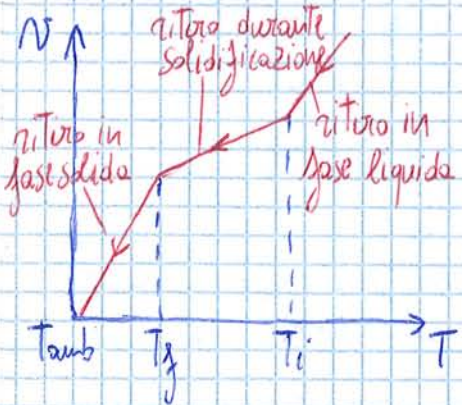
Durante la solidificazione il materiale diminuisce di volume, aumentando la densità

"Ritiro"  $\downarrow$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{Es.} \\ \text{Carbon steel } 2,5-4\% \end{array} \right.$

da una placca. I materiali impiegati per il modello possono essere legni duri e scarsamente igroscopici (capacità di assorbire l'acqua), leghe metalliche in bronzo, ghise, acciai o materie plastiche. Le anime sono parti che non vengono riempite dal metallo fuso per la formazione di fori e cavità, ed assieme al materiale di formatura, la forma e il modello, costituiscono gli elementi essenziali della formatura. Le materozze compensano il ritiro del materiale durante la sua solidificazione, in un opportuno cono di ritiro. Il pezzo finito non è il pezzo di sbianca, il quale possiede materiale in eccesso (sovrametallo) e dovrà essere soggetto a operazioni di perfezionamento.

Nozioni di base della formatura → nella creazione del modello bisogna evitare la formazione di sottosquadri, situazione in cui è impossibile estrarre il modello senza causare rotture o deformazioni di forma. Per evitare tale fenomeno si ricorre a modifiche in fase di progettazione, come cambiare la direzione di estrazione, si applicano dei tasselli o si utilizzano modelli scomponibili. Le pareti inclinate non verticali evitano il sottosquadro. Durante la progettazione è necessario prevedere il sovrametallo (materiale in eccesso) in previsione di lavorazioni successive, e di angoli di sforno, per facilitare l'estrazione le superfici del modello non sono parallele all'asse di estrazione, ma inclinate verso l'esterno con  $\alpha \approx 1/2^\circ$ . Le portate di anima sono caratterizzate da una certa lunghezza, e hanno la funzione di sostenere e di fornire rigidità, permettendo il montaggio delle anime. Devono contrastare la spinta di Archimede per cui  $\rho_{anima} < \rho_{metallo}$ .

Il fenomeno del ritiro → aumentando la temperatura, la densità del materiale diminuisce, causando un aumento del volume specifico. Durante il raffreddamento nel passaggio liquido-solido si ha un aumento di densità dovuto alla riduzione di volume, con  $T_i =$  temperatura di inizio solidificazione. Tale fenomeno è detto ritiro, porta alla formazione di un cono di ritiro al termine della solidificazione, cioè una cavità simil-conica sulla superficie ideale del pezzo che solidifica per ultima.



$T_f =$  temperatura di fine solidificazione. Il pezzo realizzato si presenta con dimensioni inferiori a quelle previste ⇒ il liquido di partenza occupa più spazio rispetto

Il sistema di colata è composto dal bacino di colata, dal canale di colata, dal canale di distribuzione, dagli attacchi di colata e dal piano di divisione. Bisogna evitare un'eccessiva velocità del getto, facendo in modo che il flusso di metallo fuso sia meno turbolento possibile, per evitare deformazioni della forma.

- Legge di Bernoulli → sul sistema di colata il metallo fuso è incomprimibile, il volume si conserva  

$$h + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{costante}$$
 h: quota punto di colata    P: pressione fluido  
 ρ: densità fluido    v: velocità di colata.

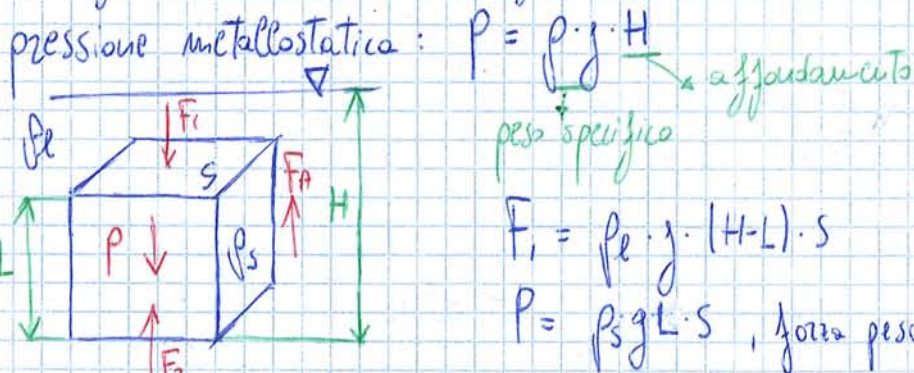
- Continuità della portata volumica  $Q \left[ \frac{m^3}{s} \right] = \text{costante}$   

$$Q = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

- Regime di flusso → numero di Reynolds per determinare se il moto è viscoso o turbolento ( $Re > 10000$ )  

$$Re = \frac{\rho D v}{\eta}$$

- Principio di Archimede → studio delle spinte metallostatiche, cioè la risultante delle pressioni che il metallo fuso esercita sulle pareti della forma e sulle anime, tali pressioni possono deformare le pareti della forma con pericolo di formazione di bave e fuoriuscite del metallo fuso.



P è dovuta al peso del liquido.  
 s: solido  
 l: metallo liquido

↑ Forza di Archimede:  $F_A = F_2 - F_1$ , è data dalla differenza delle due spinte metallostatiche

Spinta complessiva → spinta metallostatica:  $F_M = F_2 - F_1 - P = F_A - P$

$$F_M = \rho_l \cdot g \cdot H \cdot S - \rho_l \cdot g \cdot (H-L) \cdot S - \rho_s \cdot g \cdot L \cdot S = g \cdot L \cdot S (\rho_l - \rho_s)$$

L · S: volume del solido immerso

Processo: Disegno del pezzo → costruzione del modello (modello ≠ pezzo finito) → ricompimento della prima staffa (la staffa è intesa come telaio aperto da un

La grandezza del getto è funzione della dimensione delle staffe. La precisione dimensionale e la finitura superficiale sono scarse. La vibro-compressione è trasmessa da un sistema vibrante e un pistone di compressione per la tenuta della forma. È possibile posizionare un riferimento placca-staffa. Nella fase di sfornatura, al termine del processo di fusione si rompe la forma e si estrae il pezzo. Tramite un sistema di sollevamento è possibile alzare le staffe.

- indurimento chimico, può avvenire tramite una corrente di  $\text{CO}_2$  con silicato di sodio come legante, mentre la  $\text{CO}_2$  gassosa è l'indurente. Si ottiene carbonato di sodio e silice amorfa. Come additivi si utilizzano resine ureiche e fenoliche. Il processo per leghe ferrose e non, consiste nel passaggio di  $\text{CO}_2$  nel materiale di formatura all'interno della forma o della cassa dell'anima. La precisione e la finitura superficiale risultano migliori e le operazioni sono automatizzabili in serie.

Nella formatura in sabbia-cemento si utilizza una miscela con sabbia acqua (tra 3% e 10%) e cemento (tra 7% e 12%), gli ultimi due come legante per ottenere l'indurimento di prodotti a idratazione cristallina. La buona conducibilità termica della miscela garantisce una buona fine del getto. Il sistema è semplice ed economico, si adatta a getti di grosse dimensioni con velocità di esecuzione elevata, tuttavia la precisione e la finitura superficiale sono scarse.

Con la formatura cold-box l'indurimento della forma si ha a freddo per polimerizzazione del legante (resina) dovuta al passaggio di un catalizzatore gassoso. Nel procedimento Ashland il legante è una resina fenolica e si ottiene l'indurimento in pochi secondi, con buona precisione e finitura superficiale, ma non è economico e i catalizzatori sono tossici. Alternativamente si utilizza il processo con  $\text{SO}_2$  (tossico) con caratteristiche simili.

I materiali utilizzati in tali processi sono inquinanti e non riciclabili.

- indurimento termico, i principali processi sono lo shell molding e la microfusione. Lo shell molding consiste in una forma con pareti sottili ottenute da una miscela di sabbia e resina fenolica, lo shell è un coperchio molto permeabile e fornisce un'ottima precisione e finitura superficiale, è adatto per la produzione in grande serie, ma solo per getti di dimensioni e pesi limitati (30 kg max). La placca-modello è in acciaio ed è fissata

Il costo del pezzo realizzato in forma permanente è elevato, quindi le produzioni devono essere elevate.

Il riempimento della conchiglia può avvenire per gravità con del metallo fuso fino all'interno del canale di colata e sotto pressione se il fluido viene iniettato in pressione per aumentare la velocità nella conchiglia e si estrae il pezzo solidificato, anche se caldo, in tal caso le spinte metallostatiche diventano molto elevate => si deve evitare un'eventuale apertura in due della forma a causa della pressione.

(Colata per gravità)

Le anime sono in terra di fondoria per ottenere forme complesse o con problemi di estrazione del getto o in acciaio se bisogna scomporre le parti.

La qualità del getto dipende dalla lubrificazione delle parti in movimento, dalla temperatura della conchiglia, dalla verniciatura delle superfici interne, dalle canalizzazioni di colata e dalle materozze presenti.

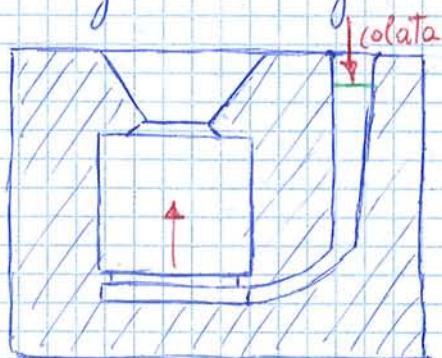
Occorre una temperatura ottima di colata che evita il rittiro eccessivo del getto e per ottenere una buona fluidità tale da consentire un riempimento completo della conchiglia, si raggiunge l'equilibrio termico solamente dopo la colata di alcuni pezzi.

La verniciatura all'interno della conchiglia permette un aumento della sua vita, controlla il trasferimento di calore nelle materozze e lo scorrimento della lega, inoltre migliora la finitura superficiale e il distacco dalla conchiglia.

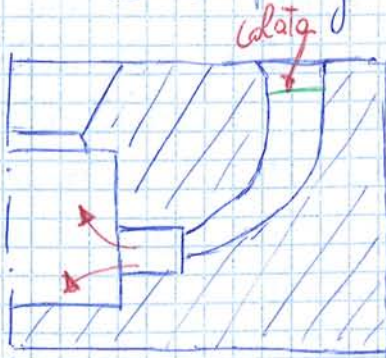
Il sistema di colata va progettato per ridurre al minimo le turbolenze, alimentando il getto senza spruzzi di colata all'interno della conchiglia, aggiungendo se necessario un sistema di basculamento della conchiglia che elimina gli intrappolamenti e assicura un riempimento più dolce.

"Sistemi di colata per gravità":

- In sorgente (scelta migliore)



- Laterale (più facile da realizzare)





## LAVORAZIONE DEI MATERIALI POLIMERICI

I materiali polimerici sono caratterizzati da bassa densità, resistenza, rigidità, bassa conducibilità elettrica, elevata resistenza agli agenti chimici, elevata versatilità d'impiego e facilità di lavorazione.

Il monomero costituisce l'elemento costruttivo di base dei polimeri, la maggior parte dei monomeri sono materiali organici nei quali gli atomi di C sono legati con H, O, N attraverso legami covalenti e deboli.

I polimeri vengono prodotti per polimerizzazione dei monomeri: nella polimerizzazione per condensazione il polimero si ottiene attraverso la formazione di legami tra due tipi di monomeri reagenti, si ha la condensazione di  $H_2O$  come sottoprodotto della reazione, mentre nella polimerizzazione per addizione non si hanno sottoprodotti di reazione, tuttavia è necessario introdurre un iniziatore per aprire il doppio legame tra gli atomi di carbonio. I monomeri uniti formano una catena polimerica, legati da legami covalenti. Tali catene si possono distinguere in strutture differenti: catena lineare, ramificata, incrociata (cross-linked) e reticolata a rete colata.

È possibile distinguere tre categorie di polimeri: termoplastici, termoindurenti e elastomeri.

- Materiali termoplastici, richiedono calore per la modellizzazione e la plastificazione (riscaldamento fino a stato pastoso, deformazione e raffreddamento) è reversibile ma cicli ripetuti possono causare la degradazione (invecchiamento)
- Termoindurenti, con catene polimeriche reticolate tridimensionalmente o cross-linkati, la reticolazione è irreversibile (reticolazione = plastificazione), un successivo riscaldamento porta alla carbonizzazione, non presentano legami deboli
- Elastomeri, sono in grado di recuperare le dimensioni e la forma originaria dopo che il carico è stato rimosso.  $T_s$ : temp. di transizione vetrosa  $T_f$ : temp. di fusione

Al comportamento dei termoplastici dipende dalla temperatura e dalla velocità di deformazione. Al di sotto della temperatura di transizione vetrosa la maggior parte dei polimeri è rigida, fragile e dura come un vetro. Nella regione vetrosa il solido è elastico e vale la legge di Hooke.

I polimeri vengono lavorati per: - estrusione, si ottengono pezzi lunghi, uniformi, pieni o cavi, con ampia gamma di precisione, elevati volumi produttivi a costi ridotti.

