

0.1) Specifiche di prodotto > Definizioni:

CAMPITURA: sono le righe (la zebra), visibile nella sezione.

TRATTEGGIO: È costituito da una campitura di linee sottili equidistanti e inclinate di 45° o di 135°. L'interspazio tra le linee dipende dall'ampiezza della superficie da tratteggiare.

PIANO SECANTE: linea mista fine;

FRECCE: indicano la direzione di proiezione;

ERRORI DIMENSIONALI: deviazione delle dimensioni reali da quelle nominali;

ERRORI GEOMETRICI: deviazione delle superfici reali da quelle nominali.

ALBERO: schematizzabile come un cilindro dove la lunghezza è maggiore del diametro

GIUNTO ASSIALE: elemento che trasmette il moto in due assi;

GIUNTO: elemento che trasferisce il moto da un asse a un altro perpendicolare al primo.

FORO PASSANTE: foro che attraversa tutto l'oggetto;

FORO CIECO: foro che non attraversa tutto l'oggetto;

FILETTATURA: elemento che si trova all'esterno della vite.

TRATTO CONICO: tratto in cui si ha una lenta variazione di diametro (e non repentina);

SPALLAMENTO: costruzione geometrica in cui si ha una repentina variazione di diametro.

SEDE PER CHIAVETTA: è un foro cieco con una particolare forma.

UNI: UNI è la sigla dell'Ente nazionale italiano di unificazione, un'associazione privata che elabora e pubblica *norme tecniche per tutti i settori industriali, commerciali e del terziario*.

ISO: ISO è la sigla che identifica le norme elaborate dall'ISO, l'organizzazione internazionale per la standardizzazione;

QUOTATURA: misurazione (di angoli (in gradi), di segmenti, di diametri (ponendo il simbolo di insieme vuoto));

SPIGOLO: tipologie

- Vivo oppure
- Smussato: tagliato, di una smussatura di ... gradi o
- Raggio di raccordo: raggio ammorbidito con un raggio di raccordo

FLANGIA: Nelle costruzioni meccaniche, elemento di giunzione per tubi e alberi di trasmissione, consistente in una corona circolare, generalmente d'acciaio, fissata, mediante saldatura o fucinatura, all'estremità dell'elemento e provvista di una serie di fori equidistanti per infilarvi i bulloni di serraggio; giunto a flangia, costituito da due flange accoppiate mediante bulloni.

OGGETTO ASSIALSIMMETRICO: oggetto che ha infiniti piani di simmetria (es: anello): getto che ha asse orizzontale.

BULLONE: associazione tra vite e dado;

DADO: oggetto esagonale filettato dentro;

LAMATURA: azione meccanica per allargare un foro;

PULEGGIA: Disco, per lo più di ghisa o di leghe leggere, girevole intorno a un asse, usato per la trasmissione di un moto per mezzo di organi flessibili (cinghie, funi, catene), e costituito da un mozzo centrale calettato sull'albero (*p. fissa*) o libero su di esso (*p. folle*), da una corona esterna opportunamente sagomata, in alcuni casi provvista di denti (*p. dentata*), sulla quale aderisce la cinghia (o la fune, o la catena), e da razze (o da un disco) che collegano la corona al mozzo; la forma della corona dipende in genere dal tipo di cinghia utilizzata per la trasmissione del movimento.

MOZZO: oggetto circolare con foro al centro;

BARRA: elemento geometrico preponderante;

PROSPETTO: vista;

PRISMA: asse non per forza perpendicolare;

PRALLELEPIPEDO: asse perpendicolare (ortogonale) alle basi.

MADREVITE: foro filettato nella sua superficie cilindrica interna (dentro un dado c'è una madre vite);

FILETTATURA: operazione per deformazione plastica per ottenere una filettatura, sulla superficie cilindrica della vite (trasportazione di truciolo o deformazione plastica se piccola).

MASCHIATURA: operazione per fare la madre vite (all'interno di un foro).

SCANALATURA: elemento necessario far scorrere qualcosa al suo interno. È una guida.

BOCCOLA: cilindro forato, utilizzato per accoppiare perni e piastre di materiali diversi;

SEZIONE: rappresentazione, secondo il metodo delle proiezioni ortogonali, di una delle parti di cui viene diviso l'oggetto da un taglio ideale eseguito secondo uno o più piani.

RAGGIO DI CURVATURA: sono utili per evitare intagli acuti o cunei che provochino concentrazione di sforzi o inizi di rotture.

SMUSSI: utili per evitare spigoli taglienti e fragili. La loro grandezza caratteristica è la lunghezza misurata parallelamente all'asse e accompagnata dall'angolo di inclinazione rispetto all'asse.

SISTEMI DI QUOTATURA: a seconda delle tecnologie produttive si hanno diversi sistemi di quotatura: in serie, in parallelo o combinata.

0.1) Specifiche di prodotto > Definizioni:

-> Raggi di proiezione: paralleli tra loro e perpendicolari al piano di proiezione

-> Rappresentazione filettatura: Si rappresenta con una doppia linea, per quanto riguarda la sezione; Per la sezione del cilindro non potendo disegnare due cerchi concentrici se ne disegna uno e un'altro concentrico, ma solo per 3/4

REGOLE DI RAPPRESENTAZIONE:

- Le quote devono essere espresse nella stessa unità di misura (generalmente in mm);
- Le linee di misura devono:
 - o Essere tracciate all'esterno della figura;
 - o Essere disposte parallelamente alla dimensione alla quale si riferiscono;
 - o Non intersecare le linee di riferimento;
 - o I valori numerici devono essere disposti parallelamente alle linee di misura ed al di sopra.

1. ERRORI:

- Dimensionali: tolleranze sulle dimensioni.
- Geometrici: errori nelle superfici reali.

Sono di due tipi a seconda della scala d'osservazione, dell'ordine di grandezza dell'errore:

- o Errore macro => abbiamo errori macrogeometrici => abbiamo errori nella geometria macroscopica (tolleranze geometriche)
- o Errori micro => errori microgeometrici => errori di rugosità e ondulazione

www.handouts.it

1.1) Materiali:

MATERIALI:

-> **DEF:** i materiali sono sostanze con cui sono composti o realizzati gli oggetti che ci circondano.

-> Quelli di maggior interesse tecnologico sono suddivisi in quattro classi:

- Materiali metallici;
- Materiali polimerici (materie plastiche);
- Materiali ceramici;
- Materiali composti (costituiti da più materiali semplici differenti).

! Non esiste un tipo di materiale migliore in assoluto;

 *Livello di analisi atomico e microscopico.*

-> A temperatura ambiente i metalli sono solidi. Allo stato solido gli atomi sono disposti in modo regolare. Gli atomi formano il reticolo cristallino.

Proprietà:

- **MAELLEABILITÀ:** Proprietà di un materiale di lasciarsi deformare permanentemente sotto l'azione di urti o pressioni adeguate, senza subire sensibili modificazioni strutturali e di resistenza meccanica e senza presentare screpolature né fratture.
- **CONDUTTIVITÀ:** gli elettroni delocalizzati trasportano corrente elettrica e calore grazie alla loro capacità di muoversi attraverso la struttura cristallina.
- **LUCENTEZZA:** gli elettroni assorbono e riemettono prontamente un raggio di luce che colpisce la superficie di un metallo. Il grado di rugosità superficiale dell'oggetto influenza questa proprietà.

Tipi di deformazione: elastica e plastica:

- **ELASTICA:** una volta sollecitato in maniera elastica, la struttura torna nella configurazione iniziale;
- **PLASTICAMENTE:** una volta sollecitato in maniera plastica il reticolo cristallino assume una nuova configurazione.



DIFETTI:

-> Materiali reali presentano una serie di difetti del reticolo cristallino che riducono fortemente la resistenza meccanica:

- Difetti puntuali: interstiziali, vacanze, atomi sostituzionali;
- Difetti lineari: dislocazioni;
- Difetti superficiali: orientamento di piani, sovrapposizione di piani.

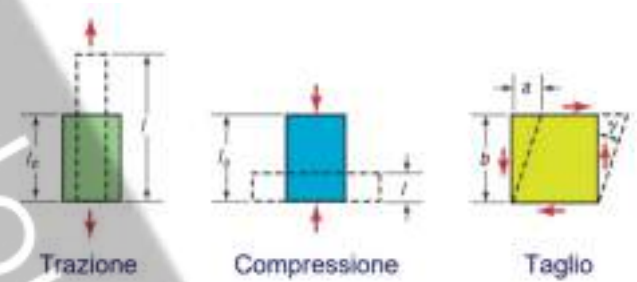
 *livello di analisi macroscopico;*

Comportamento di un materiale:

-> Le **PROPRIETÀ MECCANICHE** determinano il comportamento del materiale quando viene sottoposto a lavorazioni. Si misurano eseguendo delle prove sul materiale.

-> Possono essere classificate in:

- **Statiche:**
 - Resistenza a trazione;
 - Resistenza a compressione
 - Resistenza a flessione;
 - Resistenza a torsione;
 - Resistenza a penetrazione;
- **Dinamiche:**
 - Resistenza a urto;
 - Resistenza a fatica;
 - Resistenza a usura;



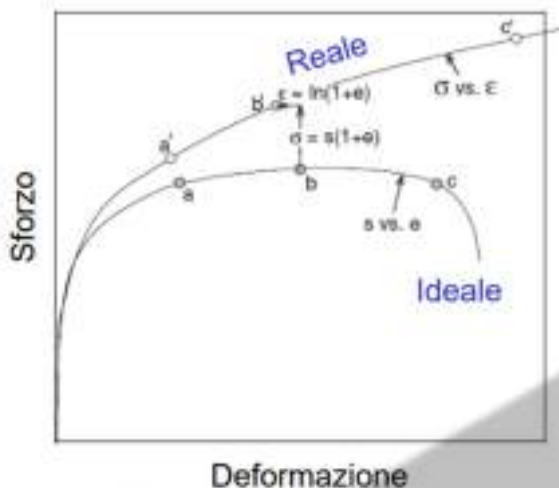
-> Le principali sollecitazioni sono: trazione, compressione e taglio:

PROVE:

CURVA SFORZO DEFORMAZIONE:

-> **DEF:** curva che raccoglie dati su carico e variazione di lunghezza del provino. Può essere di due tipi:

- **IDEALE** (o ingegneristica) è più importante nella progettazione dei componenti, perché più adatta a rappresentare il campo elastico e le piccole deformazioni plastiche.
- **REALE:** più adatta ai problemi di produzione, in cui sono solitamente coinvolte grandi deformazioni.



$$\sigma = \frac{F}{S} \Rightarrow \frac{S_0}{S} \cdot A \Rightarrow S_0 L_0 = S L \Rightarrow \frac{S_0}{S} = \frac{L}{L_0}$$

$$A = \frac{F}{S_0} \Rightarrow F = S_0 \cdot A \Rightarrow \epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - \frac{L_0}{L_0} \Rightarrow \frac{L}{L_0} = \epsilon + 1$$

$$\Rightarrow \sigma = \frac{F}{S} = \frac{S_0}{S} A = S (\epsilon + 1)$$

$$\Rightarrow \sigma > S, \text{ SEMPRE} \quad \square$$

1.2) Materiali:

SFORZO: sollecitazione a cui sottopongo il materiale (la percepisce in tutti i suoi punti);

DEFORMAZIONE: è conseguente alla sollecitazione.

-> Descriviamo il comportamento di un materiale sotto l'effetto della prova di trazione per descrivere le principali caratteristiche di una trasformazione.

PROVA DI TRAZIONE:

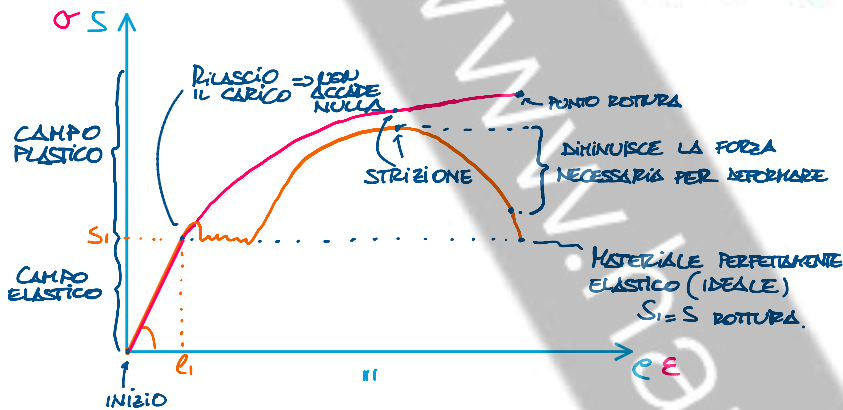
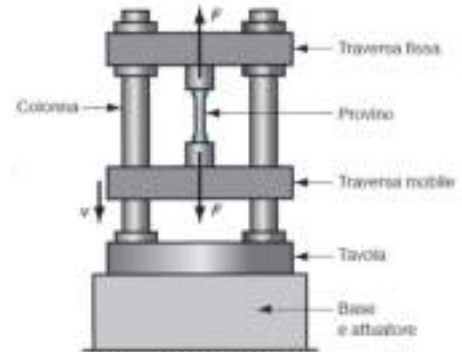
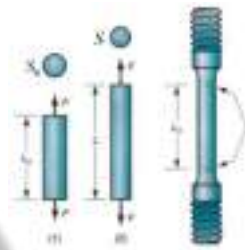
-> **OBJ:** valutare il comportamento del materiale soggetto a sforzo mono-assiale di trazione.

-> è una prova quasi statica.

-> **DEF:** prova nella quale viene sollecitato il provino tirandolo da entrambi i lati.

-> **VANTAGGI:**

- Ampiamente standardizzata;
- Semplice ed economica;
- Fornisce un ampio spettro di informazioni:
 - o Carico di snervamento;
 - o Carico di rottura;
 - o Allungamento totale;
 - o Anisotropia;
 - o Sensibilità alla velocità.



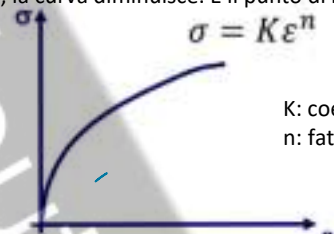
$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$$\epsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

STRIZIONE $F >> S$
 ISTANTANEA.

ATTORI:

- **PUNTO DI STRIZIONE:** Punto oltre il quale il provino si spezza. In prossimità di questo punto la sezione del provino diminuisce più velocemente del solito (perché iniziano a crearsi dei vuoti). Oltre questo punto, la curva diminuisce. È il punto di rottura che costituisce una deformazione.
- **Regione elastica:** non contribuisce alla deformazione plastica.
- **Regione plastica:** contribuisce alla deformazione plastica
- **INCRUDIMENTO:** caratteristiche che fa sì che in campo elastico devo continuamente applicare uno sforzo maggiore per deformarlo. Comportamento del materiale che si oppone ad un ulteriore deformazione perché cambiano le sue caratteristiche strutturali.



K: coefficiente di resistenza;
n: fattore di incrudimento;

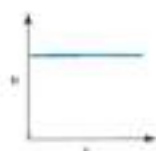
- **RAPPORTO DI POISSON:** rapporto tra la deformazione laterale e la deformazione longitudinale: $\nu = \frac{\epsilon_{trasversale}}{\epsilon_{longitudinale}}$;

Comportamento dei materiali:

Elastico perfetto



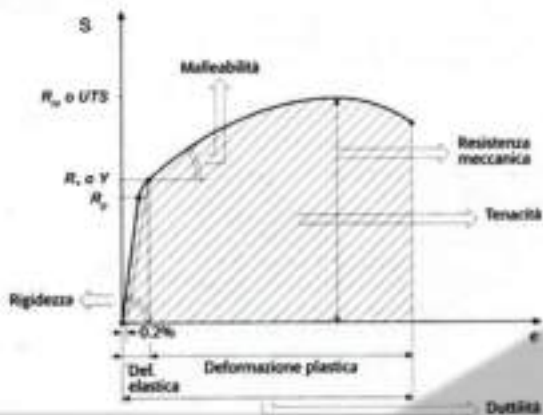
Plastico perfetto



Elasto-plastico perfetto

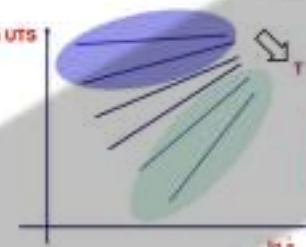


Elasto-plastico con incrudimento



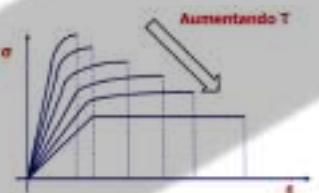
Aumentando T

- ↑ duttilità
- ↑ tenacità
- ↑ carico di snervamento
- ↓ modulo di elasticità



Ad alte temperature

- bassa resistenza
- molto sensibile a velocità



1.3) Materiali:

Lavoro e Tensione di flusso media:

-> il lavoro di deformazione è definito come prodotto di forza per spostamento, pertanto il prodotto tra tensione e deformazione può essere considerato equivalente al lavoro per unità di volume (u):

$$u = \int_0^{\epsilon_1} \sigma * d\epsilon;$$

Indicato V il volume in deformazione => $L = u * V$;

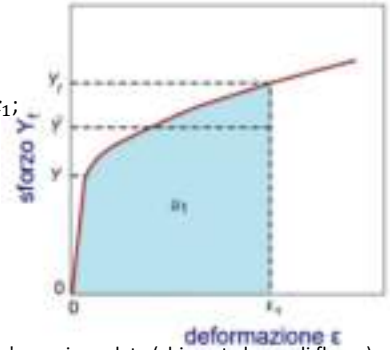
=> Considerando il lavoro per unità di volume per uno stato di tensione mono-assiale risulta: $u = Y * \epsilon_1$;

✂-> Considerando un **MATERIALE CON INCRUDIMENTO** (Lavoro di deformazione plastica), il lavoro per unità di volume per uno stato di tensione monoassiale (trascurando il campo di deformazione elastica) risulta:

$$u = \int_0^{\epsilon_1} \sigma * d\epsilon \text{ e } \sigma = k * \epsilon^n;$$

$$\Rightarrow u = \int_0^{\epsilon_1} k * \epsilon^n * d\epsilon = \frac{k * \epsilon_1^{n+1}}{n+1} = \bar{Y} * \epsilon_1;$$

=> \bar{Y} è detta **tensione di flusso media** del materiale: $\bar{Y} = \frac{k * \epsilon_1^{n+1}}{n+1} = \frac{1}{\epsilon_f - \epsilon_{el}} * \int_{\epsilon_{el}}^{\epsilon_f} \sigma_{eq} d\epsilon$;



Ricristallizzazione: -> Dove σ_{eq} viene espressa in caso di incrudimento come $\sigma = k * \epsilon^n$ ma può essere un'equazione data (chiamata legge di flusso);

-> **OBJ:** permette di recuperare le eccessive tensioni dell'incrudimento.

-> **DEF:** consiste nel riscaldare un metallo a una temperatura sufficientemente elevata, in questa maniera si formano rapidamente nuovi grani cristallini privi di tensioni interne e il metallo tende a comportarsi come un materiale perfettamente plastico (n=0).

- Temperatura di ricristallizzazione: solitamente compresa tra metà e due terzi della temperatura di fusione del metallo (misurata in K).

PROVA DI COMPRESIONE:

-> **OBJ:** valutare il comportamento del materiale soggetto a sforzo monoassiale di compressione.

-> Opposto della trazione: il provino viene compresso e la sua altezza si riduce.

-> FORMULE:

- Sforzo ideale: $s = \frac{F}{S_i}$; Sforzo reale: $\sigma = \frac{F}{S_f}$;

- Deformazione ideale: $e = \frac{h_f - h_i}{h_i}$; deformazione reale: $\epsilon = \int_{h_i}^{h_f} \frac{dh}{h} = \ln\left(\frac{h_f}{h_i}\right)$

- Curva sforzo-deformazione reale:

-> A causa dell'aumento della sezione trasversale il carico aumenta rapidamente e ciò si traduce in un maggior valore di tensione applicata.

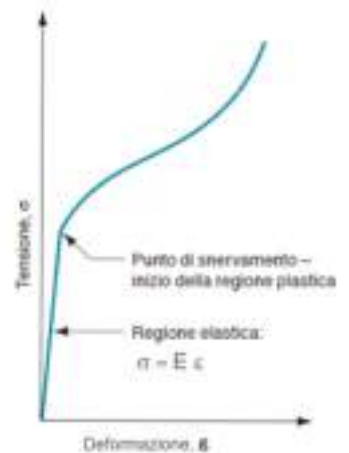
-> Si possono applicare i parametri della curva di flusso derivanti dalla prova di trazione (⚠ ⚠)

⚠ in questo caso bisogna **ignorare l'effetto della strizione** che non avviene;

- Attrito e imbarilimento:

-> La presenza dell'attrito delle superfici a contatto con le piastre causa:

- o Aumento del valore medio dello sforzo;
- o Distorsione del campione (imbarilimento);

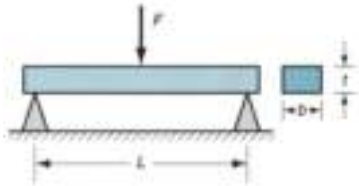


PROVA DI FLESSIONE:

-> **OBJ:** testare la resistenza a flessione (o piegatura) dei materiali duri e fragili che possiedono molta elasticità ma poca o nulla plasticità.

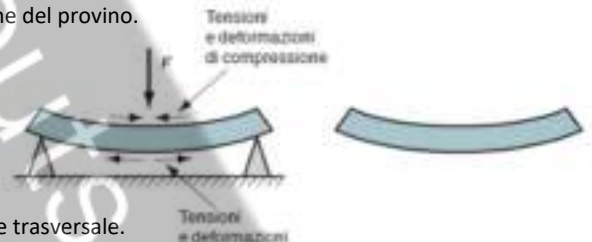
-> **DEF:** un provino di sezione rettangolare viene posizionato tra due supporti e viene applicata una forza al suo centro.

- Frattura: si verifica perché si supera il carico di rottura delle fibre esterne del provino.
- Resistenza: calcola il carico di rottura trasversale:



$$R_f = \frac{M * c}{J} = \frac{\frac{F * L}{2} * \frac{t}{2}}{\frac{1}{12} * b * t^3} = \frac{3 * F * L}{2 * b * t^2}$$

- M: momento flettente;
- C: semi-altezza del provino;
- J: momento di inerzia della sezione trasversale.



PROVA DI TAGLIO:

- Formule:

o Sforzo di taglio: $\tau = \frac{F}{S}$;

o Deformazione di taglio: $\gamma = \frac{\delta}{b}$;

-> Non si fa distinzione tra grandezze reali ed ideali perché S non cambia.



PROVA DI TORSIONE:

-> **DEF:** nella prova di torsione un provino tubolare a sezione sottile viene sottoposto ad un momento M;

- Formule:

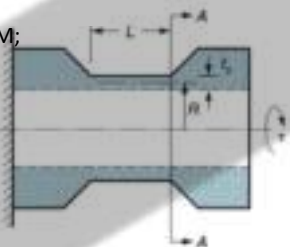
o Sforzo: $\tau = \frac{M}{2 * \pi * r^2 * t_0}$; in campo elastico: $\tau = \gamma * G$, con G: fattore di taglio o coefficiente di elasticità tangenziale (G=0,4 E per la maggior parte dei materiali);

o Deformazione: $\gamma = \frac{r * \theta}{L}$ (in radianti);

-> Nella regione plastica la deformazione aumenta all'aumentare di M, fino alla frattura.

-> τ : resistenza al taglio ($R_t = 0,7 * R_m$ rispetto la resistenza della trazione);

- Curva sforzo-deformazione: le curve ideali e reali sono in pratica identiche poiché l'area della sezione trasversale del provino non cambia.



1.4) Materiali:

DUREZZA:

-> **DEF:** si definisce durezza la resistenza che il materiale oppone all'azione di un indentatore cui sia applicato un carico statico.

PROVA BRINELL:

-> **DEF:** consiste nel far penetrare nel pezzo in esame una sfera di acciaio molto duro di diametro D_b mediante applicazione di un carico F e nel misurare il diametro D_i dell'impronta lasciata dall'indentatore sulla superficie del pezzo;

- Formule:

$$Durezza\ brinell: HB = 0,102 * \frac{F}{S} = 0,102 * \frac{2F}{\pi D_b (D_b - \sqrt{D_b^2 - D_i^2})}$$

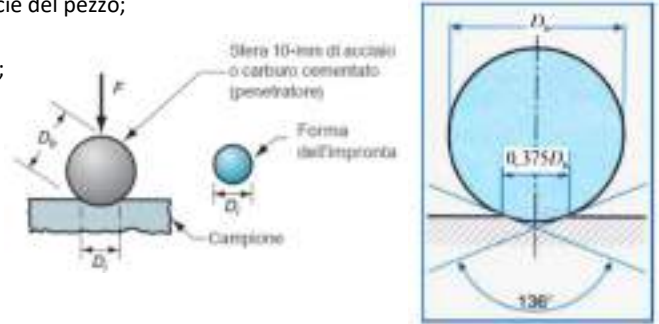
- F: carico applicato (N);
- S: area della superficie dell'impronta (mm²);

⚙ Confronto dei valori ottenuti con prove precedenti:

- Prova ideale: $\frac{D_i}{D_b} = \cos \frac{136^\circ}{2} = 0,375$;
- Valori accettabili: $\frac{D_i}{D_b} \in [0,25 ; 0,5]$;

- Condizioni normali (Norma UNI EN 1003):

- L'indentatore deve agire su una superficie liscia e piana, esente da ossidi e impurezze superficiali;
- Lo spessore minimo del pezzo da prove deve essere almeno 8 volte la profondità dell'impronta;
- In considerazione della durezza della sfera di acciaio si raccomanda di evitare l'impiego della prova Brinell su materiali aventi durezza HB superiore a 450.
- Prove successive non devono essere troppo vicine (distanza centri >4d).



PROVA VIKERS:

-> **DEF:** l'indentatore è costituito da una piramide retta, a base quadrata, di diamante con angolo al vertice (tra due facce opposte) di 136°:

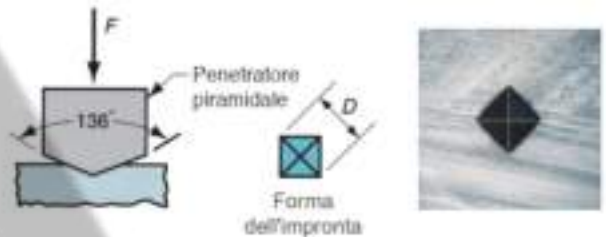
- Formule:

$$HV = 0,102 \frac{F}{S} = 0,1891 \frac{F}{D^2}$$

$$S = \frac{D^2}{2 * \sin(\frac{136}{2})} = \frac{D^2}{1,854}$$

- F: carico applicato (N);
- S: area della superficie dell'impronta (mm²);
- D: diagonale media (mm);

-> In condizioni normali: F=294N e t=15s;



PROVA DI KNOOP:

-> **DEF:** l'indentatore è costituito da una piramide di diamante con un rapporto lunghezza-larghezza di /:1 e i carichi applicati sono generalmente più leggeri di quelli della prova Vickers;

-> è una prova di microdurezza, adatta a misurare campioni sottili o materiali fragili.

- Formule:

$$HK = 0,102 * 14,2 \frac{F}{D^2} = 1,45 \frac{F}{D^2}$$

- F: carico applicato (N);
- D: diagonale maggiore (mm);



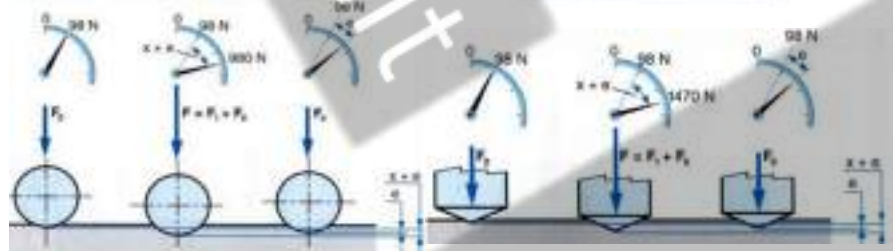
PROVA DI ROCKWELL:

🔪 Avviene in due passate;

-> Esistono due scale più utilizzate:

- Scala B: acciaio temprato e levigato;
- Scala C: cono di diamante base circolare con punta arrotondata ed angolo al vertice di 120°.

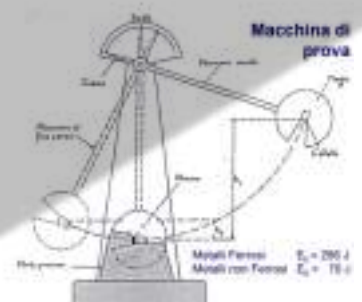
- Formule: $HR\# = N - \frac{h}{S}$;



PROVA DI RESILIENZA:

-> **OBJ:** valutare il comportamento del materiale soggetto ad un urto.

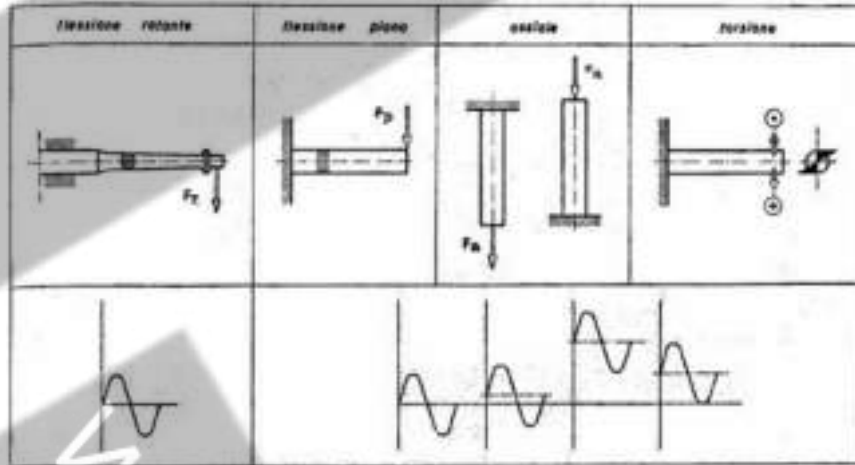
- Tipi di rottura:
 - Tenace;
 - Fragile;
- Fattori influenti:
 - Velocità di deformazione;
 - Presenza di intagli;
 - Temperatura;








1.5) Materiali:

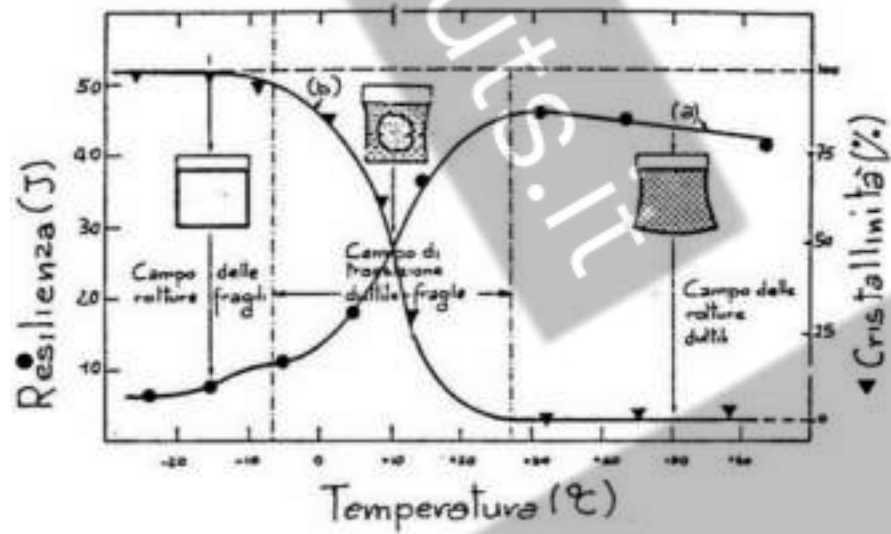
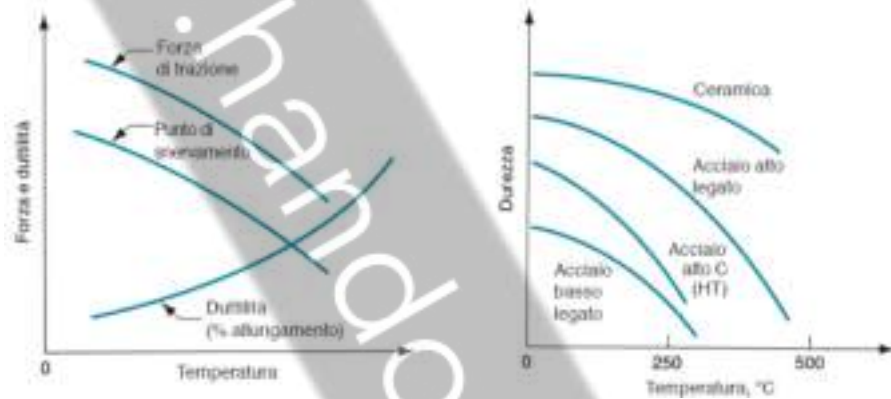
PROVA DI FATICA:

-> **OBJ:** determinare il numero di cicli necessario per portare a rottura il materiale;



- Fattori tecnologici che influenzano la resistenza a fatica:
 - o Rugosità superficiale ;
 - o Tensioni superficiali di trazione 
 - o Tensione superficiali di compressione (pallinatura, rullatura) 
 - o Durezza superficiale (trattamenti termochimici) 
 - o Ambiente corrosivo 

TEMPERATURA:



1.6) Materiali > Definizioni:

RETICOLO CRISTALLINO: struttura ordinata e ripetitiva assunta dagli atomi. Nel reticolo gli atomi sono disposti ai nodi.

LEGAME METALLICO: legame che permette agli elettroni più esterni di muoversi facilmente.

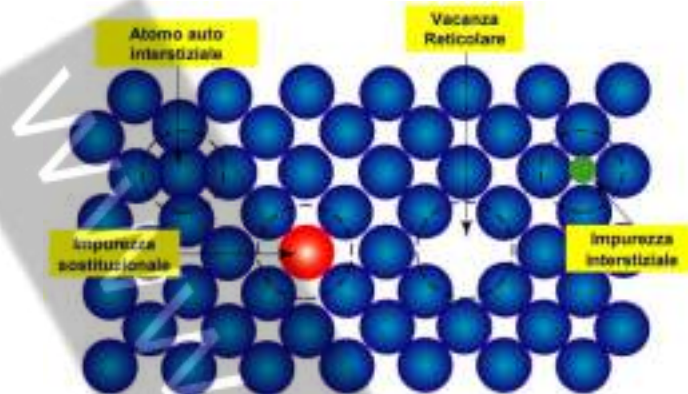
LEGHE METALLICHE: materiali metallici composti da due o più elementi chimici;

SOLUZIONE SOLIDA: si ottiene qualora la dispersione nel reticolo degli atomi aggiunti è completa, omogenea macroscopicamente e la struttura cristallina coincide con quella del solvente.

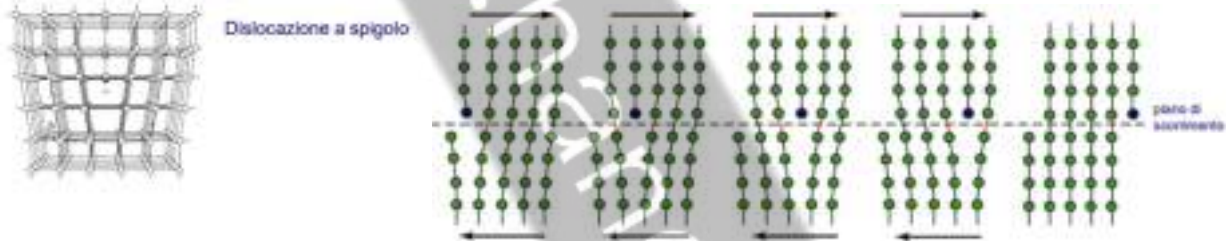


DIFETTI:

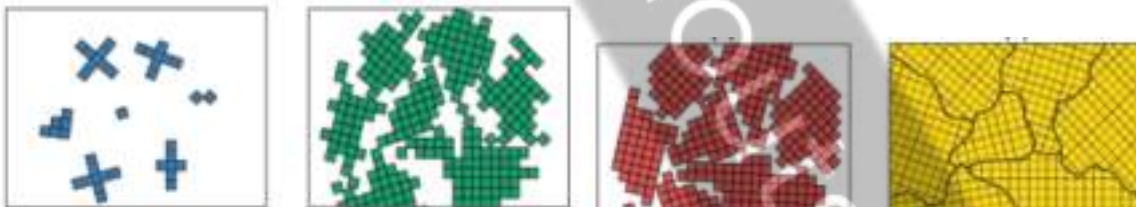
- **DIFETTI PUNTUALI:**



- **DIFETTI LINEARI:** Meccanismo di deformazione progressiva in presenza di dislocazione a spigolo;



- **DIFETTI SUPERFICIALI:** Le proprietà meccaniche sono legate alla configurazione della struttura cristallina ottenuta nel passaggio dallo stato liquido allo stato solido e modificata nelle lavorazioni / trattamenti successivi. Nucleazioni ed accrescimento:



TRASFORMAZIONE: La variazione nel tempo di una o più proprietà della parte ottenuta attraverso opportuni processi elementari.