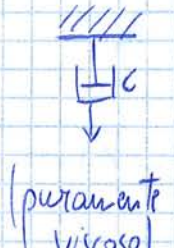
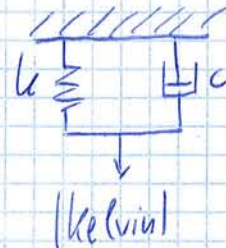
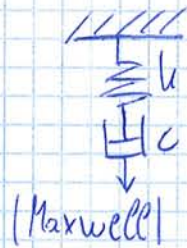
- Stampaggio a iniezione, per forme complesse con elevato livello di dettaglio, elevati

$$Q_{matrice/die} \text{ (portata)} = \underset{\substack{\downarrow \\ \text{sperimentale}}}{K \text{ (costante)}} \cdot \underset{\substack{\downarrow \\ \text{caduta di pressione attraverso la matrice}}}{P \text{ (pressione)}}$$

Con la caratteristica dell'estrusore e della matrice si determina il punto di funzionamento. Una volta nota  $Q_{die}$  è possibile calcolare la velocità del materiale che lascia l'estrusore:  $V_{est} = \frac{Q_{die}}{A_{die}}$

\* Modelli di comportamento osservabili dal grafico:

- $T < T_s$  rigido-elastico, la deformazione è istantanea e dipende dalla viscosità, modello Maxwell
- $T > T_s$  viscoelastico, la deformazione è progressiva e dipende dalla viscosità, modello Kelvin
- $T_g \gg T_s$  liquido viscoso  
smorzatore: modello teorico



Stampaggio ad iniezione → è simile alla pressofusione dei metalli, il fuso (termoplasti o termoindurenti) è forzato in uno stampo diviso in due metà, grazie all'azione di un pistone idraulico o di una vite, nella maggior parte dei casi è a vite pistonante conica. I pellet sono introdotti in un cilindro riscaldato e portati a fusione, quando la camera d'iniezione è piena la vite smette di ruotare e spinge il polimero nello stampo. Il ritorno in fase liquida è compensato dalla sovrappressione e quello in fase solida con una sovradimensione dello stampo. Il processo risulta discontinuo: la vite si muove assialmente con estrattori, lo stampo deve essere sovradimensionato rispetto alla dimensione del pezzo del 6% ~ 7%

Termoformatura → consiste nel riscaldamento dei semilavorati per calandratura (deformazione plastica) fino allo stato plastico, con passaggio perimetrale allo stampo e adesione alla sua superficie interna. L'adesione è ottenuta creando il vuoto, in pressione, con un punzone o fra stampi accoppiati. Lo stampo può essere a due o tre segmenti. Le dimensioni dei pezzi possono essere notevoli, ma i tempi del ciclo (riscaldamento + stampaggio + raffreddamento) sono elevati, la qualità dei materiali è scarsa e gli oggetti devono avere forma semplice.

La materozza è a forma di parallelepipedo

$$M_1 = \frac{V_1}{S_1} = \frac{\frac{\pi}{4} d_1^2 \cdot l_1}{\pi d_1 l_1 + \frac{\pi}{4} d_1^2} = 11,1 \text{ mm}$$

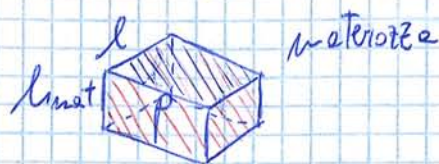
$$M_2 = \frac{V_2}{S_2} = \frac{\frac{\pi}{4} d_2^2 \cdot l_2}{\pi d_2 l_2 + 2 \frac{\pi}{4} d_2^2 - \frac{\pi}{4} d_1^2} = 13,3 \text{ mm}$$

$$M_2 > M_1 \Rightarrow M_{\text{mat}} = 1,2 \cdot M_2 = 16 \text{ mm}$$

$$l_{\text{mat}} = 150 - \frac{100}{2} = 100 \text{ mm}$$

$$M_{\text{mat}} = \frac{V_{\text{mat}}}{S_{\text{mat}}} = \frac{l_{\text{mat}} \cdot p \cdot l}{2 \cdot l_{\text{mat}} \cdot l + 2 \cdot p \cdot l_{\text{mat}}}$$

$$l = 50 \text{ mm}$$



$$16 = \frac{100 \cdot 50 \cdot p}{10000 + 200p} \Rightarrow p = 88 \text{ mm}$$

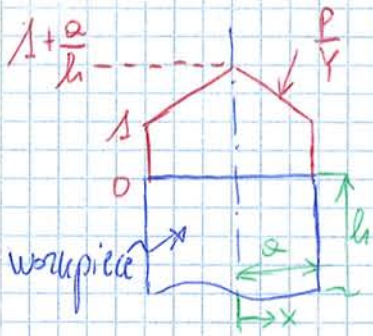
### (MODULO C)

- LAVORAZIONE PER DEFORMAZIONE → per deformazione plastica senza portare a fusione il materiale, seguita da finitura

I processi possono essere classificati a seconda della tipologia di deformazione:

- Lavorazione a caldo, il materiale viene riscaldato prima della lavorazione con una temperatura pari o superiore a  $T_f$ . Oggi grandi deformazioni e forme complesse con macchinari semplici più piccoli, ma è necessaria energia, tempo e aspetto organizzativo per il riscaldamento e si ha l'ossidazione del materiale (velocità d'ossidazione  $\propto T^2$ ) che crea uno strato lubrificante rendendo il materiale fragile, quindi la dimensione del pezzo non è controllabile e occorre maggiorare le dimensioni del 1%-2% con sovrametallo (calo-fuoco)
- Lavorazione a freddo → la lavorazione avviene a temperatura ambiente ed è agevolata da lubrificazione materiale-utensile (che si degraderebbe con il calore). Permette una miglior finitura superficiale e precisione del pezzo con comodità di manipolazione, ma solo per pezzi assial-simmetrici di piccole dimensioni, il processo è più complesso, gli stampi più costosi e non è utilizzato in maniera sistematica. Il pezzo lavorato a freddo può essere considerato un prodotto finito.
- Lavorazione a semi-caldo → le termocoppie controllano  $T$  ( $T \approx 800^\circ\text{C}$  per gli acciai). Si scalda a metà di  $T_f$  il materiale, la precisione e la finitura superficiale sono buone con deformazioni più consistenti, aumentano le forme dei pezzi lavorabili. Si ha un risparmio energetico rispetto alle lavorazioni a caldo.

- Modello di attrito per adesione



$$P = Y' \left( 1 + \frac{a-x}{h} \right)$$

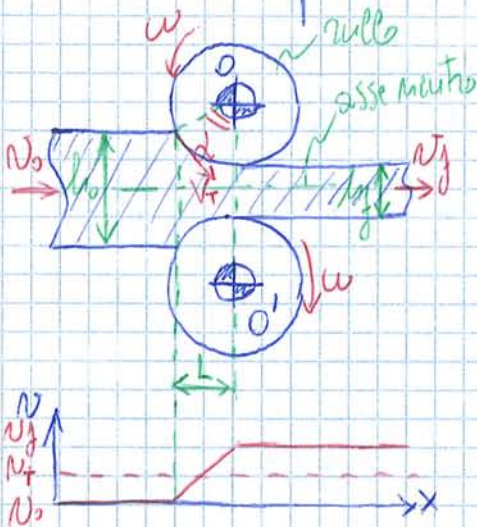
$$P = Y \left( 1 + \frac{a-x}{h} \right)$$

pezzi assialsimmetrici

## PROCESSO DI LAMINAZIONE

È un processo continuo che può essere primario per lingotti e secondario per finitura superficiale del materiale, il primo a caldo, il secondo a freddo. È una lavorazione precisa con un'elevata produttività. Il processo consiste nel ridurre la sezione trasversale del materiale passando nel vano compreso tra due cilindri rotanti.

Schema del processo: da lingotti o piatti vengono prodotti laminie, vergelle, fili...



$h_0$  spessore iniziale,  $h_1$  spessore finale,  $L$  arco di contatto  
 $\alpha$  angolo di contatto,  $N_0$  velocità iniziale  
 $N_T$  velocità tangenziale rullo,  $N_f$  velocità finale

A causa dell'attrito radente la lunghezza del materiale non cambia durante il processo  $W_0 = W_f$   
 ( $W_0$  larghezza del materiale).

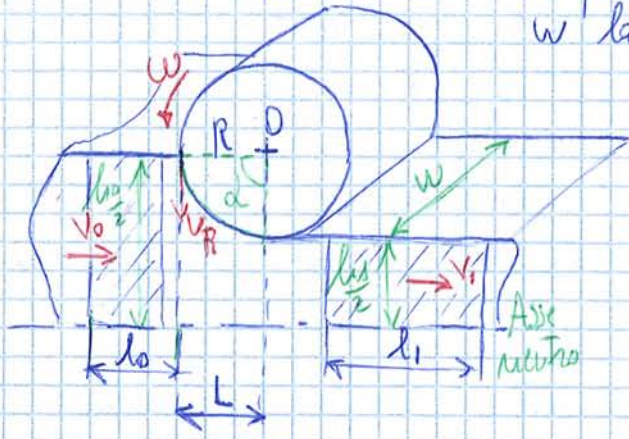
L'attrito volvente dei rulli causa una diminuzione dello spessore  $h_0 = h_1 + \Delta h$  e la lunghezza  $L$  aumenta.

Per la conservazione della portata la diminuzione di sezione è compensata da un aumento di velocità  $N_f > N_0 \Rightarrow Q = h_0 W_0 N_0 = h_1 W_0 N_f$

Si possono ottenere elevati volumi di semilavorati per successive lavorazioni (come barre tonde, quadrate o rettangolari o laminati finiti (laminie, profilati vari, tubi...))  $\Rightarrow$  da materiale prelaminato e laminie tubi saldati, fili, travi, tubi pieni, prodotti finiti o larghi piatti, billette, blumi (semilavorati).

La laminazione a caldo (in genere per acciai) permette grandi deformazioni con carichi modesti, mentre la laminazione a freddo (per leghe di Al) garantisce una buona finitura superficiale, precisione e uniformità di spessore senza la formazione di ossidi.

- Parametri di laminazione:  $L$  proiezione dell'arco di contatto sull'asse di laminazione  
 $w$  larghezza trasversale (costante)



$$V_0 l_0 w = V_s l_s w$$

$$\frac{V_s}{V_0} = \frac{l_0}{l_s} \quad \text{per la conservazione del volume}$$

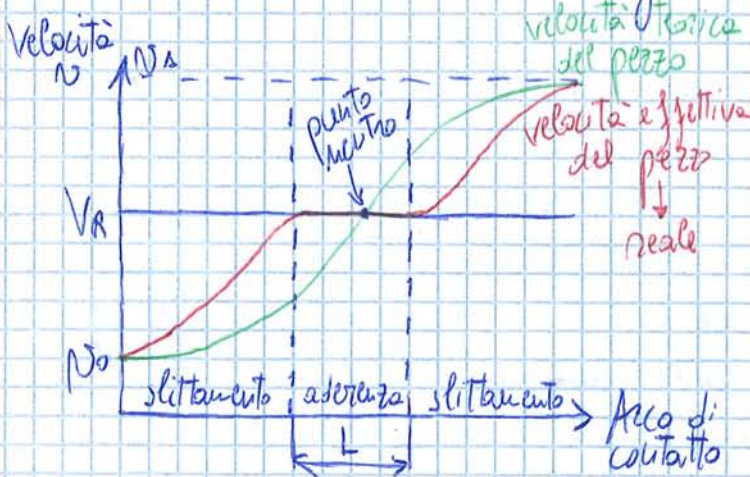
Riduzione di spessore  $\Delta l = l_0 - l_1$   
 Allungamento  $\Delta l = l_1 - l_0$   
 Allargamento  $\Delta w = w_1 - w_0$

La velocità di uscita del materiale  $V_1$  è maggiore di quella del rullo  $V_R$ , si crea il fenomeno della precessione.

Precessione  $P_r = \frac{V_1}{V_R}$

$P_r \approx 1,1, 1,2$  punto neutro vicino all'uscita  
 $P_r < 1$  slittamento del rullo con punto neutro dopo l'uscita  
 $P_r = 1 \Rightarrow V_s \approx V_R$  situazione ideale

Solo il punto neutro si trova alla velocità del rullo  $V_R$ , tale punto deve trovarsi all'interno dell'arco di laminazione altrimenti non si ha il trascinamento del pezzo. Per calcoli più corretti il punto neutro è collocato a metà nell'arco di contatto. Se non si ha precessione  $V_s \approx V_R$  il punto neutro coincide col punto d'uscita, ma è a limite dell'arco, quindi si ha in modo che sia più interno a metà di  $L$ . Come conseguenza la velocità del materiale aumenta

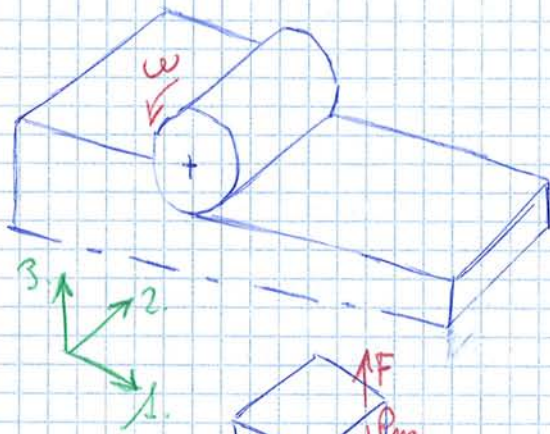


progressivamente dall'ingresso e l'uscita e la velocità periferica  $V_R$  è costante. Nella realtà il materiale in superficie viene accelerato più rapidamente. In corrispondenza della superficie c'è una zona neutra di aderenza.

Imbocco forzato  $\Rightarrow$  laminazioni a freddo  
 Imbocco automatico  $\Rightarrow$  laminazioni a caldo

- Condizione d'imbocco  $\rightarrow$  trascinamento del materiale da parte del rullo, bisogna studiare le forze agenti. L'angolo di contatto  $\alpha$  è fondamentale, nel caso di progettazioni realistiche il diametro del rullo è molto maggiore rispetto a quello della lamiera  $d_r \gg d_l$ , tuttavia verrà considerato  $d_r \approx d_l$ .

- Pressione media del rullo sul materiale  $\rightarrow$  ipotesi di deformazione piana in asse di attrito, in direzione 2. il materiale non si deforma (soluzione empirica con errore del 30%)

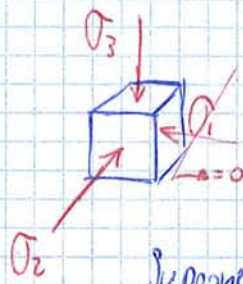


$$\epsilon_2 = 0 \Rightarrow \sigma_1 = 0, \sigma_2 = \sigma_m, \sigma_3 = -p_m$$

$p_m$ : pressione media

Applicando Von Mises

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} Y \Rightarrow p_m = \frac{2}{\sqrt{3}} Y$$

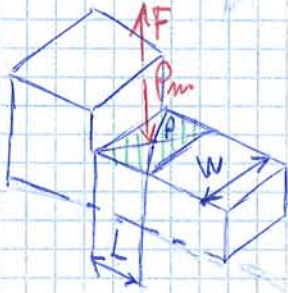


Supponendo lineare l'aumento della pressione lungo l'arco di contatto, in presenza di attrito:

$$p_m = \frac{2}{\sqrt{3}} Y \left( 1 + \frac{1}{2} \mu \frac{L}{h_m} \right)$$

$P$ : punti di applicazione della forza  $F$

$$h_m = \frac{h_0 + h_f}{2}$$



Al materiale esercita sui rulli una forza di separazione pari a:

$$F = p_m \cdot L \cdot W$$

- Calcolo della coppia e della potenza necessaria ai rulli per poter operare

$$C = 2 \cdot \frac{1}{2} L F = L F = p_m \cdot L^2 \cdot W$$

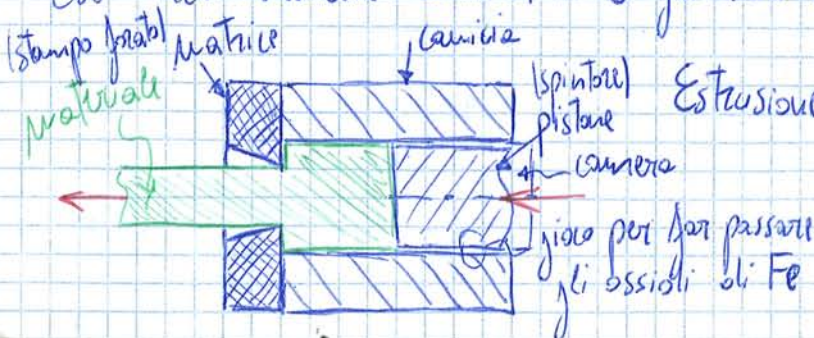
$$P = C \cdot \omega = p_m \cdot L^2 \cdot \omega \cdot W$$

- portata massica  $m = \rho \cdot h_f \cdot W \cdot v_f$  [t/h]  $\rightarrow$  produzione oraria

### • PROCESSO DI ESTRUSIONE E TRAFILATURA

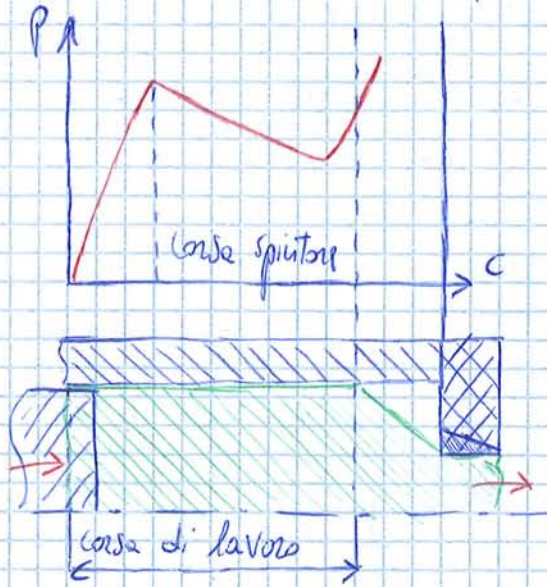
Si tratta di processi continui. Nel caso dell'estrusione è un processo unico di pura compressione, il materiale, però, deve essere presente in quantità minime rispetto alle dimensioni della macchina.

- Estrusione  $\rightarrow$  processo di forzamento per compressione del materiale, facendolo passare attraverso una sezione. Consente la produzione di barre lunghe con forme diverse (cilindriche piane, tubolari senza saldatura, variamente sagomate), con elevata produttività, precisione dimensionale e finitura superficiale, costi relativamente contenuti. È generalmente compiuta a caldo. Modalità:

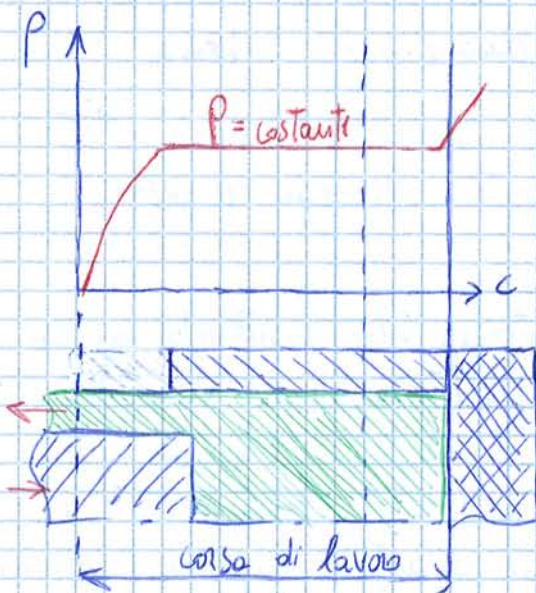


Estrusione diretta  $\Rightarrow$  il carico e il materiale hanno la stessa direzione. La matrice (die) è realizzata in materiali duri (carburi)

**Estensione diretta** → la pressione decresce all'avanzamento del pistone. Inizialmente ma una rapida crescita per vincere l'attrito durante il moto l'attrito diminuisce e quindi la pressione decresce. Avvicinandosi alla zona morta la pressione aumenta perché il materiale deve fluire rapidamente per uscire, fino a tendere a infinito nella zona morta. L'attrito dipende dalla lunghezza della billette e la pendenza nella zona di lavoro è funzione della velocità dello spintore. Per elevate  $P$  la camera di estensione può esplodere nell'ultimo tratto.



**Estensione inversa** → l'attrito è trascurabile durante la corsa dello spintore in quanto billette e pistone si muovono assieme, quindi la pressione richiesta è molto inferiore con un andamento costante. Questa condizione è preferibile, permette la produzione di elementi più grandi e si ha minor surriscaldamento. Tuttavia il pistone è più costoso, la lunghezza della corsa risulta limitata e si ha la formazione di difetti superficiali.



**Mechanica dell'estensione**

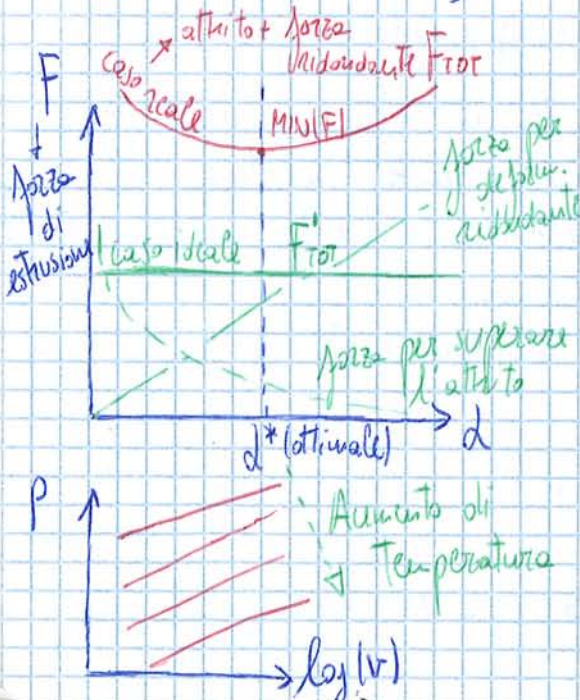
Il rendimento di deformazione  $\eta$  dipende: dalla forza di pura deformazione, dagli attriti interni, dagli attriti sul collare della matrice, al contatto con le pareti del contenitore, dalla distorsione delle linee di flusso in prossimità della filiera.

$\eta \approx 0,5/0,8$

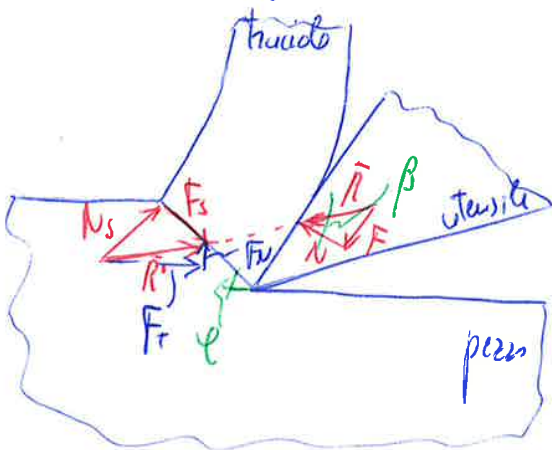
$N$ : velocità di estrusione (logv)

$\alpha$ : angolo di semiapertura della matrice

Si cerca il giusto compromesso tra il valore di temperatura  $T$  e la velocità di estrusione  $N$ .



- Dinamica del taglio (modello di Merchant)



$F_t - F_n$  forza principale di taglio e forza normale.

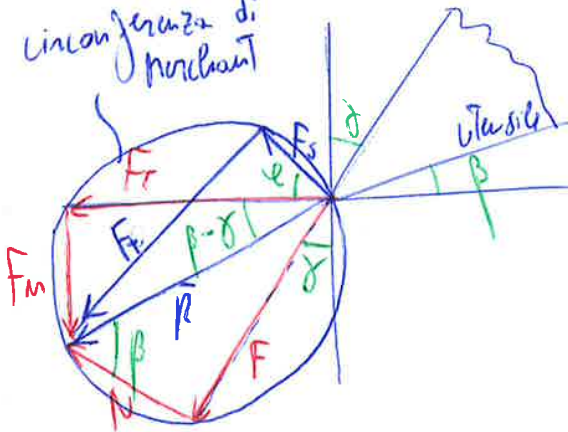
Truciolo = corpo libero in equilibrio sotto l'azione di  $R$  e  $R'$

$\bar{R} = \bar{R}'$  ( $\beta$  è l'angolo di attrito)

La forza scambiata tra utensile e pezzo può essere scomposta lungo direzioni di interesse tecnologico:

$N - F$  componente normale e tangenziale (o d'attrito) rispetto al petto dell'utensile  
 $N_s - F_s$  comp. normale e tangenziale rispetto al piano di scorrimento

circonferenza di Merchant



$F_r = R \cos(\beta - \delta)$

$F_n = R \sin(\beta - \delta)$

$F_s = R \cos(\phi + \beta - \delta)$

$F_t = R \sin(\phi + \beta - \delta)$

$F = R \sin \beta$

$N = R \cos \beta$

$F_s = A_s \cdot \tau_s$

Taglio => sul piano di scorrimento si raggiunge la tensione dinamica di scorrimento  $\tau_s$

$F_s = A_s \tau_s = \tau_s \cdot \frac{A_0}{\sin \phi}$  ( $\phi = \phi$ )

$A_s$  area del piano di scorrimento  
 $A_0$  area della sez. di truciolo prima del taglio

$R = \tau_s A_0 / [\sin \phi \cos(\phi + \beta - \delta)]$

$F_t = \tau_s A_0 \cos(\beta - \delta) / [\sin \phi \cos(\phi + \beta - \delta)]$ ,  $F_n = \tau_s A_0 \sin(\beta - \delta) / [\sin \phi \cos(\phi + \beta - \delta)]$

sul piano di scorrimento agisce la  $\tau_{max}$ :  $\frac{d\tau_s}{d\phi} = 0 \Rightarrow \cos(2\phi + \beta - \delta) = 0$   
 $2\phi + \beta - \delta = \frac{\pi}{2}$

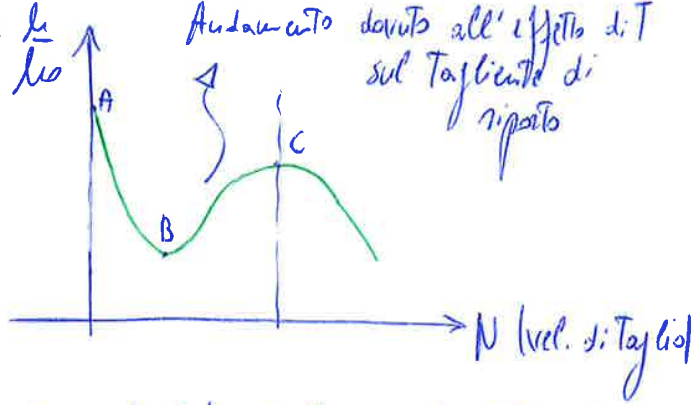
Si ricava la legge empirica di Ernst e Merchant  
 due leggi tra loro gli angoli caratteristici:  $2\phi + \beta - \delta = \frac{\pi}{2}$

(versione migliorata con risultati sperimentali  $2\phi + \beta - \delta = c$ )

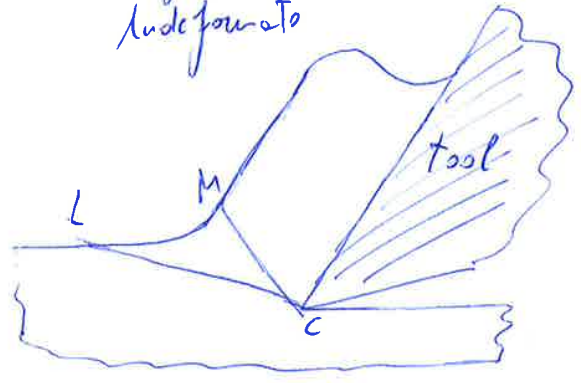


- INFLUENZA DELLA VEL. DI TAGLIO

$$\epsilon = \frac{L_d}{L_0}$$



$$\epsilon = \frac{L_{deformato}}{L_{undeformato}}$$



La zona di def. plastica è limitata dai piani questi si hanno lung. diverse con diverse  $\epsilon$ :

CL  $\Rightarrow$  lunghezza max., tensione minima

CM  $\Rightarrow$  lunghezza min., tensione max., oltre CM non si ha deformazione

Basse  $V_T \Rightarrow$  i grani si deformano tra CL e CM

Alte  $V_T \Rightarrow$  ritardo nell'inizio def. dei grani e ritardo minore nella fine def.