Milling: processo di fresatura;

Drilling: processo di foratura.

Sabbatrice: macchina in cui viene introdotto il pezzo da sabbare e viene sparata della sabbia che rimuovono le impurità superficiali. Più si spara più la superficie viene liscia.

Nucleazione: si creano dei nuclei/ accrescimento: questi nuclei crescono.

Dislocazione: È un tipo di discontinuità che è alla base di meccanismi di deformazione plastica.

Lavoro di deformazione: prodotto tra forza applicata e spostamento (prodotto tra tensione e deformazione);

RICRISTALLIZZAZIONE: Trattamento termico volto a recuperare le eccessive tensioni dell'incrudimento.

SFORZO: sollecitazione a cui sottopongo il materiale (la percepisce in tutti i suoi punti);

DEFORMAZIONE: è conseguente alla sollecitazione.

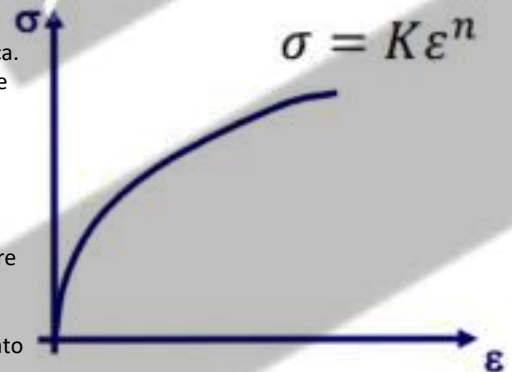
INCRUDIMENTO: caratteristiche che fa sì che in campo elastico devo continuamente applicare uno sforzo maggiore per deformarlo.

-> L'incrudimento è un fenomeno metallurgico per cui un materiale metallico risulta rafforzato in seguito a una deformazione plastica a freddo.

-> Fenomeno collegato alla deformazione degli individui cristallini che compongono un aggregato

quale una barra metallica o simili, in seguito a sollecitazioni esterne, con conseguente variazione generale di diverse proprietà fisico-meccaniche dei metalli. L'i. incide in primo luogo sulle caratteristiche meccaniche: aumentano, per es., il limite elastico, il carico di rottura, la durezza, e diminuiscono l'allungamento, la strizione e la resilienza.

-> La resistività elettrica subisce un incremento mentre diminuisce la resistenza alla corrosione



1.7) Materiali > Definizioni:

STRIZIONE: Riduzione della sezione trasversale che subisce un corpo sottoposto a sollecitazione di trazione; in partic., la riduzione percentuale che subisce alla rottura un provino di materiale duttile (acciaio, rame, ecc.), riferita alla sezione indeformata prima della prova.



ANISOTROPIA: proprietà per cui il valore di una grandezza fisica in una sostanza o nello spazio, non è uguale in tutte le direzioni.

FATICA: fenomeno che porta alla rottura di tipo fragile materiali (anche tenaci) sottoposti a sollecitazioni cicliche inferiori al limite elastico.

ELETTRONI DI VALENZA: mantengono la struttura cristallina, sono quelli condivisi dagli atomi, il loro legame si dice metallico.

LEGE METALLICHE: metalli composti da due o più elementi chimici.

SOLUZIONE SOLIDA: si ottiene qualora la dispersione nel reticolo degli atomi aggiunti è completa, omogenea macroscopicamente e la struttura cristallina coincide con quella del solvente.

NUCLEAZIONE E ACCRESCIMENTO: il materiale si solidifica, all'interno di ogni grano, in una direzione, ma ogni grano ha una direzione diversa.

www.handouts.it

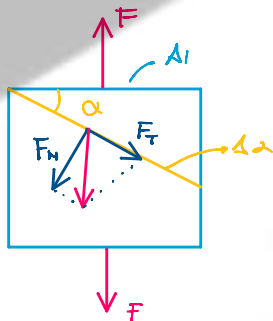
2.1) Deformazione:

Ipotesi di lavoro:

- Il materiale deformato è modellato come un **corpo solido** (con un volume V e una superficie S);
- Il materiale è **continuo** (non si considerano le azioni scambiate tra particelle e a livello atomico);
- Il corpo è in **equilibrio** (la risultante delle forze è nulla);
- Parte della **superficie S** può essere **vincolata** all'esterno;
- Il sistema di forze esterne agente su una porzione di materiale è bilanciato dalle forze interne riducibili alla forza risultante agente sulla superficie di separazione.

Meccanica della deformazione plastica:

- > Passaggio da stato di tensione monoassiale a triassiale;
- > Lo stato di tensione e deformazione del materiale in un punto è definito da matrici di tensioni e deformazioni nello spazio.
 - Stato di tensione monoassiale: sforzo agisce in un'unica direzione;
 - Stato di deformazione triassiale: la deformazione caratterizza tutte e tre le direzioni.
- > Cosa accade se non abbiamo un piano (sforzo monoassiale)?



Forze:

$$F_n = F \cos \alpha;$$

$$F_t = F \sin \alpha;$$

Tensione normale:

$$\sigma_\alpha = \frac{F_n}{A_\alpha} = \frac{F \cos \alpha}{\frac{A_1}{\cos \alpha}} = \sigma \cos^2 \alpha;$$

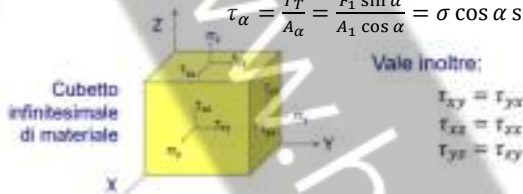
Tensione tangenziale:

$$\tau_\alpha = \frac{F_t}{A_\alpha} = \frac{F_1 \sin \alpha}{A_1 \cos \alpha} = \sigma \cos \alpha \sin \alpha \quad \rightarrow \quad \tau_{\alpha=45^\circ} = \tau_{max} = \frac{\sigma}{2};$$



Criteri di snervamento:

- Tresca;
- Von Mises;



Vale inoltre:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx}$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}$$

Criterio di Tresca:

-> **DEF:** il materiale comincia a deformarsi plasticamente quando la **massima tensione tangenziale** raggiunge un valore soglia C:

$$\tau_{max} = C;$$

- Monoassiale: $\tau_{max} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2};$
- Triassiale: $\sigma_{max} = \max(\sigma_1; \sigma_2; \sigma_3);$
 $\sigma_{min} = \min(\sigma_1; \sigma_2; \sigma_3);$

- Il valore C viene definito dalla prova di trazione che impone una sollecitazione monoassiale ($\sigma_2 = 0; \sigma_3 = 0$)
- > Snervamento: quando $\sigma_1 = T \Rightarrow C = \frac{Y}{2} \Rightarrow$ *condizione snervamento*: $\sigma_{max} - \sigma_{min} = Y;$

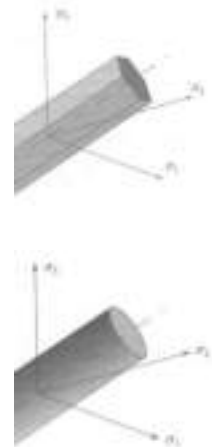
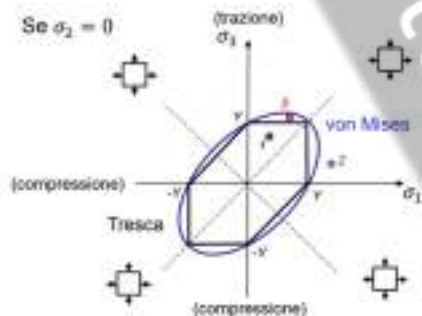
Criterio di von Mises:

-> **DEF:** il materiale comincia a deformarsi quando l'**energia di distorsione** raggiunge un valore critico;

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2Y^2;$$

- Anche in questo caso i risultati per trovare il valore critico vengono definiti grazie alla prova di trazione.

Il progettista può utilizzare un criterio rispetto ad un altro in base all'interesse che ha a deformare o meno un oggetto.



Campo elastico, Legge di Hooke:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)];$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)];$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)];$$

Rapporto di Poisson:

$$\nu = \left| \frac{\epsilon_{trasversale}}{\epsilon_{longitudinale}} \right| = \left| \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \right| = \left| \frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} \right|$$

Campo plastico:

- Le equazioni devono avere carattere incrementale;
- V Costante $\Rightarrow \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \rightarrow \nu = \frac{1}{2};$
- È presente una costante (come E per il campo elastico) che tiene conto della "storia" deformativa pregressa: *modulo di plasticità*: $1/d\lambda.$

$$\epsilon_1 = d\lambda \left[\sigma_1 - \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \right];$$

$$\epsilon_2 = d\lambda \left[\sigma_2 - \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \right];$$

$$\epsilon_3 = d\lambda \left[\sigma_3 - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right];$$

2.2) Deformazione:

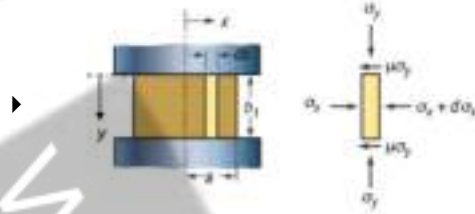
Condizioni al contorno:

- Sforzo normale agente su una superficie libera è nullo; come gli sforzi tangenziali agenti sulla stessa superficie.
- Se le tensioni tangenziali agenti su una superficie sono nulle => l'azione avviene senza forza d'attrito
- Le deformazioni in una zona sono influenzate dalle adiacenti.

Metodo del conico:*

-> Hp:

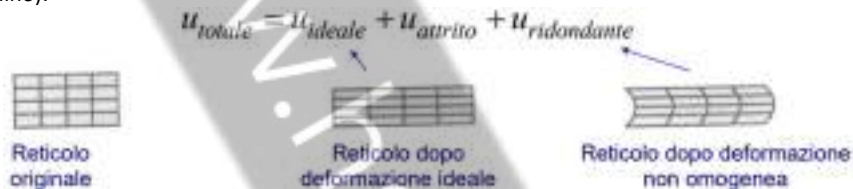
- Materiale plastico perfetto (no incrudimento);
- Stato di deformazione piana (larghezza w costante, $\epsilon_z = 0$);
- Presenza di attrito con coefficiente d'attrito μ costante;
- Gli assi principali coincidono con il sistema Oxyz in figura (approssimazione: $\sigma_1 \cong \sigma_x$; $\sigma_2 \cong \sigma_y$; $\sigma_3 \cong \sigma_z$);



Lavoro di deformazione:

-> **DEF:** rappresenta l'energia minima o energia ideale richiesta per una deformazione uniforme.

- $L = u * V$
- Il lavoro totale (o energia) tiene conto di tre aspetti: $L_{\text{deformare}} + L_{\text{vincere attrito}} + L_{\text{ridondante}}$ (dovuto al disfacimento del reticolo cristallino):



-> **Efficienza:** di un processo di deformazione plastica:

$$\eta = \frac{u_{\text{ideale}}}{u_{\text{totale}}}$$

-> Il suo valore può variare tra 30÷ 60% per estrusione fino a 75÷ 90% per la laminazione.

Deformazione massiva:

Processi di deformazione plastica:

-> **PRINCIPIO:** modifica della geometria di un corpo solido mediante l'applicazione di un sistema di forze che causa una deformazione.

-> Principali processi:

- Laminazione;
- Forgiatura (stampaggio e fucinatura);
- Estrusione;
- Trafilatura;

-> Caratteristiche:

- Tipicamente il rapporto limitato tra superficie e volume è limitato.
- Temperatura:

o Freddo: $\frac{T}{T_{\text{fusione}}} < 0,3$;

▪ Vantaggi:

- Tolleranze dimensionali più strette;
- Migliore finitura superficiale;
- Maggiore resistenza e durezza del pezzo;
- Proprietà direzionali desiderate nel pezzo finale;

▪ Svantaggi:

- Forze e potenze maggiori;
- Le superfici del pezzo di partenza devono essere prive di incrostazioni;
- Esiste un limite alla massima deformazione.

o Tiepido: $0,3 < \frac{T}{T_{\text{fusione}}} < 0,6$;

o Caldo: $\frac{T}{T_{\text{fusione}}} \geq 0,6$;

▪ Vantaggi:

- Maggiori deformazioni;
- Minori forze e potenze;
- Possibilità di deformare i materiali che si fratturano nei processi a freddo;
- Proprietà meccaniche isotropiche;
- Adatti per lavorazioni successive perché il materiale non incrudisce;



2.3) Deformazione:

- Svantaggi:
 - Minore precisione dimensionale;
 - Maggiore energia;
 - Ossidazione delle superfici in lavorazione;
 - Minore finitura superficiale;
 - Utensili hanno vita più breve;
 - Esiste un limite alla massima deformazione.
- > Classificazione lavorazioni:
- Primarie: permettono di ottenere dei semilavorati sbozzati in varie forme;
- Secondarie: a partire dalle preforme ottenute nelle lavorazioni primarie permettono di ottenere un prodotto semifinito o finito

LAMINAZIONE:

-> DEF: permette di ottenere semilavorati o prodotti finiti caratterizzati da una sezione definita e da una dimensione maggiore delle altre (la lunghezza);

- Lavorazione con rulli contro-rotanti;
- È tipicamente la prima trasformazione a valle di quelle siderurgiche (primaria);
- Generalmente effettuata a caldo ($T \geq 0,6 T_{fusione} [K]$) (solo per lamiere di piccolo spessore si può eseguire a freddo);
- Riduzione del grano cristallino;
- Esistono differenti tipologie di rulli;
- Sollecitazione: compressione.

Cinematica della lavorazione:

- Arco di contatto L: arco del rullo a contatto con il laminando:

$$L = R * \alpha_0;$$

-> Dalla geometria del problema:

$$(1 - \cos \alpha_0)R = \frac{\Delta h}{2} \text{ ma sviluppando } \alpha_0$$

in serie di McLaurin arrendoci al secondo termine $\cos \alpha_0 \approx 1 - (\alpha_0^2)/2$

si ha $\alpha_0 \approx \sqrt{\Delta h/R}$ da cui si ottiene:

$$L \approx \sqrt{\Delta h * R};$$

- **V = COSTANTE** => $l_e h_e b_e = l_u h_u b_u$

-> Dato che $b_e = b_u$ (allargamento trascurabile) => $l_e h_e = l_u h_u$, se dividiamo per t entrambi otteniamo $v_e h_e = v_u h_u$, ma dato che

$$h_u < h_e \Rightarrow v_e < v_u.$$

$$\Rightarrow v_e h_e = v_n h_n = v_u h_u;$$

- **SEZIONE NEUTRA:** $v_n = v_c * \cos \alpha \approx v_c = \omega R$;

$$\text{-> Slittamento: } \frac{v_u - v_c}{v_c};$$

- Attrito:

- **Attrito positivo:** situato prima della sezione di inversione, il rullo ha velocità periferica maggiore del laminando, l'attrito tende ad "accelerare" il materiale;
- **Attrito negativo:** situato dopo la sezione di inversione; il rullo ha velocità periferica minore del materiale; l'attrito tende a "rallentare" il materiale.

👉 L'attrito è in funzione dei materiali, della finitura dei rulli, della temperatura e delle condizioni di lubro-refrigerazione.

Condizioni di imbocco:

-> L'attrito consente al laminando di "imboccare" il laminatoio.

-> Per trovare la condizione di imbocco occorre calcolare la componente orizzontale delle forze agenti sul laminando:

$$F_n = p * dL * b_e; F_t = \mu * p * dL * b_e; F_{n,0} = p * dL * b_e * \sin \alpha_0; F_{t,0} = \mu * p * dL * b_e * \cos \alpha_0;$$

-> Se la condizione di imbocco non è verificata si può:

- Aumentare l'attrito (riduzione lubrificante);
- Aumentare il raggio dei rulli;
- Diminuire $h_e - h_u$;
- Applicare una forza di spinta al laminando;

-> Per essere sicuri del trascinamento del pezzo possiamo verificare le condizioni di trascinamento (possiamo perché meno restrittive e sono verificate se è verificata la condizione di imbocco);

$$\text{-> Condizioni di trascinamento: } \tau \geq \frac{\alpha_0}{2};$$

Dinamica:

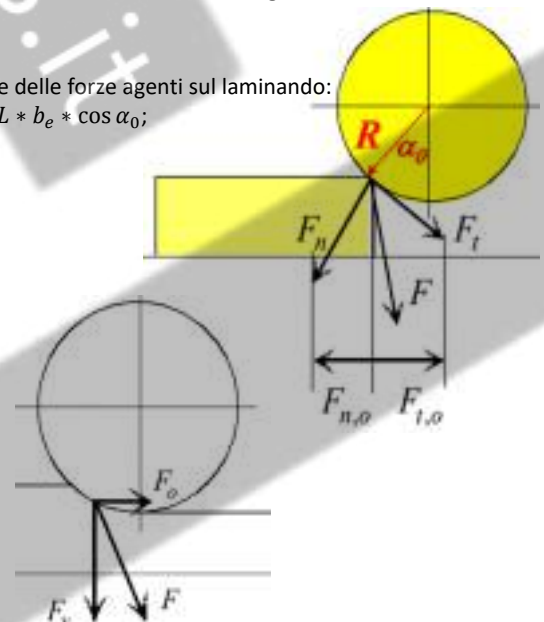
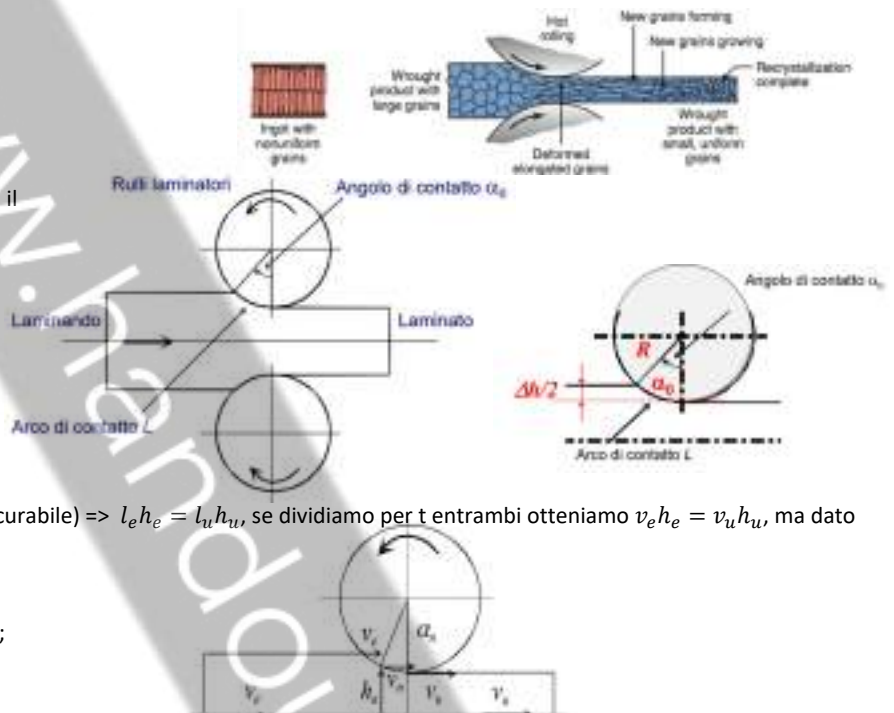
-> Descriviamo la forza che si sviluppa durante la lavorazione come F che il singolo rullo esercita sul laminando, scomposta in F_v e F_o ;

$$\text{- Forza verticale: } F_v = p_{av} * b * L = p_{av} * b * \sqrt{R * \Delta h};$$

-> Sperimentalmente è possibile ricavare che $F_v \gg F_o \Rightarrow$ la forza di lavorazione è approssimata con la sola forza verticale.