CL si avvicina a CM con  $V_T / def.$

CL e CM. per i piani compresi tra

- ANGOLI DELLA SEZ. NORMALE (Utensile monotagliante)

$\alpha$ : ang. di spoglia superiore principale, formato dalla faccia (o petto) con il piano di riferimento in una sez. A-A normale alla proiezione del tagliante principale sul piano di riferimento (positivo se il tagliante principale è al di sotto del piano di rif. Regola d'oro in gioco, angolo di scorrimento  $\rightarrow$  deve essere più elevato possibile)

$\gamma$ : ang. di spoglia inferiore principale, formato nella sez. di A-A del fianco principale con un piano contenente il tagliante principale e perpendicolare al piano di rif.

$\gamma''$ : ang. di spoglia inf. secondario formato dal fianco secondario con un piano contenente il tagliante secondario e normale al piano di rif. in una sezione B-B normale alla proiezione del tagliante secondario sul piano di rif.

$\phi$ : formato dalla faccia con il fianco principale nella sez. A-A (angolo di taglio)

Influenza degli angoli:

- di spoglia inferiore principale  $\alpha$
- di spoglia superiore principale  $\gamma$
- del tagliante principale  $\phi$
- di registrazione  $X$

di inclinazione  $\lambda \Rightarrow$  verso del truciolo interno / esterno

Per  $d=0$  si ha il tallonamento della punta, per risolverlo si affila la punta, causando una diminuzione di  $\alpha$  e  $\gamma$  dalla periferia all'asse della punta (Andamenti in affilatura in rosso)

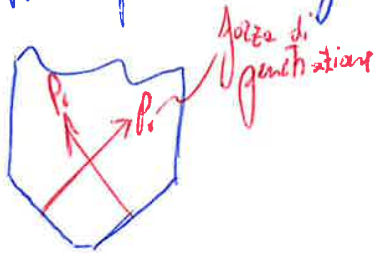
- Alésatura: parte anteriore d'imbocco conica  
 parte successiva, guida cilindrica leggermente rastremata verso il codolo per ridurre l'attrito contro la superficie del foro alesato

Alésatori  $\left\{ \begin{array}{l} \text{a denti dritti (vibr. di tipo torsionale)} \\ \text{a denti elicoidali} \end{array} \right.$

- Maschiatura: codolo cilindrico, attacco quadrangolare. Il dorso del tagliente ha un opportuno angolo di spoglia inferiore.

operazioni 1- sbazzatura, 2- passata intermedia, 3- finitura  
 (manualmente si utilizzano tre tipologie di utensili)

- Coppia potenza di taglio



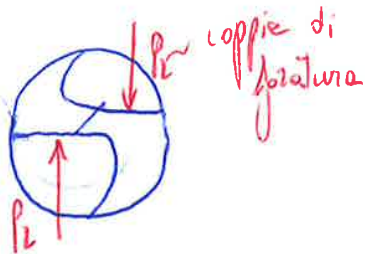
$P_t = \text{pressione di taglio [MPa]}$

Coppia  $C = \frac{\alpha \cdot D^2}{1000} P_t \text{ [N.m]}$

potenza

$W = C \frac{2\pi}{60} n \text{ [W]}$

$MFR = \frac{D}{2} \cdot \frac{\alpha}{2} \cdot V_t = A_0 \cdot V_a$



$T_{eav} = \frac{L}{\alpha \cdot n}$

### **Estrusione**

Rapporto di estrusione:  $R = A_o/A_f$

Pressione di estrusione, ideale:  $p = Y \ln R$

Pressione di estrusione, con attrito:  $p = Y \left( 1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) [R^{\mu \cot \alpha} - 1]$

### **Trafilatura di barre e di filo**

Tensione di trafilatura, ideale:  $\sigma_d = Y \ln \left( \frac{A_o}{A_f} \right)$

Tensione di trafilatura, con attrito:  $\sigma_d = Y \left( 1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \left[ 1 - \left( \frac{A_f}{A_o} \right)^{\mu \cot \alpha} \right]$

Pressione in matrice:  $p = Y_f - \sigma$

La filiera è caratterizzata da uno smusso in entrata per l'imbocco del filo e dell'olio, un tratto calibrato che determina le dimensioni finali e uno smusso d'uscita per evitare di tagliare il filo. Per ogni passaggio la variazione di diametro è minima quindi occorrono ripetuti passaggi per ottenere il diametro desiderato.  $\alpha$  è un compromesso tra il basso lavoro d'attrito e il basso lavoro di distorsione (fattibile  $\alpha \approx 10^\circ$ )

A seguito della trafilatura si eseguono trattamenti termici per ridurre l'incrudimento (ricottura, normalizzazione, patentamento o tempra a  $T = 500^\circ\text{C}$ ).

La forza di trafilatura è funzione della riduzione di sezione  $R = \frac{A_0}{A_f}$ , distorsione dovuta alla conicità della matrice e all'attrito sulle superfici a contatto. Per poter tirare il trafilato all'uscita della filiera  $F$  non può superare il carico massimo ammissibile a trazione, pena la rottura:

$$F < Y \cdot A_f \quad C: \text{lunghezza del filo all'uscita della filiera}$$

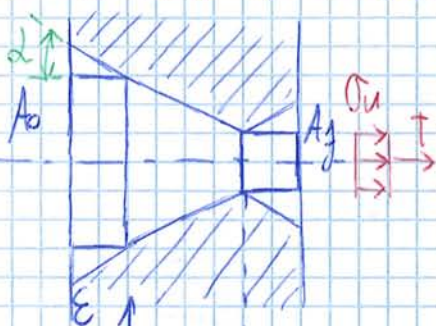
Lavoro di def. uniforme ideale  $L = Y \cdot \epsilon \cdot V = Y \cdot \epsilon \cdot A_f \cdot C$

Lavoro della forza di trafilatura  $L = F \cdot C \quad F = Y \cdot \epsilon \cdot A_f$

Valori reali  $L_R = \frac{Y \cdot \epsilon \cdot A_f \cdot C}{\eta} \quad F_R = \frac{Y \cdot \epsilon \cdot A_f}{\eta} \quad (F_R \approx \text{pochi N})$

La massima riduzione di sezione si ha per  $F_R = \frac{Y \cdot \epsilon \cdot A_f}{\eta} < Y \cdot A_f$   
 $\Rightarrow \epsilon < \eta$  ( $\epsilon$ : def. massima ammissibile)

Nel caso reale la riduzione subisce un ulteriore calo a causa di altri fattori. Idealmente la distribuzione di tensione è uniforme, nella realtà la tensione è nulla in centro e massima in superficie per le condizioni di aggraffaggio delle pulizze.



$$\sigma_u = \phi \bar{Y} \left(1 + \frac{\mu}{2}\right) \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right)$$

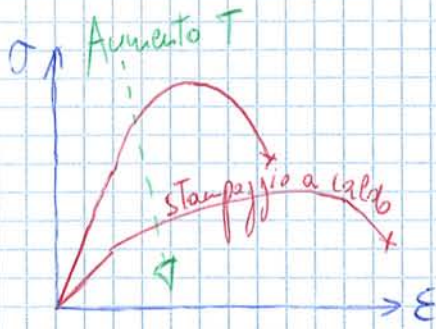
$$\phi = 1 + 0,12 \left(\frac{L_f}{L}\right) \quad \text{fattore di inomogeneità}$$

Tensione di trafilatura (formula utile)

$$\sigma_u = \bar{Y} \left[ \ln R \left(1 + \frac{\mu}{2}\right) \right] \quad R = \frac{A_0}{A_f}$$

$\bar{Y}$ : tensione media di plasticità per incrudimento.

A causa dell'imbobinatura del filo nascono tensioni residue con direzione trasversale, longitudinale e radiale.



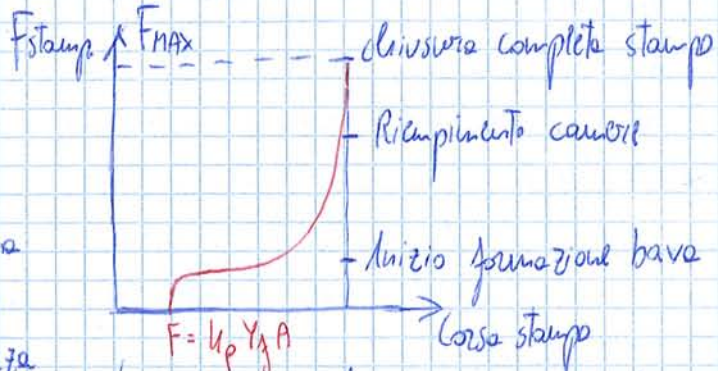
Le perdite per calo-fuoco (ritiro ed ossidazione) impongono la presenza di canali scarta bava che compensano l'eccesso di massa previsto e favoriscono il completo riempimento della cavità dello stampo. Evitano anche le sovrappi del metallo in eccesso. Si maggiorano le dimensioni

del pezzo del 5-10% per il canale di bava, il processo è a massa non costante e la formazione della bava comporta un aumento della forza necessario dato che aumenta la superficie del pezzo (forza di stampaggio).



$s, b$  tabellati  $\Rightarrow \frac{b}{s} \gg 1$  entra poco materiale  
 $\left( \frac{b}{s} = \frac{b \cdot s}{\sqrt{D}} \right)$   $\frac{b}{s} \ll 1$  entra troppo materiali

canale di bava  
 camera scarta bava  
 $D$ : diametro del piano di divisione  
 Le presse vanno dimensionate per poter esercitare la forza massima necessaria, i magli invece usano forze impulsive e il valore della forza non è fondamentale.



$F = k_p \cdot Y_p \cdot A$   
 $\left( s = 0,017 \cdot D + \frac{1}{\sqrt{D+s}} \right) \Rightarrow$  spessore con relazione empirica

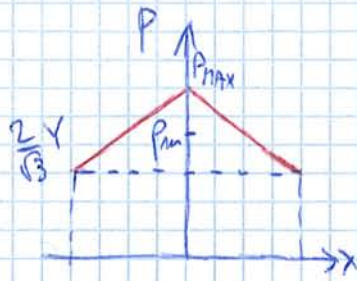
"maglio"  
 $m \ll M$   
 per convertire tutta l'energia in deformazione  
 $N = \sqrt{2gh}$



A difetti da stampaggio sono:

- buccia d'arancia, i grani superficiali ricristallizzano in grani grandi
- bruciature, qualche grano fonde durante lo stampaggio
- tasche, il pezzo si ripiega su se stesso formando delle tasche d'aria sotto la superficie

Ciclo di stampaggio:  
 1- Riscaldamento del pezzo,  $T_{quinta} > T_{rice}$   
 2- Sbozzature - formatura, deformazione preliminare  
 3- Stampaggio, compressione del pezzo su magli o presse



$$P(x) = \frac{2}{\sqrt{3}} Y \left( 1 + 2 \frac{m}{l} (a-x) \right) \quad P_m: \text{pressione media}$$

$$P_{max} = \frac{2}{\sqrt{3}} Y \left( 1 + 2 \frac{ma}{l} \right) \quad P_{min} = \frac{2}{\sqrt{3}} Y$$

Forza di stampaggio  $F = P_m \cdot S$

Nei processi discreti:  $Y_{finale}, \sigma_f, l_f \quad Y \rightarrow C \cdot \epsilon^n \quad \epsilon = \ln \left( \frac{l_{02}}{l_{01}} \right)$

Caso reale  $F_{reale} = k \cdot p \cdot S$  |  $k$  tabellata: 3-5 pezzi semplici senza bava  
 5-8 pezzi semplici con bava  
 8-12 pezzi complessi con bava

• FORMATURA DELLA LAMIERA

La formatura involve pezzi con un alto rapporto di area su volume, in genere le lamiera non hanno spessori inferiori ai 6 mm. Il processo è denominato anche stampaggio o pressatura, i laminati più sottili sono disponibili in rotoli o coil. Prima della formatura i pezzi vengono tagliati nella lamiera con taglio meccanico, laser, sega ad acqua... ecc.

- Processi principali:
- Drawing (imbuttitura profonda) per profili arrotondati e profondi con forme semplici, alta produzione e alto costo delle macchine.
  - Roll forming (profilatura a rullo o calandratura) per pezzi lunghi con sezione costante complessa, buona finitura, alta produzione e alto costo macchine.
  - Spinning (piegatura, imbutitura) per pezzi piccoli o a grande simmetria assiale, buona finitura, basso costo utensili, ma alto per lavoro manuale.
  - Stamping (stampaggio) per forme semplici o complesse con alte produzioni e alta automazione.
  - Superplastic forming (formatura superplastica con riscaldamento) per forme complesse, dettagli fini, ottime tolleranze, lunghi tempi di formatura, produzioni basse, solo alcune leghe sono utilizzabili.

La zona di strizione nelle lamiera è generalmente obliqua e inclinata di 55°

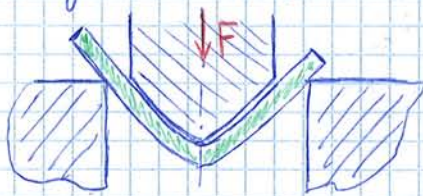


La zona di snervamento è ampia perché convivono zone plastiche ed elastiche che diminuiscono con il procedere. Se si interrompe la deformazione durante lo snervamento si osserva l'alternarsi di zone note come bande o strature di Luders. Tali bande non hanno nessun effetto meccanico, sono visibili ad occhio nudo e danno problemi

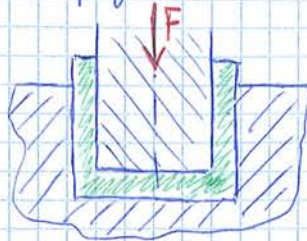
Al gioco tra matrice e punzone aiuta a garantire il moto e l'inclinazione dei fratture concorrenti. Con gioco troppo stretto si formano due fratture parallele con troppo gioco la deformazione iniziale prima dell'innesco è eccessiva e la rottura avviene per allungamento invece del taglio a causa del cattivo allineamento punzone - matrice.

Processi di tranciatura: nella punzonatura lo scarto è rappresentato dalla lamiera sotto il punzone (per fori), profilatura al contrario la lamiera deve avere il contorno desiderato portando via materiale dal bordo.

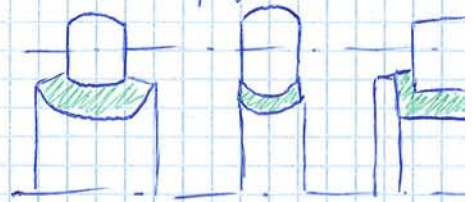
- Piegatura → è possibile distinguere piegatura libera, in stampo o profilatura a rulli



Libera



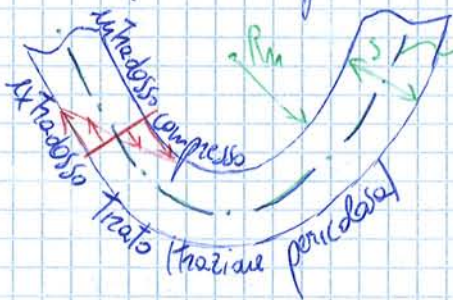
In stampo a forma di U



Profilatura a rulli

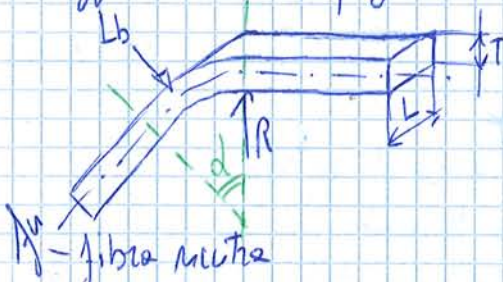
Nella profilatura i rulli non sono motorizzati e non laminano. Al treno di rulli permette una deformazione progressiva con lavorazione migliore.

Schema delle deformazioni di piegatura: un'eccessiva trazione piegando troppo il materiale induce ad una rottura del pezzo.



È importante considerare il rapporto tra il raggio e lo spessore.

Raggio minimo di piegatura



R: raggio di curvatura    d: raggio di piegatura  
L<sub>b</sub>: lunghezza della fibra neutra

$$L_b = d(R + kT)$$

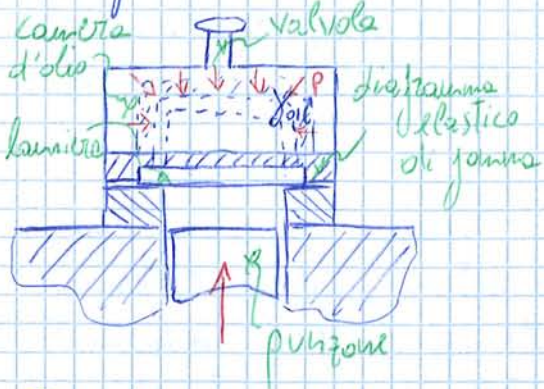
$\begin{cases} k = 0,33 & \text{se } R < 2T & \text{piega stretta (fm interna)} \\ k = 0,5 & \text{se } R > 2T & \text{piega larga (fm a metà)} \end{cases}$

$$\epsilon_0 = \epsilon_1 = \frac{1}{\frac{2R}{T} + 1}$$

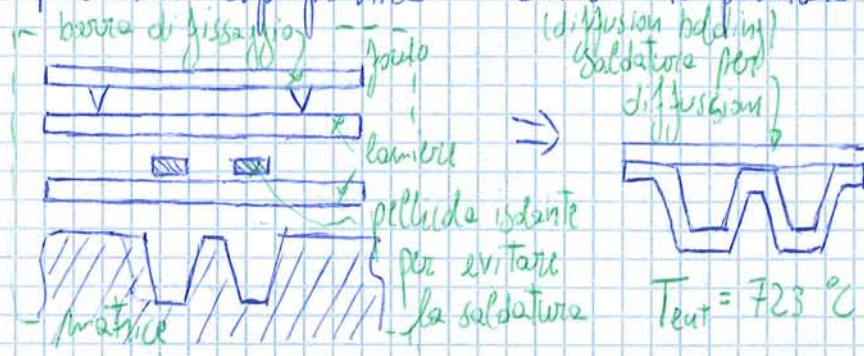
le fibre interne ed esterne subiscono la stessa deformazione.

$$\epsilon_0 = \ln(1 + \epsilon_1) = \ln\left(\frac{R+T}{R+\frac{T}{2}}\right)$$

- **Adesofornatura** → l'olio elimina gli attriti da sfregamento, la sua pressione garantisce l'aderenza in maniera uniforme risolvendo molti problemi causati dalla matrice. Il processo è ideale per materiali poco duttili, con grandi dimensioni e grandi costi. L'olio presenta limiti di pressione oltre il quale si rinvia solidificandosi.



- **Fornatura superplastica** → con una temperatura  $T$  prossima all'eutettoide, si ha un comportamento superplastico con una duttilità tendente all'infinito con deformazioni uniformi elevate senza arrivare a rottura. La velocità di def. deve essere bassa.



- **Teoria della trave per piegatura**

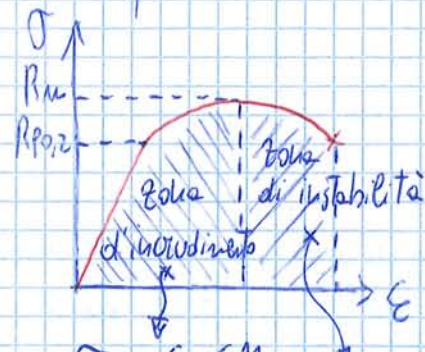
Carico di flessione  $\sigma_y = \frac{F \cdot L}{4W}$

$W$ : modulo resistente  $W = \frac{b \cdot s^2}{6}$

(Approssimazioni  $\sigma_y \approx 2Y$  se  $L \approx b \geq 12s$ ,  $R = s$ )

Forza di piegatura  $F = K \cdot \frac{L \cdot s^2 \cdot \sigma_y}{b}$

- **Acciai per imbutitura** o da lamiera → devono garantire determinati  $R_m$  e  $R_{p0.2}$  ( $P_{0.1}$ ,  $P_{0.2}$ ,  $P_{0.3}$ ...  $P_{0.6}$  numero elevato = miglior imbutitura). Il materiale è duttile e la zona di strizione molto diffusa.



Prima dell'instabilità  $\sigma = f(\epsilon)$  crescente,  $s$  si riduce  
 Dopo l'instabilità  $\sigma = f(\epsilon)$  crescente  
 $R_{eH} \approx R_{p0.2} \approx 200$  MPa tensione di snervamento basse tranne per stampatura.

$\sigma = C \cdot \epsilon^n$  (rafforzamento)

$\sigma = \dot{\epsilon}^m \cdot k$  (comportamento viscoso)

Quando la zona di strizione è diffusa il comportamento del materiale è duttile

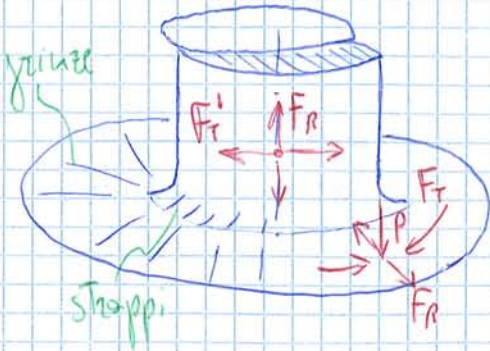


$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma$       $\frac{d(C \cdot \epsilon^n)}{d\epsilon} = C \cdot \epsilon^{n-1}$

$n \cdot C \cdot \epsilon^{n-1} = C \cdot \epsilon^{n-1} \Rightarrow \epsilon = n$  per incrudimento



Stato di sollecitazione dell'imbutito: agisce uno sforzo di trazione biassiale che consente un allungamento maggiore del monoassiale.



Pressione del premilaminiera, evita la formazione di grinze, ma fissa la lamiera.  
 $F_R$  forze di resistenza che trattengono la lamiera e la deformano per trazione, sono generate dall'attrito del punzone con la parete delle lamiera.

$F_T$  forze di compressione che generano grinze, spostandosi verso l'interno la circonferenza si riduce, ma in direzione circonferenziale la tensione non è permessa.  
 $F_P$  trazione generata dal vincolo punzone-matrice, se elevata strappa il raccordo di fondo.

La variazione di spessore del pezzo è presente sul fondello dell'imbutito a causa delle tensioni di trazione, nel tratto di raccordo tra il corpo cilindrico e il fondello e dal raccordo inferiore fino a quello superiore con la flangia per effetto delle forze circonferenziali  $F_T$ .

Dalla geometria del pezzo dipendono: sforzo d'imbutitura, pressione sul premilaminiera, numero delle fasi di lavorazione.

Rapporto d'imbutitura:  $\beta_i = \frac{d_p}{D}$   
 $d_p$  diametro del punzone  
 $D$  diametro iniziale del disco di lamiera.

Rapporto massimo d'imbutitura:  $\beta = \frac{D}{d_p}$

non è possibile superare certi valori, per superarli servono più imbutiture

$$d_{p_i} = \frac{D}{\beta_i} \rightarrow d_{p_2} = \frac{d_{p_1}}{\beta_1} \rightarrow d_{p_n} = \frac{d_{p_{n-1}}}{\beta_1} \quad \text{sequenza di passaggi}$$

Nel caso di sviluppo di scatolati la lamiera sui lati piani (piegatura) scorre più veloce che nei raccordi agli angoli (imbutitura). La differenza genera grinze sulle pareti con eccesso di materiale posto in precedenza sul premilaminiera, che in seguito formeranno le orecchie. Per rallentare la lamiera si aggiungono i non pieghina in corrispondenza della matrice e del premilaminiera.

Forza d'imbutitura (per pezzi cilindrici):  $F = k \cdot d_p \cdot \pi \cdot s \cdot Y$   
 $\approx 3 \text{ sup. fondello}$   
 $k$ : fattore di correzione  $k \approx 0,9/1$   
 $Y$ : tensione di snervamento  
 $s$ : spessore lamiera

Pressione media  $P_m = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{Y} \left( 1 + \frac{1}{2} \mu \frac{L}{l_m} \right) = 187 \text{ MPa}$

$l_m = \frac{l_o + l_f}{2} = 9,5 \text{ mm}$

Forza di separazione  $F = P_m \cdot L_o \cdot w = 7300 \text{ kN}$

Coppia necessaria  $C_i = F \cdot L = 179 \text{ kN} \cdot \text{m} = 179000 \text{ Nm}$

$V_f = P \cdot V_R = 2,2 \text{ m/s} \Rightarrow$  portata oraria  $\dot{m} = \rho \cdot l_f \cdot w \cdot V_f = 103 \frac{\text{t}}{\text{h}}$

3.271 Una barra tonda in acciaio INOX AISI 302 ( $C = 1300 \text{ MPa}$ ,  $m = 0,3$ ) viene trafilata in un solo passaggio da  $\phi_o = 10 \text{ mm}$  a  $\phi_f = 8 \text{ mm}$  con rendimento  $\eta = 0,7$ . Nota la velocità in uscita  $0,5 \text{ m/s}$  calcolare la potenza richiesta e la pressione nella sezione d'uscita.

$\epsilon = \ln \frac{A_o}{A_f} = \ln \left( \frac{\phi_o}{\phi_f} \right)^2 = 2 \ln \left( \frac{\phi_o}{\phi_f} \right) = 0,45$  ( $\epsilon < \eta$  trafilabile)

$\bar{Y} = C \cdot \frac{\epsilon^m}{m+1} = 787 \text{ MPa}$   $\epsilon_q = \epsilon$  monoassiale

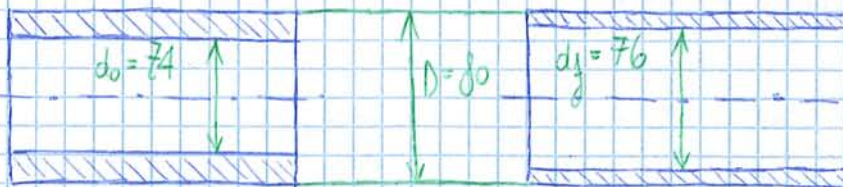
Forza  $F_{reale} = \frac{\bar{Y} \cdot \epsilon \cdot A_f}{\eta} = \frac{\bar{Y} \cdot \epsilon \cdot \frac{\pi \phi_f^2}{4}}{\eta} \approx 26 \text{ kN}$  Potenza  $P = F_{re} \cdot V_f = 12,7 \text{ kW}$

Tensione di trafilatura  $\sigma_T = \frac{F_r}{A_f} = 489 \text{ MPa}$

Allungamento  $Y_f = C \cdot \epsilon_f^m = 1023 \text{ MPa}$   $Y = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T + P$

Pressione nella sezione d'uscita  $P = -\sigma_T + Y = 524 \text{ MPa}$

3.281 Calcolare la forza e la potenza necessaria per trafilare un tubo C40. La velocità d'ingresso è  $10 \text{ m/min}$  e il comportamento alle deformazione è dato da  $C = 500 \text{ MPa}$  e  $m = 0,3$



$A_o = \pi \frac{D^2}{4} - \pi \frac{d_o^2}{4}$

$A_f = \pi \frac{D^2}{4} - \pi \frac{d_f^2}{4}$

$\Rightarrow A_o = 726 \text{ mm}^2$

$A_f = 480 \text{ mm}^2$

$\epsilon = \ln \frac{A_o}{A_f} = 0,38$

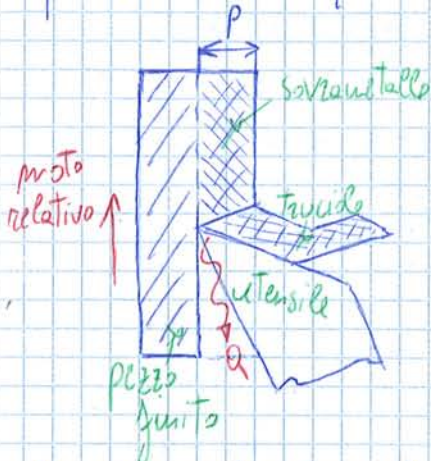
$\bar{Y} = C \cdot \frac{\epsilon^m}{m+1} = 290 \text{ MPa}$

Forza  $F = \bar{Y} \cdot \epsilon \cdot A_f = 55,4 \text{ kN}$

(MODULO D)

- GENERALITÀ SUL PROCESSO DI TAGLIO

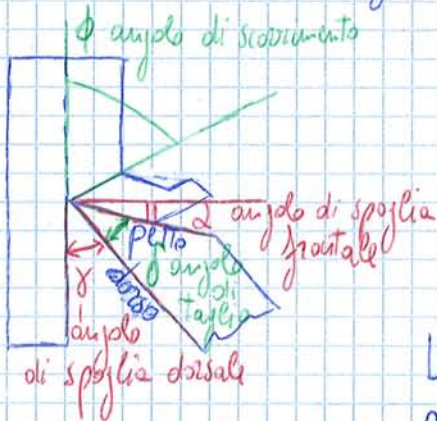
Nelle lavorazioni per asportazione di truciolo con perdita di massa si ottiene il prodotto finito rimuovendo parte del materiale grezzo (sovrametallo) sotto forma di truciolo. Il truciolo è separato da utensile che si trova in moto relativo rispetto al pezzo tagliando il materiale. I processi di asportazione hanno il più alto grado di precisione, sono quindi necessari per il prodotto finito.