Hp: stato piano di deformazione: $\Delta b = 0$; deformazione a caldo;

$$\text{- Pressione media: } p_{av} = \frac{1}{\alpha_0} * \int_0^{\alpha_0} p(\alpha) * d\alpha;$$



2.4) Deformazione:

-> se il materiale è plastico perfetto => pressione media è proporzionale alla tensione di snervamento (dal metodo del conio con attrito nullo e deformazione piana):

$$F_v = \frac{2}{\sqrt{3}} * Y * b * \sqrt{R * \Delta h};$$

Potenza:

$$P = p_{av} * b * \Delta h * v_c = \frac{2}{\sqrt{3}} * Y * b * \Delta h * v_c;$$

- Hp: stato piano di deformazione: $\Delta b = 0$; defomrazione a caldo.

1. Nota la forza possiamo calcolare la coppia necessaria per mettere in rotazione il cilindro: $C = F_v d \approx F_v \frac{L}{2}$;

- D: braccio approssimabile con metà arco di contatto;

2. Potenza per mettere in azione i due cilindri: $P = 2C w = F_v L w = F_v \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} * v_c$;

-> Con: $w = \frac{v_c}{R}$; $L = \sqrt{R * \Delta h}$.

Lavoro:

$$L = P * t_{lam} \approx u * V;$$

- Hp: stato piano di deformazione: $\Delta b = 0$; defomrazione a caldo.

1. $L = \frac{2}{\sqrt{3}} * Y * b * \Delta h * v_c * t_{lam}$;

2. Dato che: $v_c * t_{lam} = l_m \Rightarrow L = \frac{2}{\sqrt{3}} * Y * b * \Delta h * l_m * \frac{h_m}{h_m} = \frac{2}{\sqrt{3}} * Y * b * l_m * h_m * \frac{\Delta h}{h_m}$;
-> $b * l_m * h_m = V = cost$;

3. $\Rightarrow L = \frac{2}{\sqrt{3}} * Y * \frac{\Delta h}{h_m} * V \approx u * V$;

Pressione:

-> La pressione è diversa nelle varie parti dell'arco di contatto: $p_{av} = \frac{1}{\alpha_0} \int_0^{\alpha_0} p(\alpha) d\alpha$;

-> Viene rappresentata con la collina delle pressioni;

-> Dalla quale possiamo ricavare i seguenti valori:

- Coppia necessaria: $C = R F_t = R \int_0^{\alpha_0} \pm \mu p(\alpha) b R d\alpha$;

- Potenza necessaria: $P = 2C w$;

- Forza verticale totale: $F_v = \int_0^{\alpha_0} p(\alpha) (\cos \alpha \pm \mu \sin \alpha) b R d\alpha$;

- Torza orizzontale: $F_0 = \int_0^{\alpha_0} p(\alpha) (\sin \alpha \pm \mu \cos \alpha) b R d\alpha$;

Laminazione a freddo - incrudimento:

-> hp: 1) Stato piano di deformazione; 2) deformazione a freddo (incrudimento): $\bar{Y} \rightarrow Y$;

- Forza: $F_v = p_{av} * b L = \frac{2}{\sqrt{3}} * \bar{Y} * b * \sqrt{R \Delta h}$;

- Potenza: $P = p_{av} * b * \Delta h * v_c = \frac{2}{\sqrt{3}} * \bar{Y} * b * \Delta h * v_c$;

- Lavoro: $P * t_{lam} = \frac{2}{\sqrt{3}} * \bar{Y} * b * \Delta h * v_c * t_{lam} = \frac{2}{\sqrt{3}} * \bar{Y} * \frac{\Delta h}{h_m} * V = u * V$;

Tensioni di compressione:

-> Valutazione precisa: considera attrito.

=> Determiniamo la pressione lungo l'arco in presa ($p(\alpha)$) che è rappresentabile con la "collina delle pressioni".

$$p_{av} = \frac{1}{\alpha_0} * \int_0^{\alpha_0} p(\alpha) * d\alpha;$$



-> Conoscendo la funzione di , cioè la distribuzione delle pressioni sui cilindri possiamo calcolare:

• la coppia necessaria $C = R F_t = R \int_0^{\alpha_0} \pm \mu p(\alpha) b R d\alpha$

• la potenza necessaria $P = 2C w$

• la forza verticale totale agente sui cilindri $F_v = \int_0^{\alpha_0} p(\alpha) (\cos \alpha \pm \mu \sin \alpha) b R d\alpha$

• la forza orizzontale totale agente sul laminando $F_0 = \int_0^{\alpha_0} p(\alpha) (\sin \alpha \pm \mu \cos \alpha) b R d\alpha$

Difetti:

- Inflessione dei rulli => errore dimensionale;

- Surriscaldamento;

- Apertura: attrito troppo forte, spacca il materiale inserito.

2.5) Deformazione:

FORGIATURA:



-> Divisa in:

- Stampaggio:
 - Stampo chiuso;
 - Semilavorati / finiti;
- Fucinatura:
 - Stampaggio aperto;
 - Semilavorati.

FUCINATURA o RICALCATURA:

-> DEF: deformazione in stampo aperto.

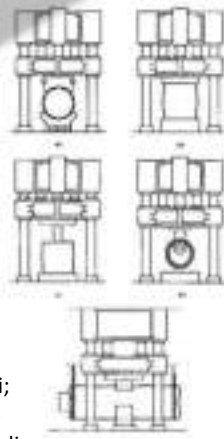
VANTAGGI:

- E' una lavorazione semplice ed economica;
 - > Non ha la complessità economica dello stampo chiuso.
- E' possibile ottenere un'ampia serie di forme utilizzando i medesimi stampi;
- E' possibile lavorare pezzi di grandi/grandissime dimensioni (35 tonnellate)
- Distribuzione delle fibre del materiale che incrementa le caratteristiche finali del pezzo prodotto.

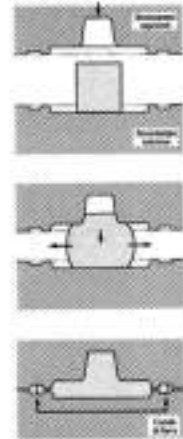
SVANTAGGI:

- Configurazione a 'barile' del pezzo dovuta alle sollecitazioni di attrito (tangenziali).

FUCINATURA



STAMPAGGIO



STAMPAGGIO:

-> Caratteristiche:

- Stampi: forma prossima a quella finale;
- Necessario più di uno stampo;
- Bava permette il corretto riempimento dello stampo e la riduzione degli urti.

Forza:

$$F = k_p Y_f A;$$

- F: forza massima di stampaggio;
- k_p : costante sperimentale, mi definisce le forme con bava
- Y_f : Tensione di flusso (essendo campo plastico $T \gg$ punto di snervamento)
- A: Area su cui applichiamo la pressione proiezione sul piano della forma dello stampo stesso + i canali di bava.
- K: costante (3-5 forme semplici senza bava; 5-8 forme semplici con bava; 8-12 forme complesse con bava);

Progettazione stampaggio:

Passi:

- Scelta del piano di bava;
- Calcolo soprametalli;
- Angoli di sforno;
- Raggi di raccordo.

Altre scelte progettuali:

-> Sovrametalli:

- Dimensioni del pezzo;
- Ossidazione alta temperatura;
- Difetti superficiali;
- Incompleto riempimento

-> Angoli di sforno:

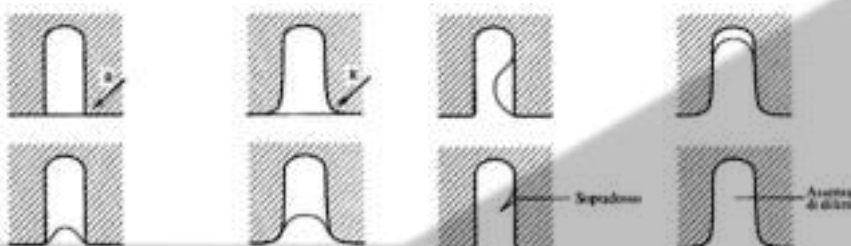
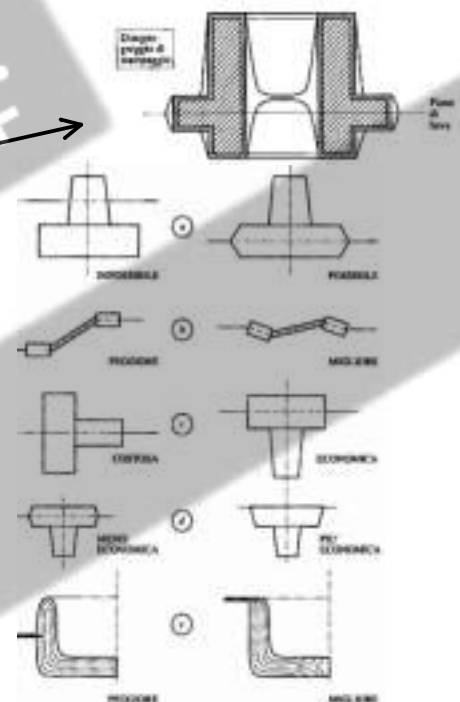
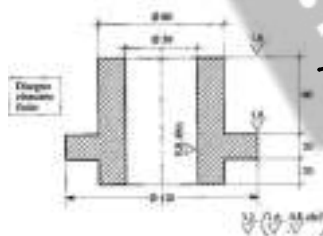
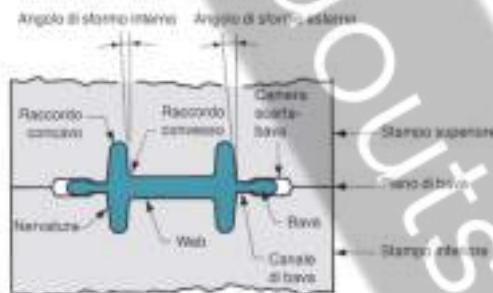
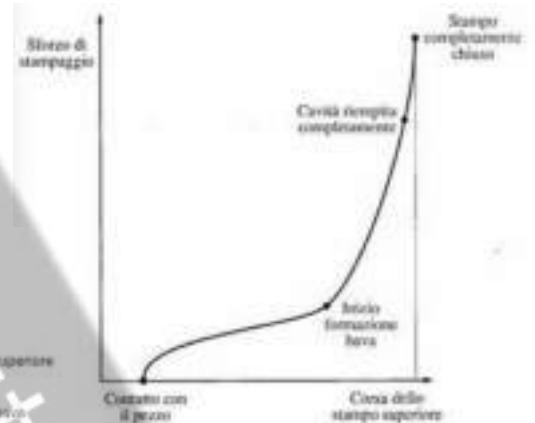
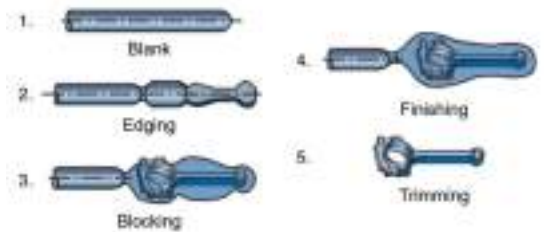
- 7-8° per pezzi normali, 10-12° per pezzi alti;
- Facilitare il riempimento;
- Evitare usura durante l'estrazione;

-> Raggi di raccordo:

- Concentrazioni di tensioni;
- Distacco del materiale durante il riempimento;

-> Fenomeno del ritiro.

SEQUENZA STAMPAGGIO BIELLA



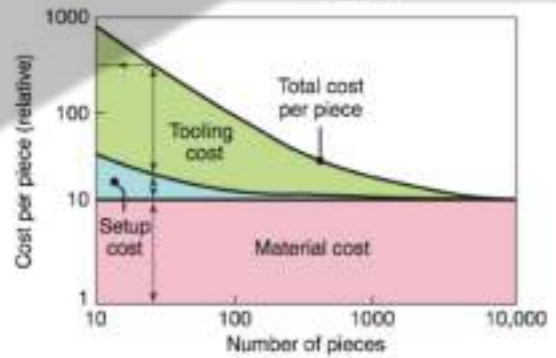
2.6) Deformazione:

Costi:

- Costi elevati di stampi ed attrezzature
- Costo del lavoro da medio ad alto
- Esperienza operatore da media ad alta
- Conveniente per grandi volumi di produzione

Macchine:

-> Controlla parte attrezzature 6.2

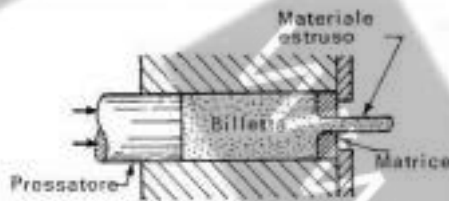


ESTRUSIONE:

-> **DEF:** consiste nell'obbligare uno spezzone di barra a sezione generalmente circolare (massello) a fuoriuscire attraverso una matrice, mediante l'azione di una forza di compressione.

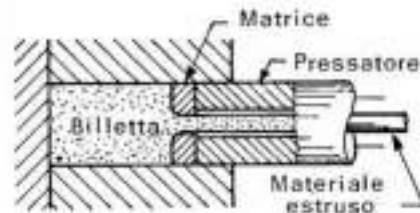
-> Tipi di estrusione:

- Diretta:



-> Maggior attrito billetta-camera.

- Inversa:

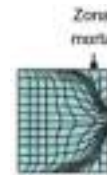


-> Scorrimento relativo billetta-camera nullo.

Forza:



a) Basso attrito o nel caso di estrusione indiretta



b) Alto valore d'attrito



c) Attrito alto, raffreddamento camera

-> All'aumentare della corsa del pistone, l'attrito diminuisce => anche la pressione inizia a diminuire;

-> **Zona morta:** area in cui il materiale è molto incrudito e vicino alla matrice (non la estrudiamo per due motivi: costa troppo e il materiale è pieno di impurezze);

-> Limiti:

- Velocità pistone: sino 0,5 m/s;
- Lunghezza < 7,5m (dato dalle dimensioni del forno).

RAPPORTO DI ESTRUSIONE:

- Limiti rapporto di estrusione: **10 - 400**;
- Dimensione del cerchio circoscritto: da 6 mm a 1000 mm;

★ Lavoro

-> hp: estrusione a caldo (attrito nullo, materiale perfettamente plastico);

$$L_{interno} = u * V = Y \ln \left(\frac{L_i}{L_f} \right) A_i L_i;$$

$$L_{esterno} = F * L_i;$$

$$F = A_0 * Y \ln \left(\frac{A_i}{A_f} \right) = A_0 * Y \ln R \text{ ponendo } L_{interno} = L_{esterno};$$

$$\rightarrow R = \frac{A_0}{A_f};$$

$$p = \frac{F}{A_0} = Y \ln R = u;$$

-> In presenza di attrito:

$$p_{attrito} = Y (a + b \ln R);$$

$$\rightarrow a = 0.8; b = 1.2; 1.5;$$

$$V = \Delta_0 L_0 = \Delta f L f$$

$u = \frac{\sigma}{\sigma_0}$

$$u = \gamma \cdot \epsilon$$

$$\epsilon = \ln \left(\frac{L_f}{L_0} \right) \text{ REALE}$$

2.7) Deformazione:

VANTAGGI E SVANTAGGI:

- Estrusione a caldo:

Vantaggi

- Tensioni minori
- Unico metodo per estrudere alcuni materiali (titanio, leghe refrattarie, leghe alto-resistenziali)

Svantaggi

- Elevata usura attrezzature
- Strato di ossido superficiale
- Raffreddamento della billetta genera una deformazione non uniforme
- Le parti possono essere distorte

- Estrusione a freddo:

Vantaggi

- Migliori proprietà meccaniche
- Incrudimento da deformazione
- Miglior controllo delle tolleranze (ridotte operazioni di finitura)
- Miglior finitura superficiale
- No costi per il riscaldamento
- Elevata produttività

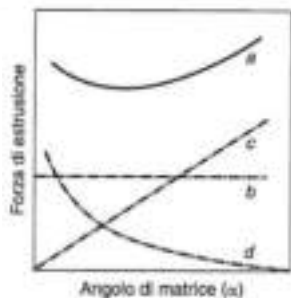
Svantaggi

- Sforzi maggiori e punzoni/matrici più costosi
- Più delicato il progetto delle matrici
- Lubrificazione è più critica

Angolo di matrice

-> Angolo ottimo: l'angolo ottimo di scorrimento tiene conto della zona morta.

- La forza totale che bisogna utilizzare è influenzata da questo perché definita da tre curve.
- Il lavoro ridondante cresce proporzionalmente all'angolo della zona morta; mentre quello speso per l'attrito diminuisce all'aumentare dell'angolo.



a) Forza totale

b) $F = A_0 Y \ln R$

c) Lavoro ridondante

d) Lavoro speso per attrito



DIFETTI:

- Esterni:
 - Cricche superficiali (causate da elevata temperatura, elevata velocità, attrito elevato),
 - Aspetto superficiale (ossidi, scalfitture, macchie);
- Interni:
 - Canali (ossidi superficiali e difetti convogliati al centro dell'estruso),
- Cricche interne (stato di trazione al centro dell'estruso dovuto ad errata progettazione della matrice).

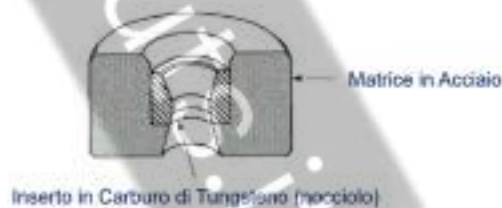
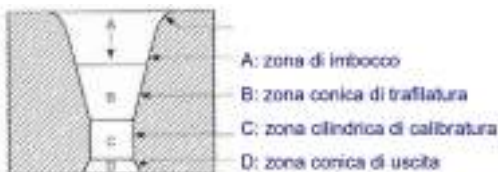


TRAFILATURA:

-> DEF: operazione con la quale si modifica, di solito a freddo, la sezione di un prodotto metallurgico facendolo passare, mediante un'azione di trazione longitudinale, attraverso un foro tronco-conico detto trafila o filiera o matrice.