Per descrivere il taglio si usa un modello teorico: l'utensile si muove in direzione ortogonale alla direzione di taglio, il moto relativo dell'utensile è quindi perpendicolare al piano di taglio. Tutti i piani dove avviene il taglio sono uguali tra loro.

Lo sviluppo di calore rivela che si tratta di un processo di deformazione plastica, il truciolo diventa incandescente (il taglio genera una quantità di calore trascurabile).

Al calore sviluppato e la pressione possono saldare una parte di materiale all'utensile in tal caso si ha il tagliante di riporto (T compresa tra 300-600 °C).



L'utensile fa scorrere il materiale lungo il piano di scorrimento plasticamente, controllando la frattura ottenendo così precisioni elevate. La ricalcatura permette lo scorrimento, l'utensile ha bisogno di un certo spessore per l'asportazione dell'ocraio senza rottura.

L'angolo di spoglia è l'angolo tra la superficie perpendicolare al pezzo e il petto dell'utensile, più

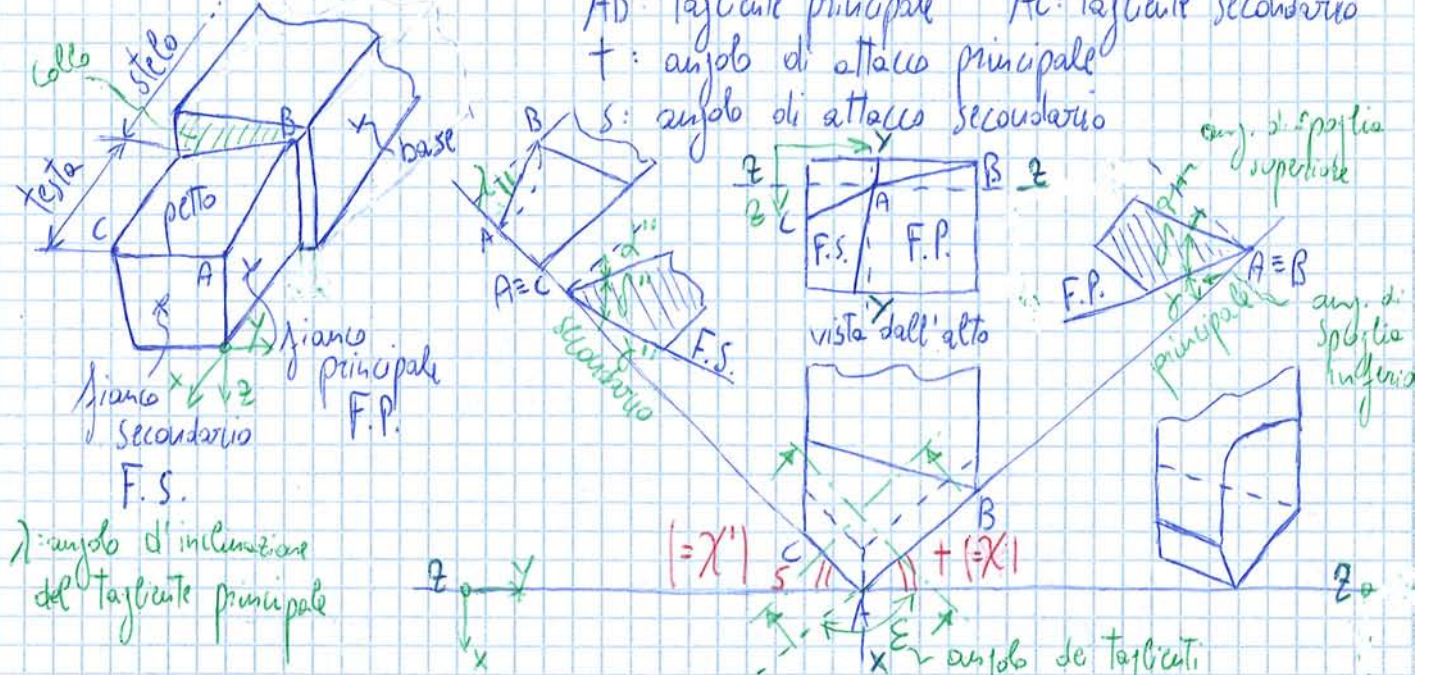
$\alpha$  è elevato e più è facilitato il processo di taglio. I materiali moderni duri e fragili hanno bisogno di  $\alpha \leq 0$ , a causa del rischio di generare un momento sflettente che può spezzare il pezzo.

$\gamma$  è l'angolo tra il dorso dell'utensile e la superficie del pezzo, esso non è critico ma serve necessariamente  $\gamma \neq 0$  per evitare lo strisciamento dell'utensile sul pezzo detto tallonamento.

L'angolo di taglio  $\delta = 30^\circ - (\alpha + \gamma)$  definisce la robustezza dell'utensile.

-Modello "carte da gioco" - utilizzato per la descrizione del processo (modello di Piispinen)

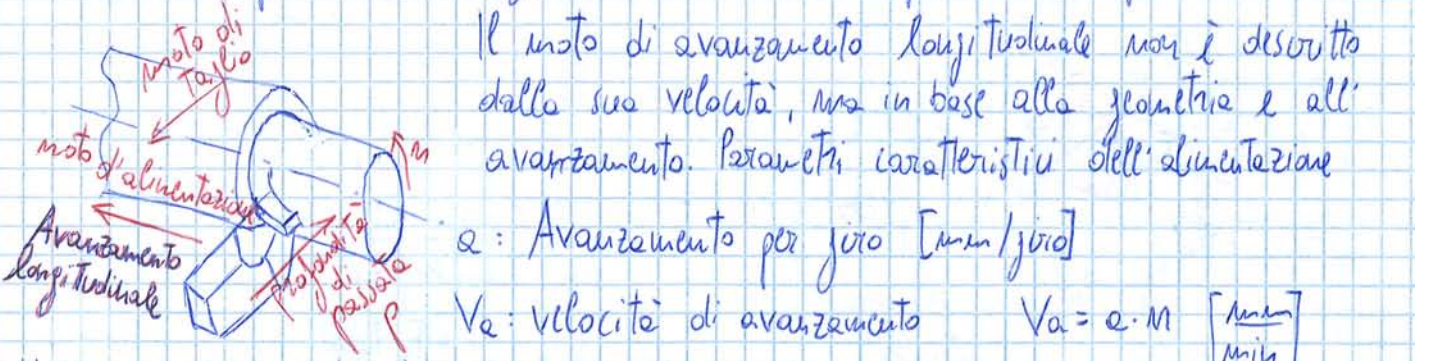
- L' utensile monotagliante → rappresenta l' utensile reale per l' asportazione di truciolo



Il moto relativo tra pezzo ed utensile è detto moto di taglio, può essere rotatorio, traslatorio, posseduto dal pezzo o dall' utensile (per pezzi assialsimmetrici viene impiegato il tornio).

Velocità di taglio:  $V_r = \frac{\pi D m}{1000} \left[ \frac{m}{min} \right]$  D: diametro del pezzo [mm]  
m: velocità di rotazione [rpm]

Il moto di alimentazione è perpendicolare alla direzione di taglio, è sempre di tipo traslatorio e può essere longitudinale o trasversale, posseduto dal pezzo o dall' utensile



Nelle macchine automatiche  $V_a$  dell' utensile è massima.  
 Il moto di appostamento definisce la profondità di passata  $p$  [mm]

Il moto di lavoro è il moto risultante dalla composizione del moto di taglio e del moto di alimentazione, il tipo di moto di taglio viene usato per classificare le macchine utensili.

$S_{truciolo} = a \cdot p$  Sezione del truciolo

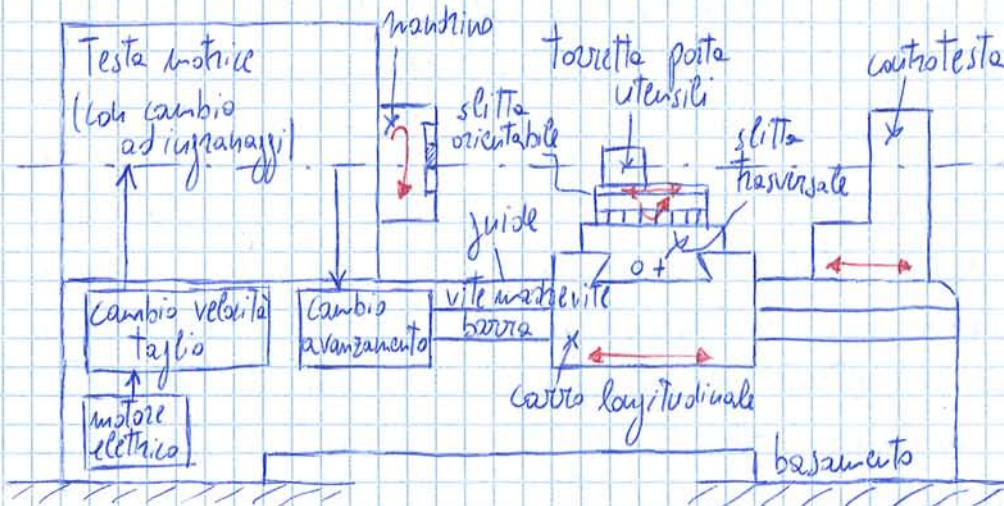
(Tornio)  
 piedi + permettono un' usura inferiore

Per effetto dell'usura sull'utensile si crea un cratere d'usura che lo indebolisce. A basse velocità di taglio si ha il tagliente da riparto.

- Portata volumica del truciolo:  $Q = 1000 \cdot P \cdot a \cdot V_f$   $P [mm^2]$ ,  $a [\frac{mm}{giro}]$ ,  $V_f [\frac{mm}{min}]$

Durata:  $T = \frac{l + l_a + l_u}{a \cdot M}$   $l$ : lunghezza pezzo,  $l_a$ : lunghezza extracorsa in entrata,  $l_u$ : lungh. extracorsa in uscita

- TORNITURA → lavorazione al tornio. Schema di un tornio parallelo:



mandrino: piattaforma auto-centrante  
guide: create sopra al bancale  
utensile: monotagliente

### Tipologie di tornitura

per superfici concentriche cilindriche all'asse

- Tornitura cilindrica esterna, avanzamento longitudinale dell'utensile
- Tornitura conica, avanzamento longitudinale e radiale verso il pezzo dell'utensile. Ciò è permesso dalla rotazione della torretta porta utensile
- Tornitura piana (sfacciatura), per superfici piane perpendicolari all'asse di rotazione
- Profilatura, per superfici complesse esterne con generatrice a tratti rettilinei e curvilinea
- Filettatura con utensili specifici
- Formatura di gole ad avanzamento frontale (per gole interne ed esterne),  $a$  = passo del filetto deve essere costante.
- Troncatura, Foratura con punta elicoidale, godronatura (incisione per ziguratatura), alesatura o allisciatura lungo l'asse con un alesatore a denti.

Portata volumetrica di truciolo:  $MRR = 1000 \cdot P \cdot a \cdot V_f = 1000 \cdot P \cdot a \cdot \frac{\pi \cdot D_m \cdot n}{1000}$

Tempo di lavorazione:

$$T = \frac{l + l_a + l_u}{a \cdot M}$$

sup. del Truciolo

velocità di avanzamento

percorso complessivo in lunghezza

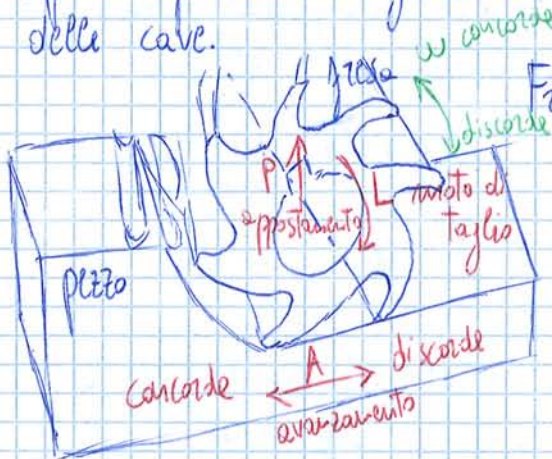
L'alesatore è leggermente conico, non allarga il foro ma lo rifinisce lavorando sui fianchi e asporta più materiale proseguendo nell'avanzamento. Se occorre si esegue la maschietture, una filettatura interna del foro. Il tagliente non è continuo, ma costituito da una serie di denti triangolari.

-Fresatura → processo di lavorazione di superfici piane o inclinate, usato per realizzare scanalature e cavità su pezzi privi di asse di simmetria rotazionale o assialsimmetrici se le cavità sono fuori dall'asse. La fresa è un utensile a più taglienti.

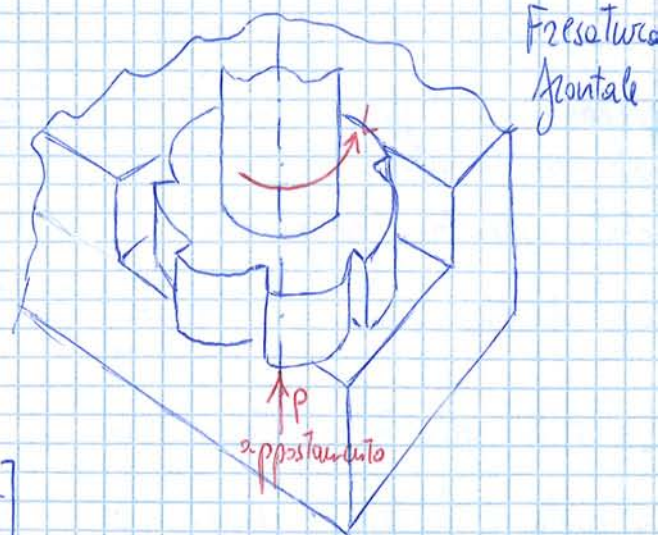
Tipologie di taglio:

- Fresatura periferica, i taglienti sono sul bordo laterale della fresa, il suo asse di rotazione è parallelo alla superficie. La fresa, cilindrica o a disco, è molto rigida a causa del montaggio. L'albero in cui viene calata è bloccato da vincoli come linguette.
- Fresatura frontale, i taglienti sono sulla superficie frontale della fresa, l'asse di rotazione è perpendicolare alla superficie di lavorazione. La fresa è montata a sbalzo: viene aggirata da un solo lato perciò è meno rigida, sono possibili lavorazioni più complesse, ma non sopporta grandi sforzi.

Tipiche operazioni di fresatura sono la spianatura, la contouratura e le lavorazioni delle cave.



Fresatura periferica



Fresatura frontale

velocità di taglio: 
$$V_f = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \left[ \frac{m}{min} \right]$$

D: diametro del pezzo      n: velocità di rotazione fresa

velocità di avanzamento: 
$$V_a = a_z \cdot n \cdot Z \left[ \frac{mm}{min} \right]$$
  
(della fresa)

$a_z$ : avanzamento per dente  $\left[ \frac{mm}{dente} \right]$       Z: numero di denti della fresa

## - OTTIMIZZAZIONE DEI PARAMETRI DI TAGLIO

Al costo totale di lavorazione è strettamente correlato ai tempi di lavorazione, un tempo minore consente un'ottimizzazione del processo. Nei processi di taglio i parametri (passata  $P$ , velocità di avanzamento  $V_a$  e di taglio  $V_f$ ) sono facilmente variabili, quindi è facile ottimizzare i processi.

- Criterio del minimo costo (I criteri di ottimizzazione dipendono dalle condizioni limite esigenze funzionali, parametri di macchina, parametri di lavorazione).

Costo totale di una tornitura: → costo occupazione macchina relativo al personale

$$C_t = C_p \cdot t_p + C_p \cdot t_e + C_p \cdot t_u \cdot \frac{t_e}{T} + C_u \cdot \frac{t_e}{T}$$

→ frazione di vita dell'utensile consumata in una lavorazione  
→ costo cambio relativo al macchinario

$C_p$ : costo unitario del posto di lavoro [€/min]

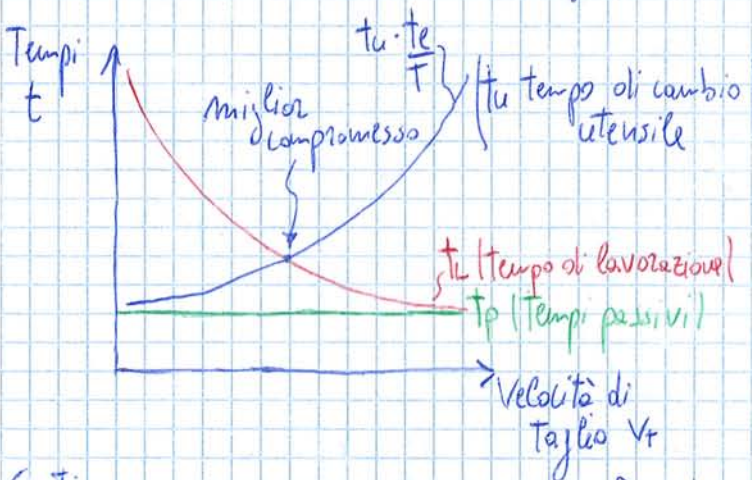
$C_u$ : costo dell'utensile [€]

$t_p$ : tempi passivi o di setup [min]

$t_u$ : tempo di cambio utensile [min]

$t_e$ : tempo effettivo di lavorazione [min]

$T$ : durata dell'utensile dalla formula di Taylor [min]

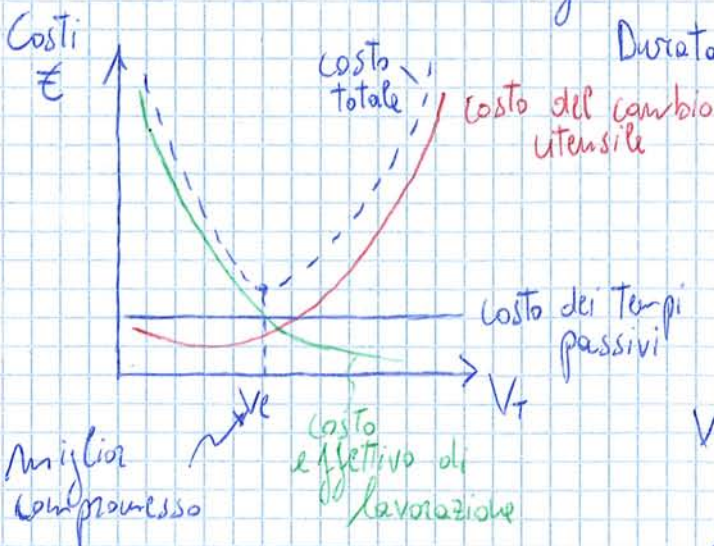


Tempo di lavorazione:

$$t_e = \frac{L}{v_a} = \frac{L}{a \cdot m} = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{a \cdot v_f \cdot 1000}$$

Relazione di Taylor:  $v_f \cdot T^m = C$

si trova l'ottimo in funzione di  $T$  anziché di  $v_f$



Durata economica del tagliate: si esprime il tempo di lavorazione e la durata dell'utensile in funzione della  $v_f$

$$t_e = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{a \cdot v_f \cdot 1000} \quad T = \left( \frac{C}{v_f} \right)^{\frac{1}{m}} \text{ sostituirti in}$$

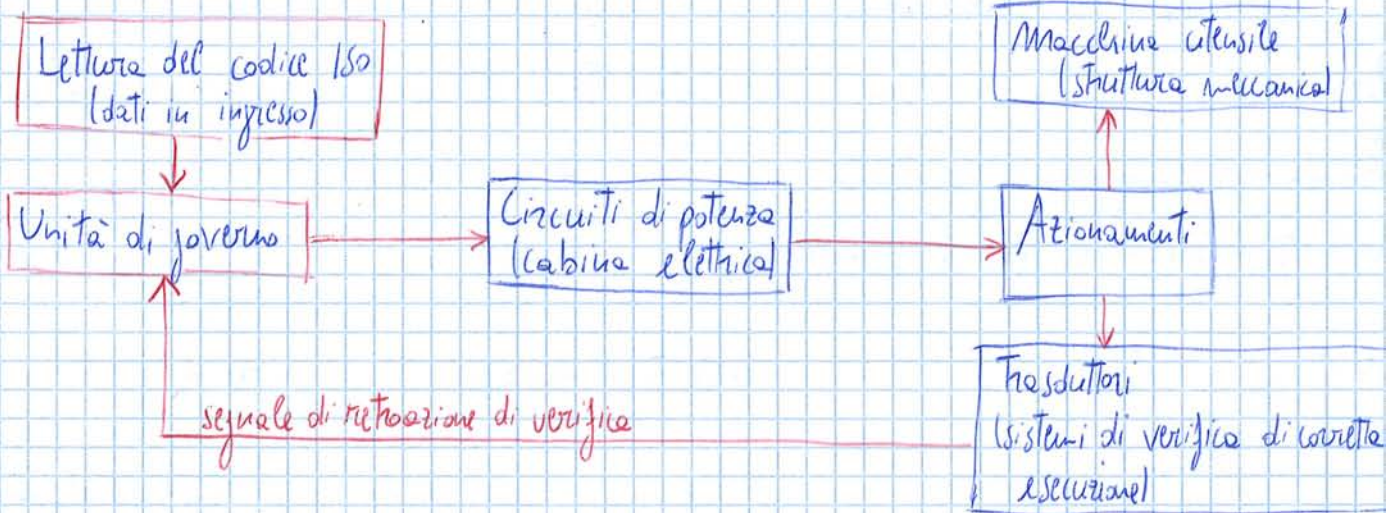
$$C_t = C_p \cdot t_p + C_p \cdot t_e + C_p \cdot t_u \cdot \frac{t_e}{T} + C_u \cdot \frac{t_e}{T}$$

Valore di  $v_f$  che minimizza i costi  $\frac{dC_t}{dv_f} = 0$

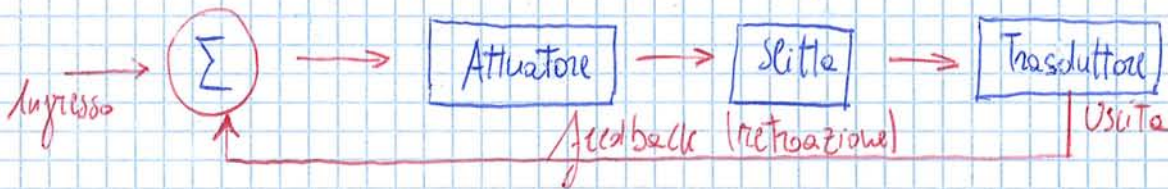
È possibile trovare  $T_e, v_{fe}$

Le informazioni di carattere progettuale sono inserite nella macchina, tradotte in un linguaggio comprensibile ad essa (programmazione). Il dispositivo è in grado di interpretare i dati numerici in input all'inizio e nel corso del processo, per cui un sistema C.N. deve contenere logiche di lettura, base di memoria per dati e logiche di elaborazione dei comandi. Il linguaggio di programmazione delle macchine C.N. è il codice Iso.

"Schema a blocchi di un C.N."

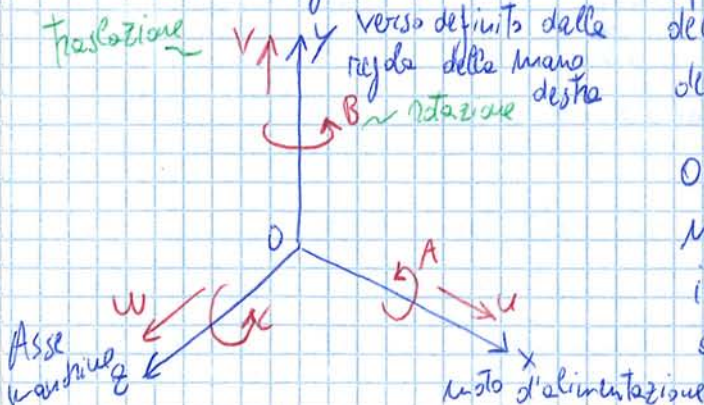


"Schema a blocchi ad anello chiuso" → la differenza tra segnale di comando e quello di retroazione genera un errore di posizione o di velocità.



I sistemi C.N. permettono un aumento di produzione, riducendo i tempi passivi e migliorando la ripetibilità delle lavorazioni. Il costo della manodopera è ridotto e sono possibili lavorazioni complesse, tuttavia il costo della macchina è elevato e vi è la necessità di programmatori e tecnici specializzati.

- Denominazioni degli assi di un C.N. → per definire le posizioni ed i movimenti dell'utensile rispetto al pezzo o viceversa si definisce univocamente la posizione dell'utensile.



Oltre ai sistemi di controllo, i sistemi C.N. necessitano di sistemi di sostentamento idrostatico delle tavole e l'uso delle viti a ricambio di sfere, per ridurre gli attriti

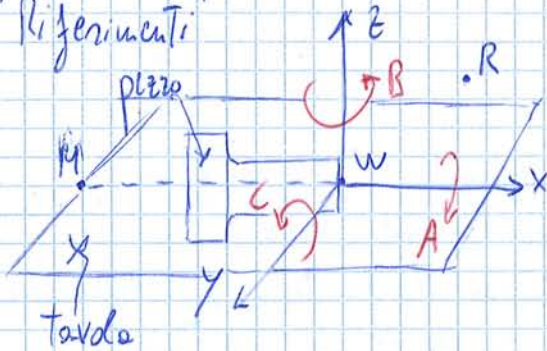


L'informazione è fornita in modo:

- incrementale, generano impulsi in modo proporzionale allo spostamento ("generatori d'impulsi"). Bisogna definire lo "0" di riferimento o traccia di zero. La soglia di sensibilità misura lo spostamento corrispondente all'emissione di un impulso. Dopo lo spostamento la traccia dello zero viene persa
- assoluti, ad ogni posizione della tavola corrisponde univocamente un solo valore in uscita di misura.
- assoluti ciclici, sono assoluti all'interno di un passo ma ripetono ciclicamente il segnale ad ogni passo. È necessaria la determinazione della posizione di zero.

- PROGRAMMAZIONE DELLE MACCHINE UTENSILI A C.N. → il programma contiene le informazioni geometriche e tecnologiche per la lavorazione ed è eseguito dall'unità di governo. Il linguaggio di programmazione è denominato linguaggio base EIA/ISO, consente le funzioni della m.u.

"Riferimenti"



X, Y, Z: assi di traslazione

A, B, C: assi di rotazione

Zero macchina M: rappresenta l'origine assoluta del sistema di riferimento.

Zero pezzo W: è definito da chi lavora sul programma, i movimenti in input della macchina vengono dati rispetto a questo punto.

Il programmatore fornisce la distanza relativa tra i due zeri, quindi la programmazione avviene riferita allo zero pezzo

Zero di riferimento R: riferimento di tipo elettromeccanico per il funzionamento della macchina

"Grammatica ISO" → EIA/ISO ha un formato alfanumerico, il programma di lavorazione di un pezzo è l'insieme di più operazioni sequenziali composte da più blocchi e ogni blocco definisce in modo completo un ordine per le m.u. Ogni parola che costituisce un blocco è composta da un carattere alfabetico indirizzabile e un numero che indica un valore o un codice di funzione

Esempio N3 G2 X±4,3 Z±4,3 ...