-> Utilizzata per produrre barre, fili o tubi non saldati.

Nomenclatura:

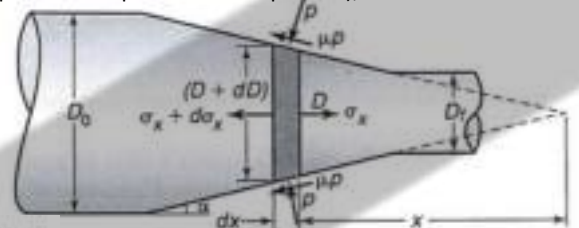


TENSIONI e FORZE:

-> Utilizziamo lo stesso approccio visto per l'estrusione:

-> Hp: no attrito, materiale PERFETTAMENTE PLASTICO;

- Sforzo: $\sigma_d = Y \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) = Y \ln R$; ? che tensione è??? (caso ideale: materiale con comportamento perfettamente plastico);
- Forza: $F = Y \ln(R) A_f$;
- > Materiale con COMPORTAMENTO INCRUDENTE:
- Sforzo: $\sigma = k * \epsilon^n \rightarrow \bar{Y} = \frac{k * \epsilon^n}{n+1}$;
- Sforzo interno: $\sigma_d = \bar{Y} \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right)$;
- Forza: $F = \bar{Y} \ln(R) A_f$;



-> Al variare del rapporto di trafilatura-> (con materiale perfettamente plastico)

$$A_0 = 1,5 \cdot A_f \rightarrow \sigma_d = Y \ln(1,5) = 0,41 \cdot Y$$

$$A_0 = 2 \cdot A_f \rightarrow \sigma_d = Y \ln(2) = 0,69 \cdot Y$$

$$A_0 = 2,5 \cdot A_f \rightarrow \sigma_d = Y \ln(2,5) = 0,92 \cdot Y$$

$$A_0 = 3 \cdot A_f \rightarrow \sigma_d = Y \ln(3) = 1,1 \cdot Y$$

2.8) Deformazione:

MASSIMA RIDUZIONE:

-> Caso materiale comportamento **perfettamente plastico**: Individuiamo la condizione limite considerando il caso di materiale con comportamento perfettamente plastico =>

$$\sigma_d = Y \ln \left(\frac{A_i}{A_f} \right) Y; \ln \left(\frac{A_i}{A_f} \right) = 1 \rightarrow \frac{A_i}{A_f} = e;$$

Da cui si ricava la **massima riduzione** per passata: $\frac{A_i - A_f}{A_i} = 1 - \frac{1}{e} = 0,632 \cong 63\%$;

-> Caso materiale con **comportamento incrudente**:

$$\sigma_d = \bar{Y} \ln \left(\frac{A_i}{A_f} \right) Y * \varepsilon; \text{ con } \bar{Y} = \frac{k \varepsilon^n}{n+1};$$

In questo caso la **situazione limite** è individuata da: $\sigma_d = k * \varepsilon^n = \frac{k \varepsilon^n}{n+1} \varepsilon \Rightarrow \varepsilon = n + 1 = \ln \left(\frac{A_i}{A_f} \right)$

Da cui si ricava la massima riduzione per passata: $\frac{A_i - A_f}{A_i} = 1 - e^{n+1};$

Vantaggi / Svantaggi:

VANTAGGI:

- Prodotti molto più lunghi (anche chilometri) e sottili che non per estrusione
- Elevata precisione dimensionale e finitura superficiale

SVANTAGGI:

- Maggiori forze (solo a freddo)
- Se lo sforzo eccede snervamento del filo a trazione può aversi deformazione indesiderata fino a rottura: la riduzione massima consentita è conseguentemente limitata

L'attrezzo:*

2.9) Deformazione > Definizioni:

RULLI CILINDRICI: solitamente utilizzati nelle lavorazioni, non sono sagomati;

CALIBRI o **RULLI SAGOMATI:** sono rulli che impongono una particolare geometria alla sezione d'uscita.

SEZIONE NEUTRA: sezione nella quale la velocità del laminando (v_n) risulta pari alla velocità del rullo (v_c);

IMBOCCARE: entrare tra i rulli senza spinte esterne;

LAMINATOIO DUO REVERSIBILE: se viene invertito il senso di rotazione dei cilindri;

TRENI DI LAMINAZIONE: impianti di laminazione che prevedono più gabbie in sequenza che operano sulla stessa lamiera;

-> è necessario regolare la velocità periferica dei rulli separatamente in ogni stazione per garantire l'incremento di velocità legato alla diminuzione di spessore. In generale viene dato un leggero "tiro" tra una stazione e l'altra per evitare che il materiale venga caricato a compressione tra due gabbie (si "accartocchierebbe").

CANALI SCARTA-BAVA: sono canali che raccolgono il materiale in eccesso.

ZONA MORTA: area in cui il materiale è molto incrudito e vicino alla matrice (non la estrudiamo per due motivi: costa troppo e il materiale è pieno di impurezze);

RAPPORTO DI ESTRUSIONE: rapporto tra area finale e area iniziale;

www.handouts.it

3.1) Fonderia:

FONDERIA

-> **DEF:** realizzazione di pezzi colando del metallo liquido all'interno di una cavità presente in una forma. In questa il metallo si raffredda e solidifica, assumendone la geometria e le dimensioni. Una volta solidificato il pezzo (getto) viene estratto dalla forma.

- È una delle tecniche più versatili per la realizzazione di semilavorati/finiti;
- Spesso i pezzi sono destinati alle lavorazioni per asportazione di truciolo;



Procedura della realizzazione per fonderia:

- Disegno e realizzazione del modello;
- Realizzazione della cavità (allestimento della forma);
- Fusione del metallo; colata entro la forma e solidificazione.



Preparazione della forma:

-> **MODALITÀ:**

- Forma TRANSITORIA:



- Forma PERMANENTE:



-> Argomenti di **DECISIONE DELLA FORMA** di preparazione sono:

- Estrazione del pezzo;
- Costo della forma;

-> La **PROCEDURA** per creare un PF segue la seguente scaletta:

1. Disegno elemento finito (tiene conto di sovrametalli, piano di divisione, angoli di sformo e raggi di raccordo per arrivare al ...);
2. Disegno del grezzo (dal quale si tiene conto di portate d'anima e ritiro per arrivare al...);
3. Disegno del modello;

-> **ATTORI** principali:

- PIANO DI DIVISIONE DELLE STAFFE:

-> **DEF:** piano in cui si dividono le due staffe.

- È necessario che il modello/getto siano estraibili. In caso non avvenga si può:
 - Utilizzo di tasselli;
 - Modifica progetto;

- SOVRAMETALLI:

-> **DEF:** metallo che viene applicato al di sopra del grezzo ottenuto dalla fonderia.

Necessario per ottenere fori passanti, per evitare di ottenere pareti poco sottili o una migliore finitura superficiale;

-> Vengono definiti in funzione della dimensione nominale del pezzo grazie all'utilizzo di delle tabelle.

Tipologie:

- o Sovrametallo costante: aggiungiamo del materiale su tutte le quote con lo stesso spessore;
- o Sovrametallo variabile: il sovrametallo viene aggiunto a quote non costanti per semplificare l'anima.

- ANGOLI DI SFORMO:

-> **DEF** sono angoli che favoriscono la sformatura, costituiti al fine di eliminare superfici perpendicolari al piano di divisione;

Valori indicativi: modelli di legno: 1°-2°; modelli metallici 30°;

➡ Effetto secchiello da sabbia;

- RAGGI DI RACCORDO:

-> **DEF:** elemento che evita l'erosione di angoli (con angoli vivi c'è maggior rischio di erosione per via delle forti tensioni);

- ANIMA:

-> **DEF:** elementi che permettono la realizzazione di cavità nel getto.

-> Requisiti:

- o Resistenza meccanica (far fronte ai carichi cui sono soggette durante la colata);
- o Permeabilità (eliminazione dei prodotti gassosi durante la colata);
- o Cedevolezza (non opporre resistenza durante il ritiro del getto in fase solida);
- o Sgretolabilità (per rendere rapida la successiva fase di eliminazione);

- PORTATA D'ANIMA:

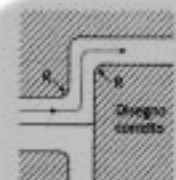
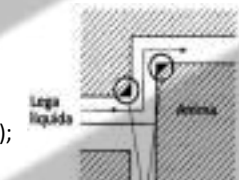
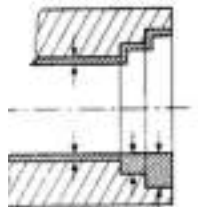
-> **DEF:** appendice dell'anima che alloggia nella forma, è da prevedere nella definizione del modello.

- MODELLO:

-> **DEF:** è un elemento simile al getto finale, utilizzato per dare la forma alla terra;

-> Caratterizzato da:

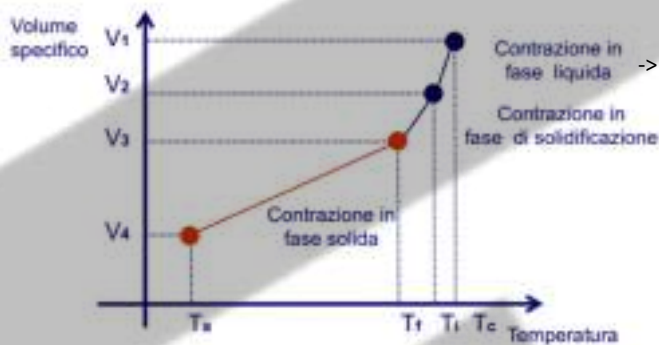
- o Funzionalità;
- o Durata (legata al tipo di produzione prevista);
- o Qualità (garantire la precisione desiderata del grezzo);
- o Possibili materiali: legno, leghe metalliche, materie plastiche, polistirolo, cera;



3.2) Fonderia:

FENOMENO DEL RITIRO:

Il fenomeno del ritiro



-> **DEF:** fenomeno che per il quale il getto si ritira in tutte le direzioni durante la solidificazione.

-> Soluzione: conoscere la percentuale di ritiro (grazie a delle tabelle) per cui si può ridimensionare il getto.

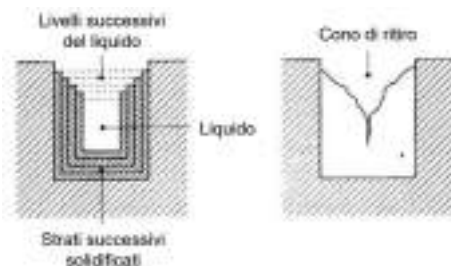
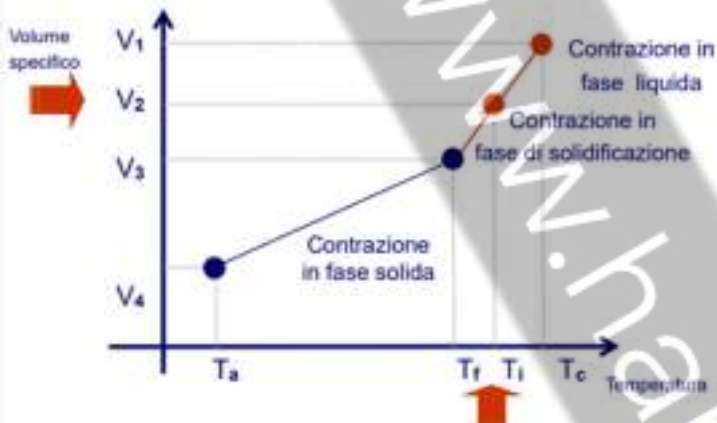
-> Procedura:

1. Data la dimensione nominale calcolo il valore del sovrametallo (solitamente viene sottratto alla dimensione nominale);
2. Calcolo, rispetto alla quota dalla quale abbiamo sottratto il sovrametallo, il valore dopo il ritiro;

Es: $D_m = D_f - 2s)(1 + r\%)$; dove D_f è il valore nominale e $r\%$ il valore percentuale di ritiro;

SOLIDIFICAZIONE DEL GETTO:

Il fenomeno del ritiro



ELEMENTI:

-> **CONO di RITIRO:** effetto per il quale il materiale, solidificando dalle pareti verso l'interno crea una cavità imperfetta.

-> Non potendo evitare questo fenomeno bisogna creare un'appendice aggiuntiva che poi verrà eliminata: la **MATEROZZA!**

-> **TEMPO di SOLIDIFICAZIONE:** $T_{TS} = C_m \left(\frac{V}{A}\right) \sim C_m \left(\frac{V^2}{A}\right)$ ricavato grazie alla regola di Chvorinov;

-> 2 perché dato approssimativamente;

-> Regola di Chvorinov: questo osservò che nel caso di piastre, il tempo di solidificazione era proporzionale al quadrato del modulo termico:

$$x = k * \sqrt{T} \Rightarrow T_{TS} = \frac{1}{k^2} * \left(\frac{V}{A}\right)^2 = \frac{1}{K^2} * M^2;$$

⚡ A parità di volume, maggiore è il modulo termico, maggiore è il tempo di solidificazione.

-> **MODULO TERMICO:**

DEF: il modulo termico (M) di un oggetto è pari al rapporto tra il suo volume e le sue superfici di scambio termico: $M = \frac{V}{A}$;

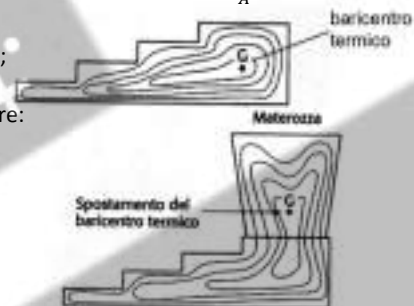
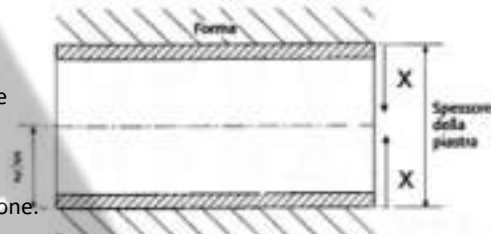
⚡ A parità di volume la sfera ha il modulo termico maggiore (più efficiente);

⚡ Dipende solamente dalla geometria dell'oggetto; è proporzionale al tempo di solidificazione;

- Direzione di solidificazione:

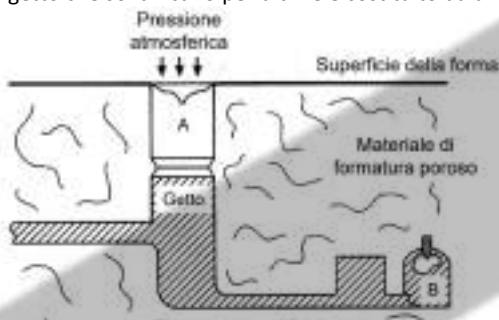
Quando il getto ha una forma complessa per comprendere come evolve la solidificazione occorre:

1. Scomporre il pezzo in geometrie elementari;
2. Calcolare per ogni parte il modulo corrispondente;
 - ⚡ La solidificazione avviene dal modulo termico più piccolo a quello più grande.
3. Verificare se esiste una direzionalità nella solidificazione.



-> **SISTEMA di ALIMENTAZIONE o MATEROZZA:**

- **DEF:** posto in prossimità delle zone del getto che solidificano per ultime è costituito da una o più materozze;



3.3) Fonderia:

-> Raggio di influenza del sistema di alimentazione:

Il sistema deve essere progettato in modo da evitare la formazione di porosità interdendritica nel getto;

PROCEDURA:

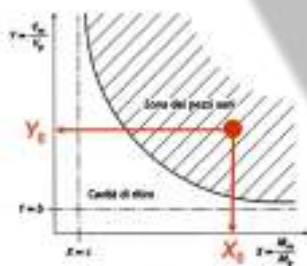
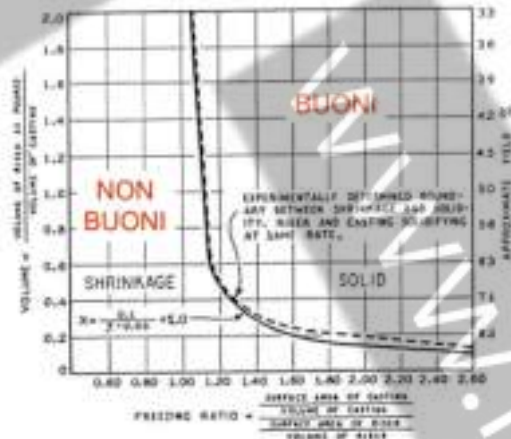
1. Suddividere il getto in FORME ELEMENTARI e calcolare i MODULI di raffreddamento;
2. Verificare la DIREZIONE di SOLIDIFICAZIONE e definire le zone che richiedono alimentazione;
3. Per ogni zona predisporre una materozza di opportuno modulo (utilizzando il metodo di Caine)
4. Verificare il raggio di influenza (numero delle materozze);



METODO DI CAINE:

-> DEF: permette di verificare se le dimensioni di una materozza consentono...

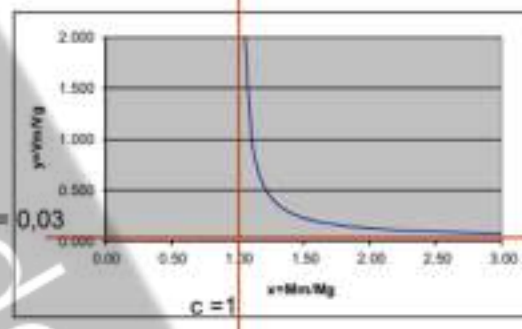
- Di rilasciare la "giusta quantità" di metallo al getto che va solidificando;
- Di rimanere liquida finché il getto è solidificato completamente;



-> Zona buona: $y \geq y_c = \frac{a}{x-c} + b$;

- $x = \frac{M_{materozza}}{M_{getto}}$: tempo di solidificazione relativo;
- $y = \frac{V_{materozza}}{V_{getto}}$: volume relativo;
- b: contrazione in fase L-S del metallo;
- c: velocità di raffreddamento relativa materozza-terra vs getto-terra;
- a: costante sperimentale (0.1 per acciai);

$$y = \frac{a}{x-c} + b$$



- Coefficiente di contrazione b: se la velocità di raffreddamento della materozza è infinitamente più piccola della velocità di raffreddamento del getto ($x \rightarrow \infty$) => il volume della materozza necessario a contrastare la contrazione del getto è pari alla contrazione del getto stesso, in formule:

$$se \ x = \frac{M_m}{M_g} \rightarrow \infty \Rightarrow y = \frac{V_m}{V_g} = b;$$

- Velocità di raffreddamento relativa c: se materozza e getto solidificano con la stessa velocità di raffreddamento (ovvero sono entrambi a contatto con la stessa terra) il volume della materozza necessario a contrastare la contrazione del getto tende all'infinito, in formule:

$$Se \ x = \frac{M_m}{M_g} = 1 \Rightarrow y = \frac{V_m}{V_g} \rightarrow \infty;$$

3.4) Fonderia:

SISTEMA di COLATA:

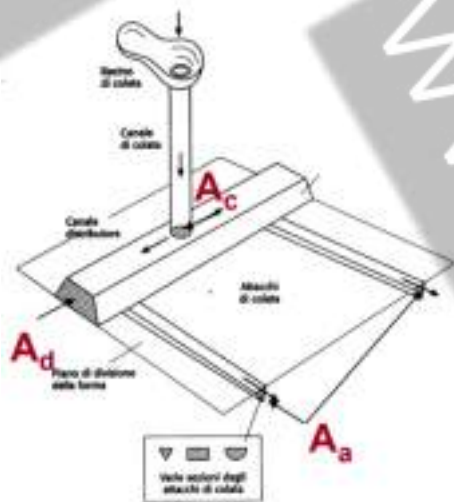
-> DEF: insieme di canalizzazioni che permettono alla lega liquida di riempire la forma;

-> Regole pratiche:

- Forma riempita rapidamente;
- Evitare forti velocità e turbolenze della corrente fluido;
- Evitare che la scoria penetri all'interno;
- Distribuire la vena fluida in modo contemporaneo nelle varie parti del getto;
- Controllare gradiente termico;

-> Elementi caratteristici:

- bacino di colata;
- Canale di colata: la sua area è definita da A_c ;
- Canale Distributore: la sua area è definita da A_d ;
- Attacchi di colata: la sua area complessiva è definita da A_a Δ ;
- Trappole, filtri, pozzetti;

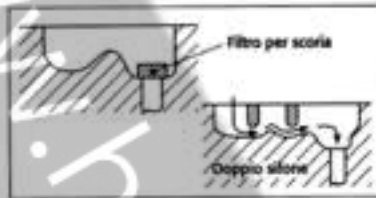


-> SISTEMA PRESSURIZZATO: assicura che differenti canali siano sempre pieni di metallo liquido.

-> Rapporto sezioni discendente: $A_c:A_d:A_a = 2:2:1$

-> SISTEMA NON PRESSURIZZATO: assicura una velocità ridotta ed un moto quasi laminare della vena fluida negli attacchi. Idoneo per leghe che si ossidano facilmente;

-> Rapporto sezioni crescente: $A_c:A_d:A_a = 1:2:4$;



DIMENSIONAMENTO:

-> hp:

- o Fluido incompressibile;
- o Forma con pareti impermeabili;
- o Massa che passa in ogni sezione nell'unità di tempo è costante: $Q = \text{costante}$;

-> DEF:

$$Q = A_s v = \frac{V}{T_{MF}} = \frac{P}{\gamma \cdot T_{MF}}$$

- Q = portata volumetrica ($\frac{m^3}{s}$);
- A_s = area (complessiva) della sezione di strozzatura (m^2);
- v : Velocità metallo nella sezione di strozzatura ($\frac{m}{s}$);
- V : volume del metallo da colare (m^3);
- P : peso del metallo da colare (kg_f);
- γ : peso specifico del metallo ($\frac{kg_f}{m^3}$);
- T_{MF} : tempo di riempimento (s)

-> Occorre determinare la sezione di strozzatura (sezione minima):

$$A_s = \begin{cases} A_c: \text{ sistema non pressurizzato} \\ A_a: \text{ sistema pressurizzato} \end{cases}$$

-> Per farlo utilizziamo il principio di Bernoulli:

i Primo principio della conservazione dell'energia: l'energia posseduta da un fluido nella sezione 1 deve essere la stessa (a meno di perdite di carico) dell'energia posseduta dal fluido nella sezione 2



$$h + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} = \text{costante};$$

$$E = E_{\text{potenziale}} + E_{\text{cinetica}} + \text{lavoro spostamento}$$

$$= mgh_1 + \frac{1}{2}mv^2 + \frac{P \cdot \Delta L \cdot L_1}{mg}$$

$$= h_1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{g} + \frac{PV}{mg}$$

$$\frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

$$= h_1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{g} + \frac{P}{\rho g} = \text{cost}$$

3.5) Fonderia:

=> SENZA considerare le PERDITE DI CARICO:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g}$$

$h_1 = H_m$: altezza massima del fluido dal riferimento
 $v_1 = 0$ (si considera il fluido fermo)
 $p_1 = p_2$: pressione atmosferica;
 $v_2 = v$: velocità nella sezione di strozzatura;
 $h_2 = 0$: altezza di riferimento;
 $g = 9,8 \left(\frac{m}{s^2}\right)$

=> Velocità SEZIONE STROZZATURA: $v = \sqrt{2gH_m}$;

=> CON PERDITE DI CARICO:

=> Velocità sezione strozzatura $v = c\sqrt{2gH_m}$;

-> c: coefficiente di perdita di carico: $0 < c < 1$;

- Sistema pressurizzato: vengono considerate tutte le perdite di carico dal bacino di colata sino alla sezione degli attacchi => $c \in [0,5; 0,65]$;
- Sistema non pressurizzato: vengono considerate le perdite di carico dal bacino di colata al piede del canale di colata e risulta: $c \cong 0,9$;

-> Velocità MASSIMA:

La velocità massima raggiunta dal metallo liquido si ha all'inizio del riempimento delle cavità: $v_{max} = c\sqrt{2g h_i}$;

⚠⚠⚠ In ogni caso $v < 1m/s$; ⚠⚠⚠

-> Tipologie di sistemi di colata:

- Colata DIRETTA:



$$H_m = h$$

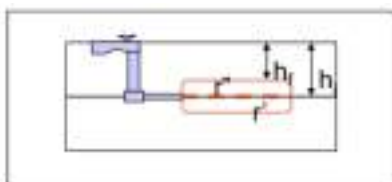
- Colata IN SORGENTE:



$$H_m = \left(\frac{\sqrt{h_f} + \sqrt{h_i}}{2} \right)^2$$

🔍 La formula considera l'effetto della contropressione, generata dal metallo liquido che sta riempiendo la forma, sulla velocità di riempimento.

- Colata IN PIANO:



$$\sqrt{H_m} = \frac{l}{\left(\frac{r'}{\sqrt{h_i}} + \frac{r''}{\sqrt{h_m}} \right)}$$

🔍 La formula deriva dal fatto che inizialmente, finché non si completa il riempimento dalla porzione r' del getto al di sotto del piano di separazione, la velocità sarà calcolata con h_i ; successivamente si avrà contropressione e la velocità media di riempimento della

porzione r'' del getto al di sopra del piano sarà calcolata con: $h_m = \left(\frac{\sqrt{h_f} + \sqrt{h_i}}{2} \right)^2$

🔍 H_m : altezza media di colata;

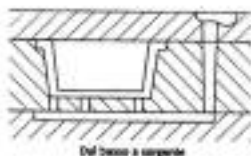
-> Esempi di sistemi di colata:



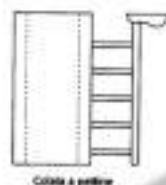
Colata dall'alto a pioggia



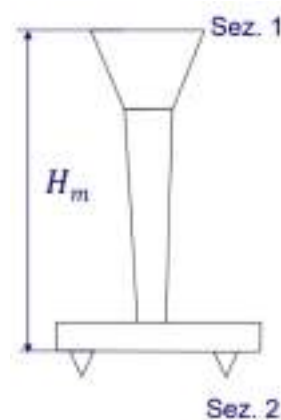
Dal basso a stella



Dal basso a sorgente



Colata a pettine



3.6) Fonderia:

DIFETTI: 

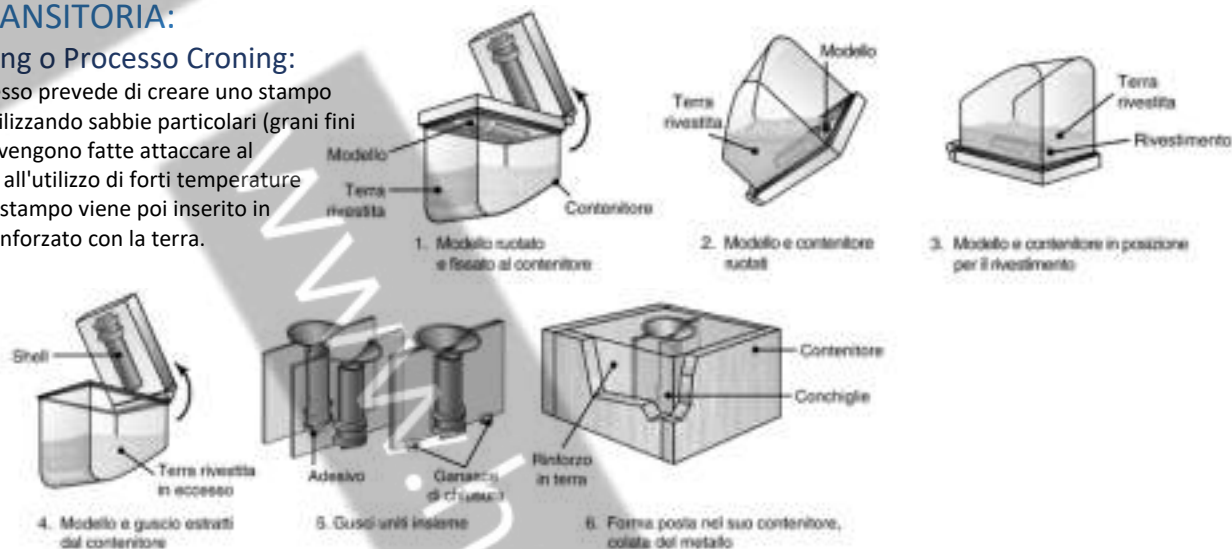
PROCESSI DI FABBRICAZIONE PER FUSIONE:

- Forma TRANSITORIA:
 - o Formatura in terra;
 - o Formatura shell moulding;
 - o Microfusione;
- Forma PERMANENTE:
 - o Conchiglia in gravità;
 - o Conchiglia sotto pressione a camera calda/fredda;

Forma TRANSITORIA:

Shell Molding o Processo Croning:

-> **DEF:** il processo prevede di creare uno stampo (transitorio) utilizzando sabbie particolari (grani fini e rotondi) che vengono fatte attaccare al modello grazie all'utilizzo di forti temperature e pressioni. Lo stampo viene poi inserito in delle staffe e rinforzato con la terra.



-> **Caratteristiche:** il guscio presenta un maggior isolamento termico rispetto alla forma in terra ed è costituito da: sabbia di quarzo a grani tondi pre-rivestita o resina termoidurente (es. fenolica);

- Vantaggi:
 - o Buone tolleranze e finitura;
 - o Spessori sottili (min 1,5 :2,5 mm);
 - o Impiegato anche per la fabbricazione delle Anime;
 - o Applicazioni in medie e grandi serie.
- Limitazioni:
 - o Getti di limitate dimensioni (<20kg)

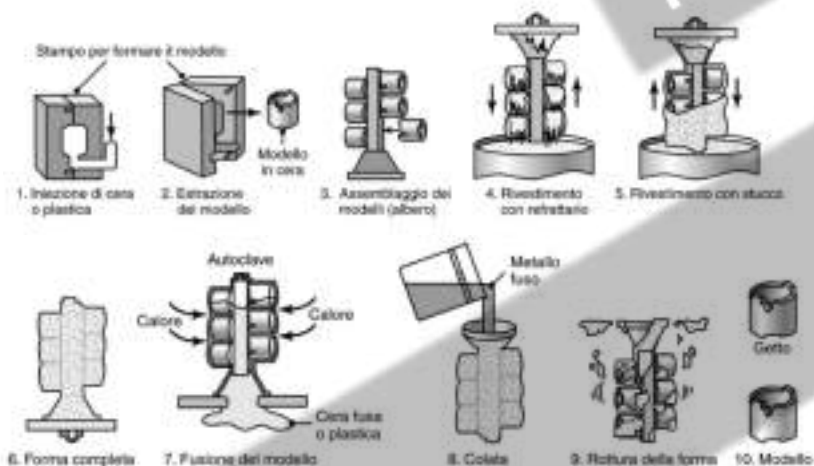
Microfusione:

-> **DEF:** Prima di tutto si crea un modello in cera che viene assemblato all'albero. Dopo di che si riveste l'albero con un rivestimento refrattario e infine con lo stucco. Una volta solidificato si fa fuoriuscire la cera scaldando il modello e si inserisce il metallo fuso. Lasciato raffreddare e rotta la forma si otterranno i getti.

-> Il processo è detto *Investment Casting*.

-> Caratteristiche:

- Modello transitorio
- Adatto per pezzi molto complessi e di piccola dimensione (dim. max 350 ÷400 mm, 5 kg)
- Si ottengono buone finiture superficiali (R a 2 ÷2.5 mm) e tolleranze contenute
- Adatto per piccola e media serie, per gli elevati costi del materiale e delle attrezzature.



3.7) Fonderia:

-> Caratteristiche:

- Modello transitorio;
- Oggetti complessi non grandi;
- Buone tolleranze e finiture superficiali;
- Riempimento continuo;
- Adatto per piccole/ medie serie;
- Investimento: macchinario.

-> Si presta a geometrie complicate (modelli a grappolo);

-> Il modello viene fatto liquefare;

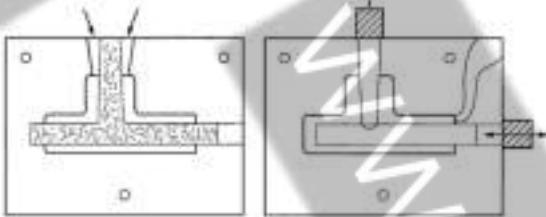
Forma PERMANENTE:

-> **DEF:** la forma è ottenuta all'interno di stampi in metallo che possono essere utilizzati più e più volte;

-> La colata può avvenire per semplice immissione del metallo liquido nella forma o tramite spinta del metallo stesso nella forma.

Colata per gravità:

-> **DEF:** la colata avviene per semplice immissione del metallo liquido nella forma;



Colata sotto pressione:

-> **DEF:** la colata avviene tramite spinta del metallo stesso nella forma.

-> Caratteristiche:

- Produzioni in grandi serie: costa molto fare la conchiglia;
- Raffreddamento più rapido;
- Pezzi complessi;
- Ottime finiture superficiali;
- Getti con elevate caratteristiche meccaniche.

INETTOFUSIONE:

-> Camera di pressione calda;

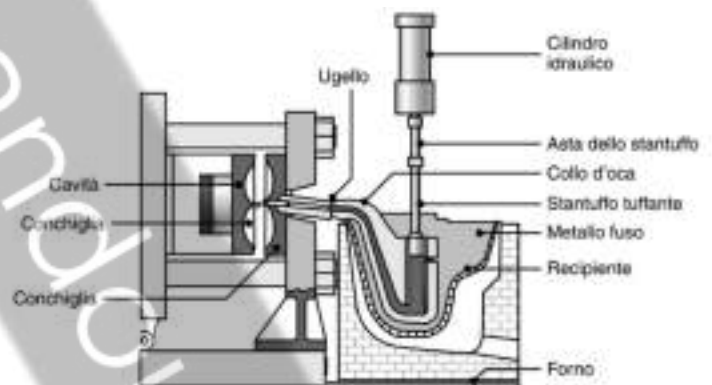
-> Materiali (leghe):

- Piombo/stagno: 250-300 °C;
- Zinco 500-600°C;
- Magnesio: 600-700°C;

-> Compressione:

- Gas in pressione: 2-6 Mpa;
- Pistone tuffante: 4-15 Mpa;

-> Produttività: 1000 pezzi/ora



PRESSOFUSIONE:

-> Camera di pressione fredda;

-> Materiali (leghe):

- Alluminio: 650-700 °C
- Magnesio: 600-700 °C
- Rame: 1000-1100°C;

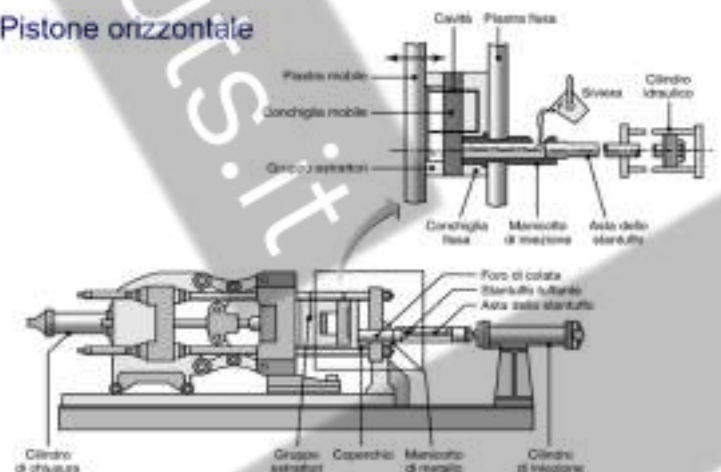
-> Compressione: cilindro-stantuffo 150 Mpa;

-> Produttività: 20-200 pezzi/ora

-> A pistone verticale ci sono tre fasi:

1. Riempimento;
2. Iniezione;
3. Estrazione.

Pistone orizzontale

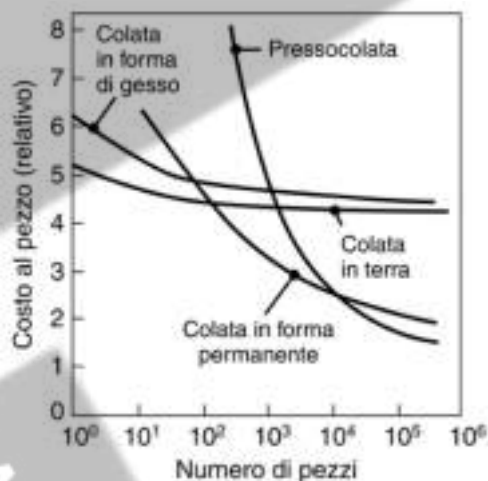


Proprietà delle leghe

- Eccellente fluidità (colabilità) che permettono di riempire tutte le cavità/impronte.
- Permettono di ottenere filettature grezze di fonderia su piccoli diametri.
- Deboli calori specifici, breve intervallo di solidificazione permettono ritmi di produzione elevati (necessarie macchine performanti);

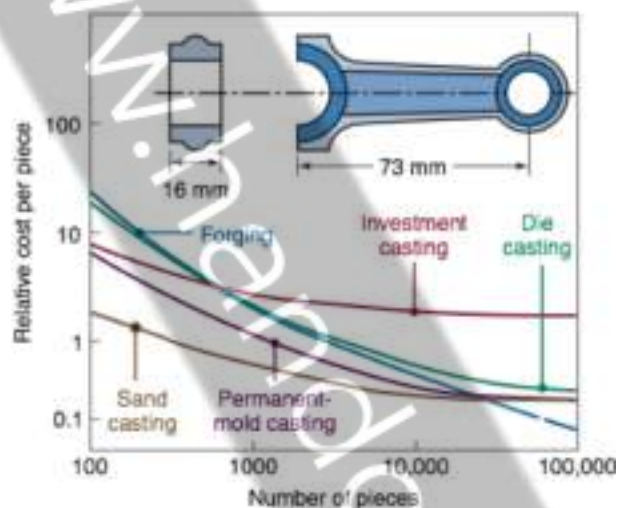
3.8) Fonderia:

CONFRONTO ECONOMICO:



Confronto stampaggio e fonderia:

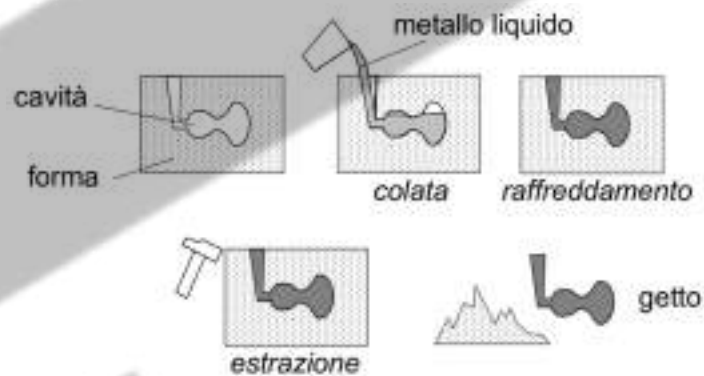
- Entrambi i processi richiedono una forma chiusa;
- Processo fusorio genera grezzi complessi ma con minori caratteristiche meccaniche;
- Processo stampaggio: controllo accurato della struttura microscopica del grezzo.