N50 G28 X2300 Y5600 Z1780

F350 S200 T18 M06

numero di blocco

informazioni geometriche

informazioni tecnologiche

Indirizzi di movimento A, B, C, U, V, W, X, Y, Z

Compensazione dell'utensile a sinistra G41 o compensazione dell'utensile a destra G42 (per tasche o profili) compensazione dell'utensile disabilitata G40. Così si compensa la distanza tra il tool point e il tagliente reale, è necessario indicare il quadrante per dare al CN la direzione in cui compensare.

"Informazioni tecnologiche" S velocità di taglio G36 [m/min] F avanzamento G34 [mm/min]  
 G37 [giri/min] G35 [mm/giro]

T scelta dell'utensile

La velocità di taglio viene mantenuta costante, la velocità di rotazione del mandrino deve essere continuamente aggiornata dal CNC al diametro di troncatura corrente.

"Funzione T" → selezione dell'utensile T 02 02  
 posizione dell'utensile → numero di correzione (fa riferimento al blocco di dati che contiene le dimensioni di set-up dell'utensile)

Nel preset si misura l'utensile relativamente a E (zero utensile). Il CN associa all'utensile un blocco di dati che ne caratterizzano le dimensioni (All'innesto N=E)

"Funzioni M" → scelta delle funzioni ausiliarie per impartire comandi al controllo e alla macchina utensile (Es. M00 stop programma), caratterizza le inf. tecnologiche, si attivano prima del movimento e in un blocco è possibile averne fino ad un massimo di 3.

### ESERCITAZIONE 4 (MODULO D)

4.1) Un tornio parallelo è attrezzato con utensili in carburo ( $m=0,25$ ) e viene utilizzato per la sgrossatura di una barra lunga  $700\text{ mm} = L$  con diametro  $D=40\text{ mm}$  in acciaio C40. La costante  $C=366\text{ m/min}$ . Dati:  $\alpha=0,3\frac{\text{mm}}{\text{giro}}$ ,  $C_p=20\frac{\text{€}}{\text{h}}$   
 $C_u=5\text{€}$ ,  $t_p=0,5\text{ min}$ ,  $t_u=1\text{ min}$

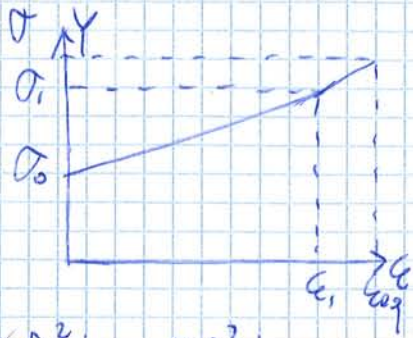
Calcolare la velocità di minimo costo, la velocità di massima produttività e il tempo totale di lavorazione di un pezzo, con costi di lavorazione.

Durata utensile alle vel. massima di produzione:  $T_p = \left(\frac{1}{m} - 1\right) \cdot t_u = 3\text{ min}$

Vel. di taglio per la massima produzione:  $V_p = \frac{C}{T_p^m} = 278\frac{\text{m}}{\text{min}}$

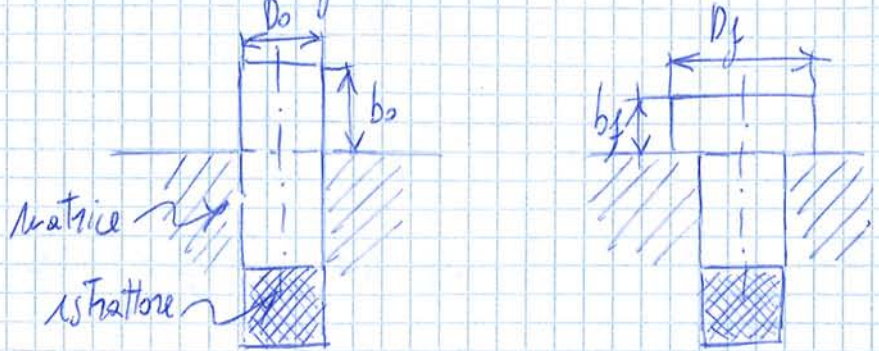
Durata economica del tagliente:  $T_e = \left(\frac{1}{m} - 1\right) \left( t_u + \frac{C_u}{C_p} \right) = 1,5\text{ min}$

U.2) Si devono formare dei pezzi in acciaio a partire da uno spezzone di  $D_0 = 20 \text{ mm}$ .  
 Al materiale presenta caratteristica lineare:  $\sigma_0 = 365 \text{ MPa}$   
 $\sigma_1 = 641 \text{ MPa}$   $A\% = 28\%$ . La lunghezza libera del pezzo è  $30 \text{ mm}$ ,  
 dopo divisa  $50 \text{ mm}$  ( $b_f$ ), l'attrito tra il pezzo  
 e le pareti degli stampi è  $\mu = 0,1$ , rendimento  $\eta = 0,7$ .  
 Calcolare la forza e il lavoro necessari.



$$\pi \frac{D_0^2}{4} \cdot b_0 = \pi \frac{D_f^2}{4} \cdot b_f$$

$$D_f = D_0 \cdot \sqrt{\frac{b_0}{b_f}} = 34,6 \text{ mm}$$



verifica della flessione laterale con il rapporto di ricalcatura. In una sola  
 operazione  $\lambda < 2,6 \Rightarrow \lambda = \frac{b_0}{D_0} = \frac{30}{20} = 1,5 < 2,6$  quindi l'operazione

non richiede due passaggi, con preformatura conica.

Def. ottenuta  $\epsilon = \ln \frac{b_f}{b_0} = -1,1$   $\epsilon_{eq} = |\epsilon| = 1,1$

$$Y = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{A\%} \cdot \epsilon_{eq} + \sigma_0 = 1412 \text{ MPa}$$

$$P_{m1} = \left( 1 + \frac{1}{3} \mu \cdot \frac{D_f}{b_f} \right) \cdot Y = 1575 \text{ MPa}$$

$$F = P_{m1} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_f^2 = 1981 \text{ kN}$$

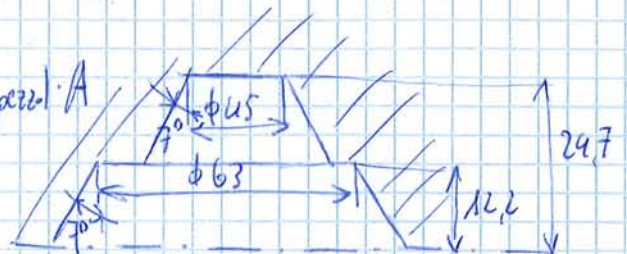
$$L_R = \frac{1}{\eta} \cdot \int_0^{\epsilon_{eq}} C \cdot \epsilon^n d\epsilon \cdot \frac{\pi}{4} D_f^2 \cdot b_f = \frac{1}{\eta} \cdot C \cdot \frac{\epsilon_{eq}^{n+1}}{n+1} \cdot \frac{\pi}{4} D_f^2 \cdot b_f = \frac{1}{\eta} \cdot \int \sigma d\epsilon \cdot 3402 \cdot 10^{-3}$$

$$= \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\sigma_0 + Y}{2} \cdot \epsilon_{eq} \cdot 3402 \cdot 10^{-3} = 13,13 \text{ kJ}$$

U.5) Si vuole stampare a caldo ( $T = 1120 \text{ }^\circ\text{C}$ ) il pezzo illustrato partendo da una  
 billetta in acciaio ( $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ). Calcolare le dimensioni della  
 billetta e la forza necessaria conoscendo il diametro del pezzo in piano  
 di divisione ( $66 \text{ mm}$ ), il peso del pezzo finito è di  $1,124 \text{ kg}$ , limite di  
 snervamento  $\sigma_F = 120 \text{ MPa}$  (Y)

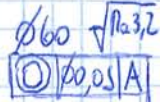
$$M = (m_{pezzo} + m_{barel}) \cdot A = (m_{pezzo} + 0,07 m_{pezzo}) \cdot A$$

$$A = 1,05 \text{ coeff. per le perdite di ossidazione}$$



# Esecuzione S "Cicli di lavorazione"

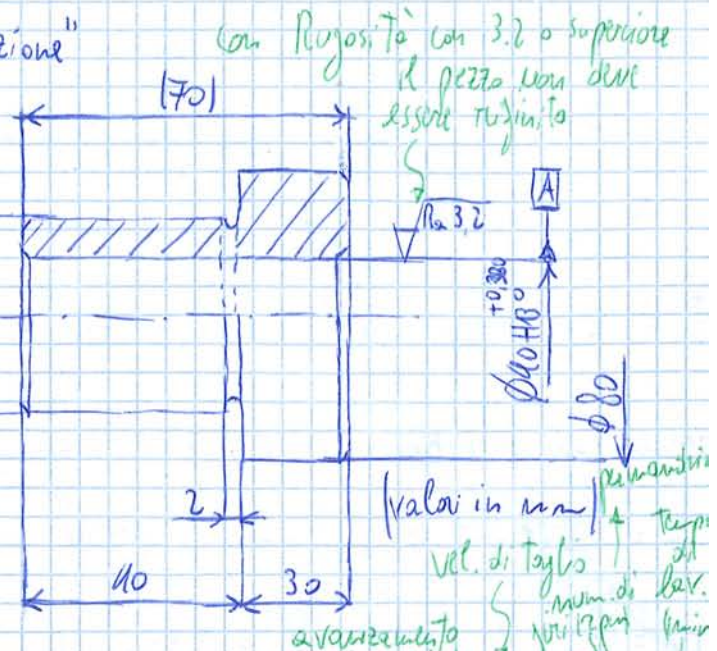
Pezzo S1 da realizzare



Materiale C40 -  $\sigma_e = 630 \text{ MPa}$

UNI EN 22768 - mlk  $2 \times 45^\circ \text{ R1}$

Composizione C40: C = 0,37 % 0,46 %  
 Mn = 0,5 % 0,8 %  
 Si  $\leq 0,4 \%$



Tornio parallelo  $\rightarrow$  T.p.  
 (gen. operazioni)

N°	Schizzo operazione	Descrizione operazione (mm)	MU	Utensili attrezzatura	$a_p$	$V_T$	N	T
10		sfaccatura da $\phi = 85$ a $\phi = 0$ $p = 2,5$ (serramentale ruotasso) 1 passate	T.p.	utensile in carburo $X = 45^\circ$ (per sfaccatura o altro (smussi))	0,21	200	760	0,27

(semilavorato di partenza: spezzone di barra  $\phi = 85 \times 75 \text{ mm}$ )

20		tornitura esterna cilindrica di sfaccatura da $\phi = 85$ a $\phi = 60$ $p = 2,5$ $L = 35$	T.p.	utensile in carburo $X = 95^\circ$ $X = 45^\circ$ (lo spezzamento non conta può essere effettuato)	0,2	200	760	0,23
----	--	---	------	---	-----	-----	-----	------

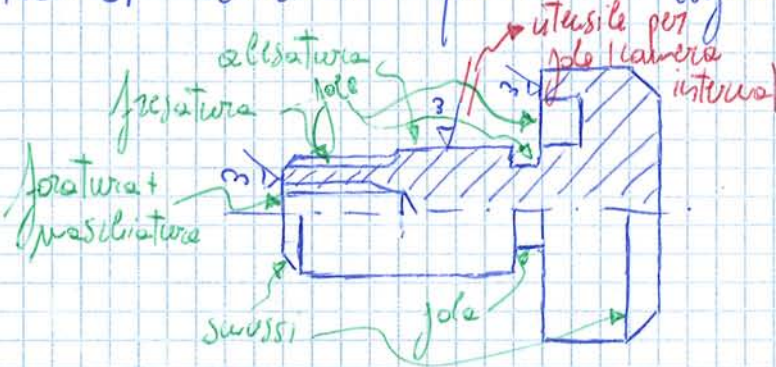
Calcolo  $N = \frac{1000 \cdot v_L}{\pi D}$  [rpm]  $D$ : diametro medio  $v_L$ : forza di taglio specifica (tabellate)

$T = \frac{L}{N \cdot a_p} \Rightarrow$  per sfaccatura  $L$  è leggermente maggiore di  $\frac{\phi}{2}$

30 +		centatura +	T.p.	punta da centri HSS	M	23	760	//
40 +		foratura passante $\phi = 20$	T.p.	punta elicoidale HSS $\phi = 20$	M	23	352	//
50		foratura passante $\phi = 38$	T.p.	" " $\phi = 35$	M	23	208	//

- Fase: insieme ordinato di operazioni realizzate su una stessa m.u.
- Sottofase: insieme di operazioni realizzate sulla stessa m.u. senza cambiare la posizione del pezzo
- Operazione elementare: insieme ordinato di operazioni realizzate su una stessa m.u. con stesso posizionamento e stesso utensile.
- 1 NB Sottofasi di fasi diverse non possono essere in successione alternata

Pezzo 21 Scilizzo non quotato (vedi allegato) Rugosità  $Rz$   $\checkmark$   $Ra$   $\checkmark$



Material: acciaio C40  $\sigma_R = 600$  MPa  
 Formule utili:  $N = \frac{V_T \cdot 1000}{\pi D}$   
 $V_T = \frac{\pi D N}{1000}$   $T = \frac{L}{a \cdot N}$

N°	Scilizzo operazione	Descrizione operazione	M.U.	Utensile e attrezzatura	$V_T$	$N$	$T$
10		Grezzo di partenza $\phi = 50$ $L = 60$					
20		Sfacciatura di e sprassatura da $\phi = 50$ a $\phi = 0$ $p = 2 \mu m$ 1 passata	torno parallelo	Utensile in carburo $\chi = 45^\circ$	0,2	240	1666,6
30		Tornitura cilindrica esterna di sprassatura $p = 2 \mu m$ da $\phi = 50$ a $\phi = 46$ $L = 16 mm$	T.P.	Utensile in carburo $\chi = 45^\circ$	0,2	240	1666,6
40		Suocci esterno	T.P.	Utensile in carburo $\chi = 45^\circ$	0,2	60	456

Errori frequenti nei cicli:

- le parti filettate non possono essere azzerrate
- mai forare due volte lo stesso foro per allargarlo: gli assi potrebbero non coincidere, piuttosto si esegue una tornitura interna
- per le rifiniture si fori si esegue una tornitura interna di finitura