Processo	Vantaggi	Svantaggi
Colata in terra	Quasi tutti i metalli possono essere colati; nessun limite di dimensione, forma o peso; bassi costi delle forme.	Richieste alcune operazioni di finitura; finitura abbastanza grossolana; tolleranze ampie.
Colata in guscio	Buona accuratezza dimensionale e finitura superficiale; elevata produttività.	Dimensioni del pezzo limitate; richiesti modelli e attrezzature costosi.
Modello a perdere	La maggior parte dei metalli possono essere colati senza limitazioni in dimensioni; forme complesse.	I modelli hanno bassa resistenza meccanica e possono essere costosi quando in numero limitato.
Forma in gesso	Forme complesse; buona accuratezza dimensionale e finitura superficiale; bassa porosità.	Limitato a metalli non ferrosi; dimensioni e volumi produttivi limitati; tempo per realizzare la forma abbastanza lungo.
Forma in ceramico	Forme complesse; tolleranza strette; buona finitura superficiale.	Dimensioni del pezzo limitate.
Cera pesa	Forme complesse; eccellente finitura superficiale ed accuratezza dimensionale; quasi tutti i metalli possono essere colati.	Dimensioni del pezzo limitate; modelli, forme e manodopera dai costi elevati.
Forma permanente	Buona finitura superficiale e accuratezza dimensionale; bassa porosità; elevata produttività.	Elevati costi delle forme; forme dalla complessità limitata; non adatto per metalli a elevato punto di fusione.
Pressocolata	Eccellente finitura superficiale e accuratezza dimensionale; elevata produttività.	Elevati costi delle forme; forme dalla complessità limitata; generalmente limitato a metalli non ferrosi; lunghi tempi di attraversamento.
Colata centrifuga	Grandi componenti cilindrici di buona qualità; elevata produttività.	Attrezzature costose; forme dalla complessità limitata.

3.9) Fonderia > Definizioni:

DEFINIZIONI INIZIALI:



GETTO: tutto il materiale che riempie le cavità; per noi getto sarà sinonimo di grezzo.

ANIMA: parte interna all'oggetto;

PORTATA D'ANIMA: parte dell'anima che non è all'interno dell'oggetto ma alloggia nello stampo.

SFORMATURA: estrazione del modello dalla forma appena costruita.

ANGOLI DI SFORMO: sono angoli che favoriscono la sfornatura, costituiti al fine di eliminare superfici perpendicolari al piano di divisione;

STAFFA: contenitore all'interno del quale metto la forma.

SISTEMA DI ALIMENTAZIONE (materozza): zona nella quale si vuole che si trovi il baricentro termico, costituita da una o più materozze;

SISTEMA DI COLATA: insieme di canalizzazioni che permettono alla lega liquido di riempire la forma;

BARICENTRO TERMICO: punto che si raffredda per ultimo;

MATEROZZA: appendice del getto nella quale si vuole che si formi il cono di ritiro che verrà poi eliminata;

MATEROZZA CIECA: materozza che si trova all'interno dello stampo, porta a uno svantaggio alimentazione. Utilizzano un tassello di grafite per spingere il getto all'interno della cavità;

MATEROZZA COIBENTATA: coperte da un materiale per mantenere il calore.

RAGGIO DI INFLUENZA: raggio in cui le materozze riescono a intervenire.

ALTEZZA MEDIA DI COLATA: Hm;

PIANO DI SEPARAZIONE DELLE STAFFE: piano per il quale le staffe vengono separate.

FLANGIA: Nelle costruzioni meccaniche, elemento di giunzione per tubi e alberi di trasmissione, consistente in una corona circolare, generalmente d'acciaio, fissata, mediante saldatura o fucinatura, all'estremità dell'elemento e provvista di una serie di fori equidistanti per infilarvi i bulloni di serraggio; *giunto a flangia*, costituito da due flange accoppiate mediante bulloni.

4.1) Asportazione:

ASPORTAZIONE:

-> **DEF:** asportare materiale da un pezzo grezzo per portarlo ad avere la geometria desiderata.

-> In genere sono le ultime lavorazioni eseguite su componenti meccanici.

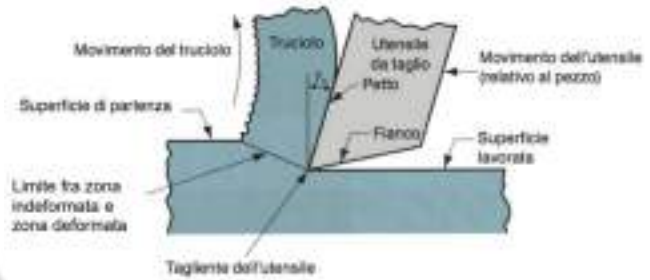
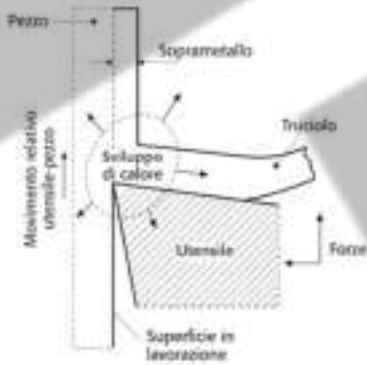
-> Consentono di ottenere una buona accuratezza a livello:

- Macro-geometrico (tolleranze geometriche e dimensionali);
- Micro-geometrico (finitura superficiale / rugosità)

-> **COME:** in generale durante una lavorazione per asportazione:

- Viene generato un moto relativo tra utensile e pezzo;
- L'utensile sollecita profondamente il materiale che trova davanti a sé;
- Il soprametallo (o sovrametallo) si deforma plasticamente, si separa dal pezzo e si trasforma in truciolo;
- Il truciolo fuoriesce sull'utensile e si allontana dalla zona di lavorazione.

Processo di taglio




-> Analizzeremo due tipi di lavorazioni:

- Taglio "ortogonale": processo semplice;
- Lavorazioni industriali: processi complessi;
 - o Tornitura;
 - o Foratura/fresatura (cenni);

TAGLIO ORTOGONALE:

-> **DEF:** si definisce taglio ortogonale il caso di asportazione in cui le **grandezze** cinematiche e dinamiche **appartengono ad un piano**.

->  hp: se valide => si può studiare il processo in un piano (sezione HKLM)

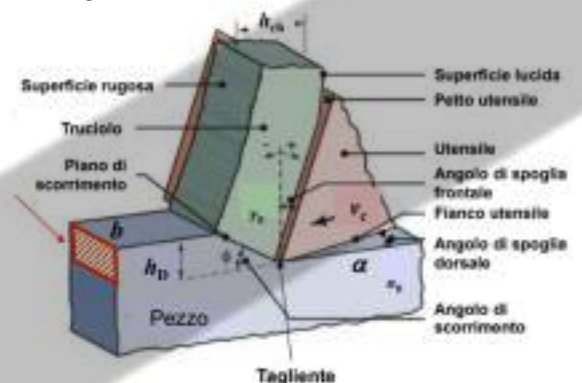
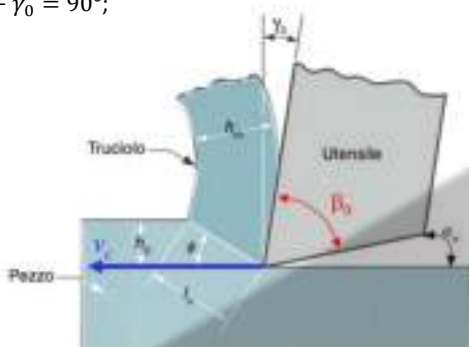
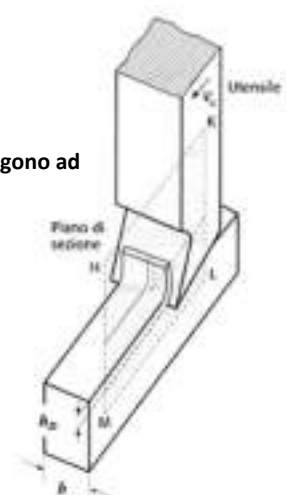
- Tagliente rettilineo ed ortogonale alla direzione di taglio (velocità di taglio v_c);
- Utensile più largo del pezzo (truciolo non vincolato lateralmente);
- Spessore di taglio (h_D) << larghezza di taglio (b).

-> Caratteristiche:

- Poco utilizzato nella realtà industriale;
- Consente di capire il **meccanismo elementare** della formazione del truciolo;
- È semplice da descrivere dal punto di vista **cinematico** (moti) e **dinamico** (forze);
- È alla **base delle lavorazioni industriali** (ritroviamo molte grandezze).

Grandezze principali:

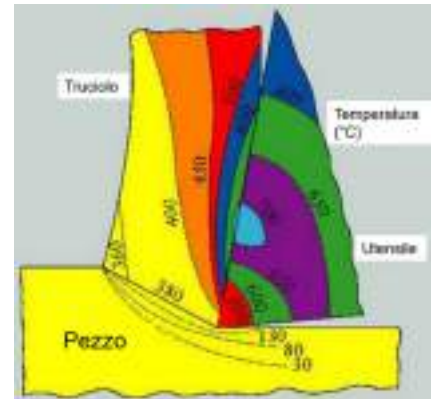
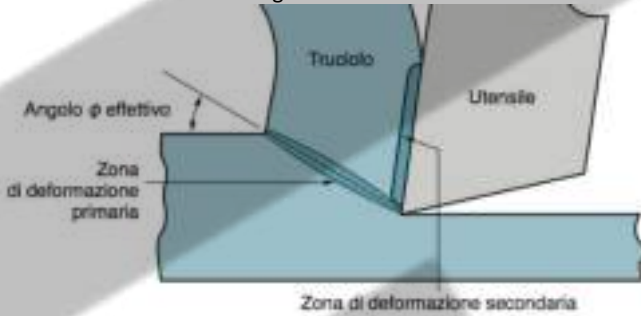
- **SPESSORE DI TAGLIO, h_D** : spessore che stiamo rimuovendo.
- **SPESSORE DI TRUCIOLO, h_{ch}** : spessore del truciolo tagliato, sempre maggiore dello spessore di taglio..
- **FATTORE DI RICALCIMENTO, r** : $r = \frac{h_D}{h_{ch}}$, sempre minore di uno.
- **SEZIONE DEL TRUCIOLO A_D** : $A_D = b * h_D$ area della sezione del truciolo (nella zona indeformata).
- **LARGHEZZA DI TAGLIO: b** ;
- **VELOCITÀ DI TAGLIO: v_c** ;
- **ANGOLO DI SPOGLIA FRONTALE, $15^\circ < \gamma_0 < 30^\circ$** : tra petto e normale alla velocità di taglio.
- **ANGOLO DI SPOGLIA DORSALE, $2^\circ < \alpha_0 < 15^\circ$** : tra dorso e direzione della velocità di taglio;
- **ANGOLO DI SCORRIMENTO: ϕ** ;
- **ANGOLO SOLIDO, β_0** ;
-> $\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0 = 90^\circ$;



4.2) Asportazione:

-> Trasformazione del sovrametallo in truciolo:

- L'utensile sollecita il materiale davanti a sé finché quest'ultimo si deforma plasticamente.
- Con buona approssimazione si può ritenere che la zona dove il materiale si deforma sia un piano detto piano di scorrimento;
- La deformazione si spinge fino alla rottura e conseguente separazione tra sovrametallo e pezzo;
- Il sovrametallo da origine al truciolo che scorre sull'utensile.



MECCANISMO DI ASPORTAZIONE:

-> **Agevolazione rottura truciolo:** attraverso dispositivi rompi-truciolo

- *Piastrina:* Agevoliamo la rottura del truciolo pendendo sul petto dell'utensile una piastrina rompi truciolo.
- *Gole/tasche:* agevolano un'angolo di rottura nel truciolo.

FORZE:

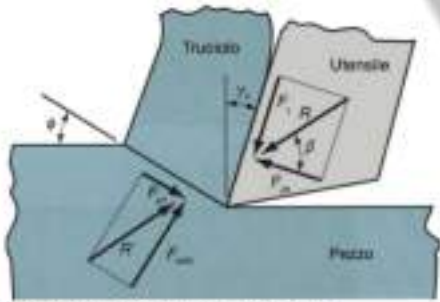
-> Utili da conoscere per:

- o Dimensionare azionamenti e organi di trasmissione;
- o Progettare la struttura e componenti meccanici della MU;
- o Proporzionare correttamente gli utensili.

-> Sono dovute allo stato di sollecitazione all'interfaccia utensile-pezzo dovuto:

- o Azione di compressione esercitata dall'utensile;
- o Adesione del truciolo sul petto;
- o Moto relativo con attrito tra truciolo e petto.

-> La risultante delle forze può essere scomposta in modi diversi:



Forza sul piano di scorrimento: F_{sh}
 Forza normale al piano di scorrimento: F_{shN}
 Forza tangente al petto dell'utensile: F_y
 Forza normale al petto dell'utensile: F_{yN}



Forza di taglio: F_c
 Forza di reazione: F_{Db}
 Coefficiente d'attrito fra utensile e truciolo:

$$\mu = \tan \beta = \frac{F_y}{F_{yN}}$$

Cerchio di Merchant:

-> **DEF:** permette di sfruttare appieno tutte le tre componenti

-> Scomposizione petto dell'utensile: ζ

$$F_y = R \sin \beta$$

$$F_{yN} = R \cos \beta$$

-> Scomposizione piano di scorrimento: ω

$$F_c = R \cos(\beta - \gamma_0)$$

$$F_D = R \sin(\beta - \gamma_0)$$

-> Scomposizione lungo orizzontale e verticale: ν

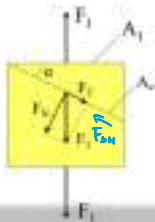
$$F_{sh} = R \cos(\phi + \beta - \gamma_0)$$

$$F_{shN} = R \sin(\phi + \beta - \gamma_0)$$

Coefficiente d'attrito fra utensile e truciolo: $\mu = \tan \beta = \frac{F_y}{F_{yN}}$

Tensione tangenziale media sul piano di scorrimento:

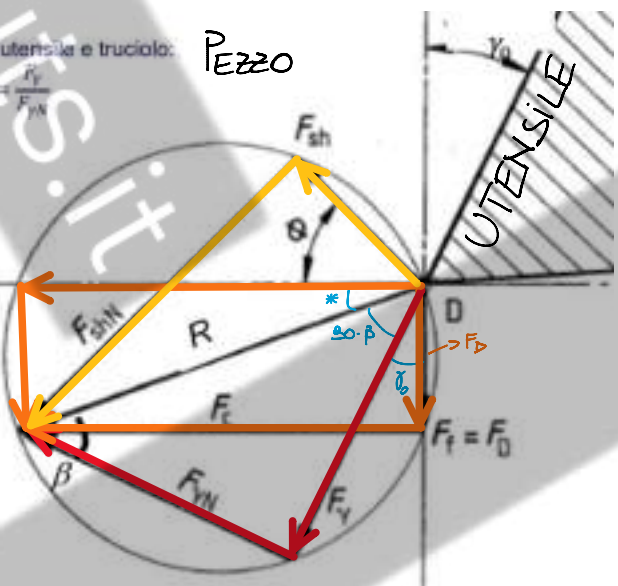
-> Definiamo la pressione (tensione) come rapporto tra forza e area:



$$\tau_{sh} = \frac{F_{sh}}{\Delta s_{sh}} = \frac{R \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}{\frac{\Delta D \sin \phi}}{F_c \frac{\cos(\phi + \beta - \gamma_0)}{\cos(\beta - \gamma_0)} \frac{\Delta D}{\sin \phi}}$$

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

* RICAVATA DA PRIMA



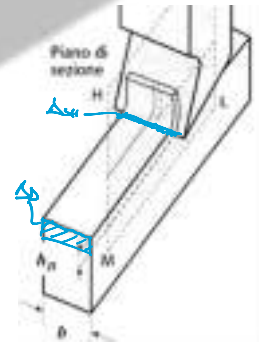
Utilizziamo il criterio di Tresca per esser sicuri di essere in campo plastico.

4.3) Asportazione:

$$F_c = \frac{\tau_{sh} \sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}{\Delta_D \cos(\beta - \gamma_0)}$$

$\Delta_D = b \cdot h_D$
 $\Delta_{SH} \sin(\phi) = \Delta_D$
 $\Delta_{SH} = \frac{\Delta_D}{\sin(\phi)}$

$$\Rightarrow F_c = \frac{\tau_{sh} - \Delta_D \cdot \cos(\beta - \gamma_0)}{\Delta_{SH} \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}$$



Modello di Ernst & Merchant:

-> **DEF:** modello utilizzato per la determinazione dell'angolo di scorrimento ϕ ;

-> **hp:**

- Tensione tangenziale media sul piano di scorrimento costante;
- Attrito costante;
- No tagliente di riporto.

-> L'angolo di scorrimento assume un valore che minimizza l'energia persa per il taglio W_c (OBJ: minimizzare l'energia di taglio);

-> Deriviamo l'energia di taglio rispetto l'angolo di scorrimento ϕ ;

⚠ Non va saputa la dimostrazione.

$$W_c = F_c \cdot L_c;$$

o L_c : lunghezza per cui viene applicato il taglio;

o $F_c = \frac{\tau_{sh} A_D \cos(\beta - \gamma_0)}{\sin(\phi) \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}$: Forza di taglio, calcolata precedentemente grazie al cerchio di Merchant;

$$\frac{\partial W_c}{\partial \phi} = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial \phi} \left[\frac{\tau_{sh} A_D \cos(\beta - \gamma_0)}{\sin(\phi) \cos(\phi + \beta - \gamma_0)} * L_c \right] = 0 \Rightarrow \tau_{sh} A_D \cos(\beta - \gamma_0) * L_c * \frac{\partial}{\partial \phi} \left[\frac{1}{\sin(\phi) \cos(\phi + \beta - \gamma_0)} \right] = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial \phi} \left[\frac{1}{\sin(\phi) \cos(\phi + \beta - \gamma_0)} \right] = \frac{\cos \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0) - \sin \phi \sin(\phi + \beta - \gamma_0)}{[\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)]^2} = 0 \Rightarrow$$

$$\cos(\phi + \phi + \beta - \gamma_0) = 0 = \cos \frac{\pi}{2} \Rightarrow 2\phi + \beta - \gamma_0 = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \phi = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}(\gamma_0 - \beta);$$

*: derivata particolare.

-> Da cui ne segue che:

- Se $\gamma_0 \uparrow$ o $\beta \downarrow \Rightarrow \phi \uparrow \Rightarrow \tan \phi \uparrow$;
- Se $\tan \phi \uparrow \Rightarrow F_c \downarrow$;
- $\gamma_0 \uparrow \Rightarrow F_c \downarrow \Rightarrow$ truciolo meno spesso;
- $\gamma_0 \downarrow \Rightarrow F_c \uparrow \Rightarrow$ truciolo molto spesso;

POTENZA:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = F_c v_c + F_D v_D;$$

📍 Nel taglio ortogonale l'utensile non si deve muovere in direzione verticale $\Rightarrow v_D = 0$;

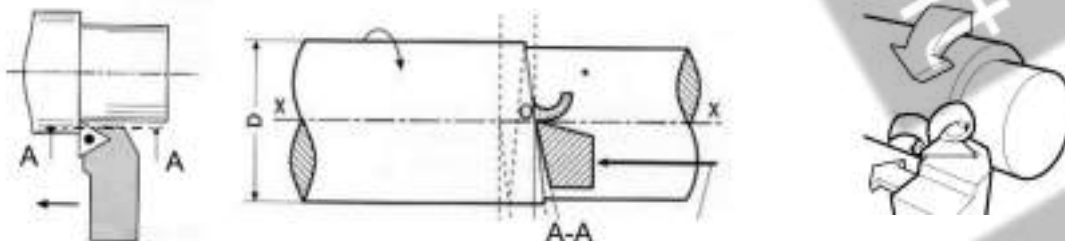
$$\Rightarrow P = P_c = F_c \cdot v_c;$$

🎯 Necessario verifica fattibilità della lavorazione: $P_c \leq P_t \cdot \eta$, dove

- P_t : potenza di targa (è la potenza della macchina);
- η : efficienza meccanica della macchina $\eta \in [0,75; 0,95]$;

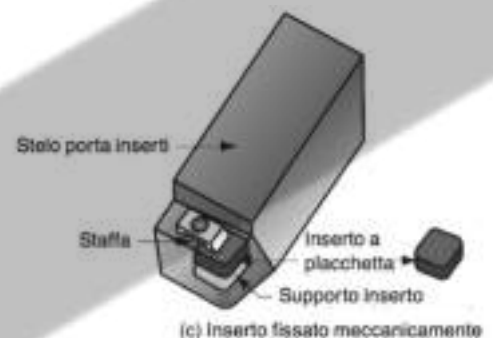
TORNITURA:

-> **DEF:** lavorazione per asportazione di materiale che consente di ottenere una vasta gamma di superfici assialsimmetriche mediante l'azione di un utensile monotagliente a geometria definita.



Componenti:

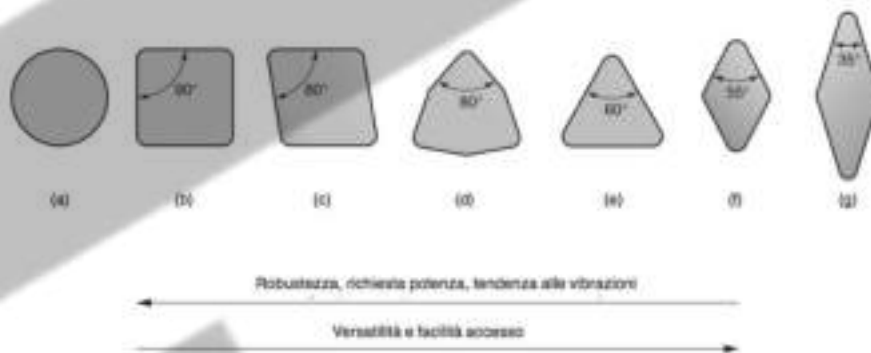
- Stelo: consente di vincolare l'utensile alla macchina;
- Testa di taglio: zona dove avviene la deformazione plastica del sovrametallo.



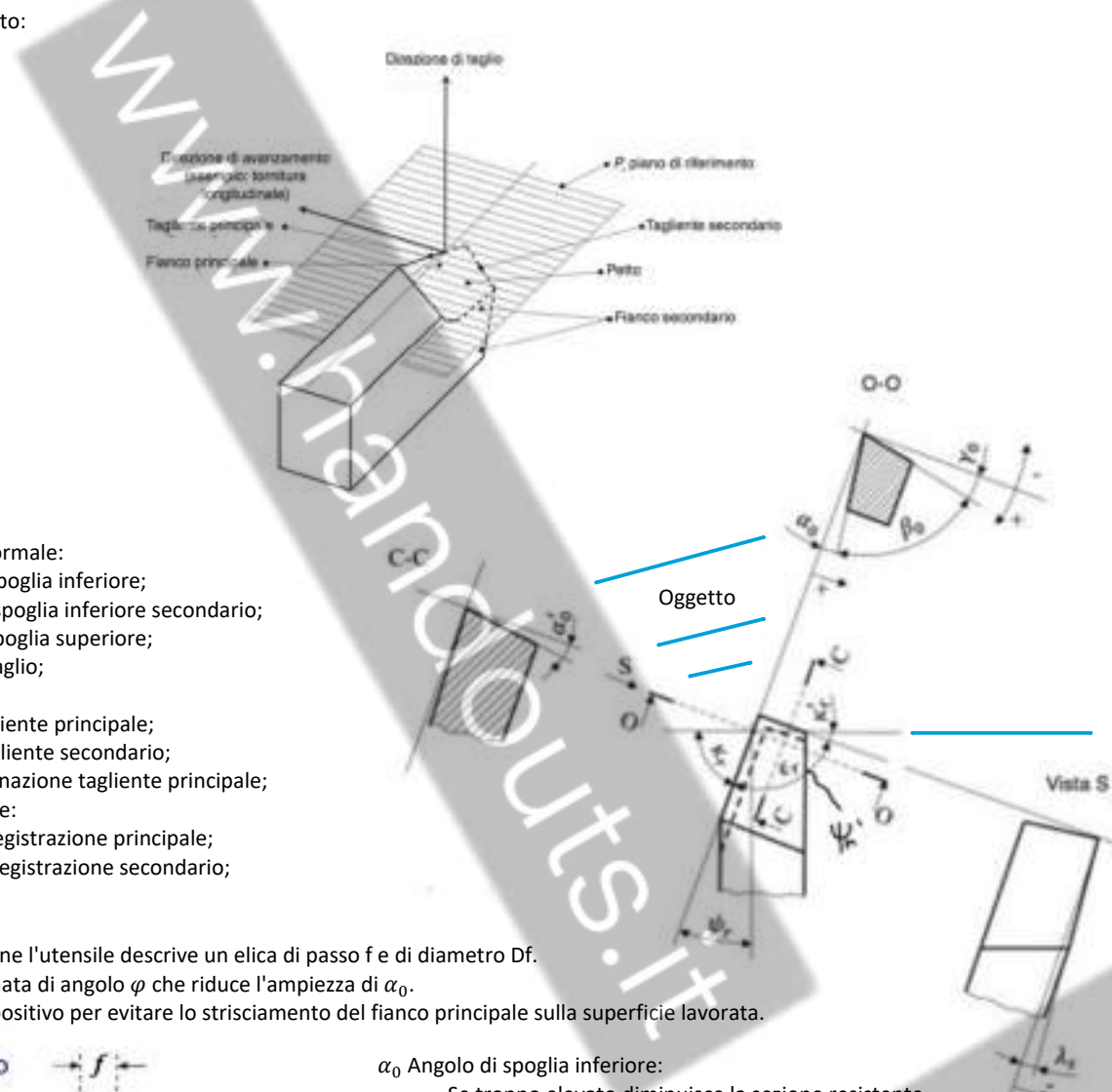
4.4) Asportazione:

Geometria degli utensili:

-> Inerti:



-> Sistema di riferimento:



Angoli:

Angoli della sezione normale:

- α_0 : Angolo di spoglia inferiore;
- α_0' : Angolo di spoglia inferiore secondario;
- γ_0 : Angolo di spoglia superiore;
- β_0 : Angolo di taglio;

Angoli del profilo:

- ψ_r : Angolo tagliente principale;
- ψ_r' : Angolo tagliente secondario;
- λ_s : Angolo inclinazione tagliente principale;

Angoli della lavorazione:

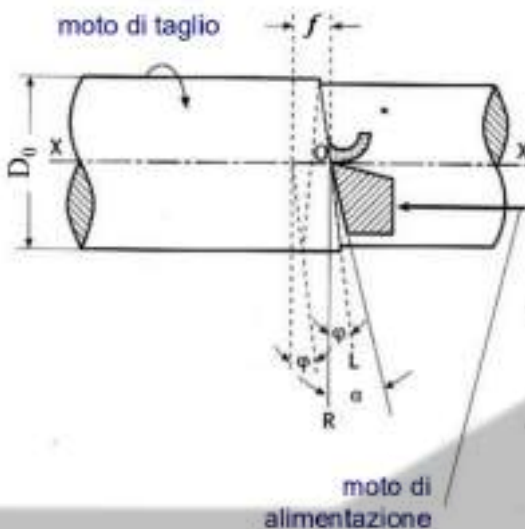
- κ_r : Angolo di registrazione principale;
- κ_r' : Angolo di registrazione secondario;

⚙️ Cosa avviene:

-> Durante la lavorazione l'utensile descrive un elica di passo f e di diametro D_f .

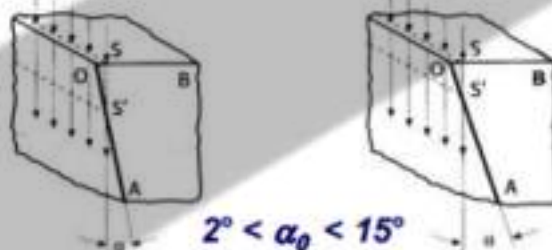
-> La traccia OL è inclinata di angolo φ che riduce l'ampiezza di α_0 .

-> $\alpha_0 - \varphi$ dev'essere positivo per evitare lo strisciamento del fianco principale sulla superficie lavorata.



α_0 Angolo di spoglia inferiore:

- Se troppo elevato diminuisce la sezione resistente.
- Angoli troppo bassi determinano un più veloce raggiungimento dell'usura dorsale;
- Dipende dal materiale da lavorare (maggiore è la pressione di taglio minore deve essere α_0);
- Dipende dal materiale dell'utensile (se poco tenace minori valori di α_0).




4.5) Asportazione:

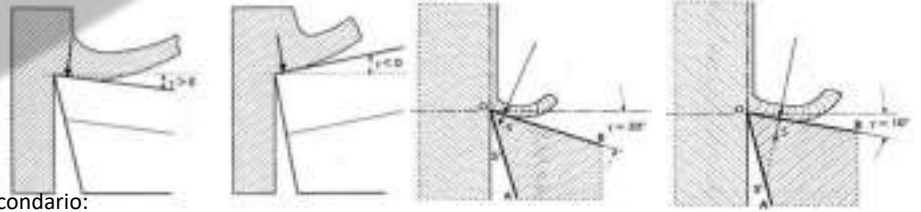
γ_0 Angolo di spoglia superiore:
Influisce sul meccanismo di formazione del truciolo.

-> Maggior γ_0 determina:

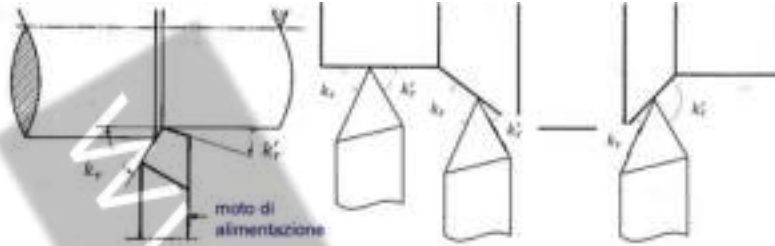
- Minor deformazioni;
- Minori pressione di taglio;
- Minori forze;
- Minore potenza assorbita;
- Minor attrito di scorrimento;
- Minor temperature di esercizio;
- Minor resistenza dello spigolo tagliente;
- Possibilità di aumentare i parametri di taglio.

 Angoli in lavorazione poco tenaci consentono angoli γ_0 maggiori; Materiali dell'utensile poco tenaci richiedono elevate sezioni resistenti, quindi γ_0 anche **NEGATIVO**.

-> γ_0 determina: aumento di forze, delle temperature e della potenza assorbita.



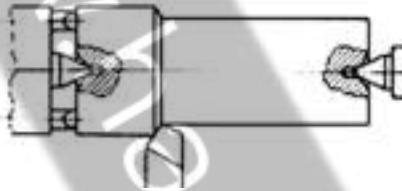
κ_r, κ'_r angoli di registrazione tagliente principale e secondario:



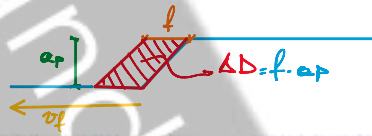
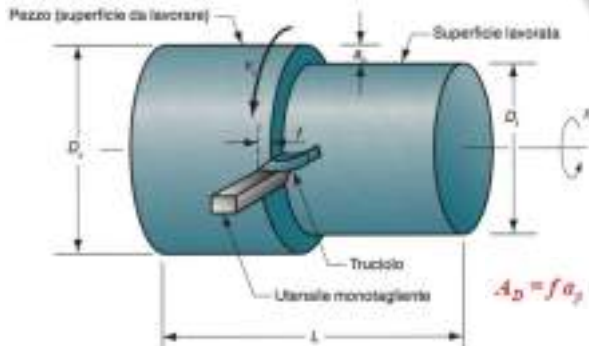
Attrezzatura di fissaggio:

-> DEF: attrezzatura necessaria per

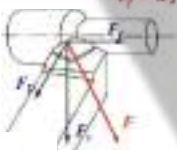
- Definire in maniera univoca la posizione del pezzo in lavorazione (riferimento);
- Bloccare il pezzo in lavorazione (bloccaggio) il pezzo non deve spostarsi sotto l'azione delle forze di lavorazione.



PARAMETRI di taglio:



- numero di giri n [rpm]
- velocità di taglio v_c [m/min]
 $v_c = \frac{\pi \cdot D_i \cdot n}{1000}$
- velocità di avanzamento v_f [mm/min]
 $v_f = n \cdot f$
- tempo di lavorazione [min]
 $T_m = \frac{L}{v_f}$
- tasso di asportazione di materiale Q [mm³/min]
 $Q = A_D \cdot v_c = f \cdot a_p \cdot v_c$



$$P = \vec{F} \times \vec{v} = F_c v_c + F_f v_f + F_D v_D$$

$$P = F_c v_c + F_f v_f = P_c + P_f$$

$$v_f \ll v_c \quad F_f < F_c$$

$$P = P_c = F_c v_c$$

- diametro iniziale D_i [mm]
- diametro finale D_f [mm]
- lunghezza lavorata L [mm]
- avanzamento f [mm/giro]
- profondità di passata $a_p = \frac{D_i - D_f}{2}$ [mm]
- sezione di truciolo A_D [mm²]
 $A_D = f \cdot a_p$

POTENZA:

Per definizione: $P = \vec{F} * \vec{v} = F_c v_c + F_f v_f + F_D v_D$;

-> Dato che $v_D = 0 \Rightarrow P = F_c v_c + F_f v_f = P_c + P_f$;

-> Inoltre $\Rightarrow v_f \ll v_c, F_f < F_c$;

$P = P_c = F_c * v_c$;

FORZA DI TAGLIO:

-> La dimostrazione deriva dalla pressione di taglio e dalla formula di Kronenberg;

-> Per definizione: $F_c = k_c * A_D$;

- F_c : forza di taglio;
- k_c : pressione di taglio;
- A_D : sezione del truciolo indeformato: $A_D = f * a_p = h_D * b$;

4.6) ✂️ Asportazione:

-> Per Kronenberg: $k_c = \frac{k_{cs}}{h_D^x \cdot b^y}$;

- k_{cs} : pressione di taglio specifica per asportare una sezione di truciolo di 1 mm^2 con $h_D = 1 \text{ mm}$ e $b = 1 \text{ mm}$;
- > Tipicamente con gli attuali materiali per utensili $y=0 \Rightarrow$

$$k_c = \frac{k_{cs}}{h_D^x} = k_{cs} \cdot h_D^{-x};$$

- k_{cs} : dipendente principalmente dal materiale da lavorare (in condizioni standard) $k_{cs} = k_{c0,4} \cdot 0,4^x$;
- X: costante dipendente principalmente dal materiale dell'utensile;
- > k_c diminuisce con legge esponenziale all'aumentare di h_D ;

✂️ Solitamente non si conoscono h_D e b ma l'avanzamento f e la profondità di passata a_p :

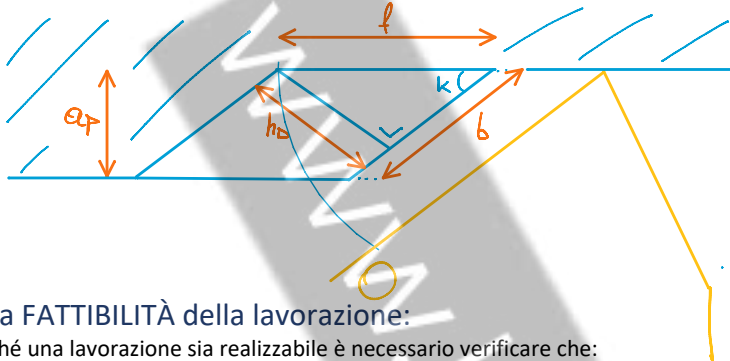
$$\Rightarrow h_D = f \cdot \sin k;$$

-> k: angolo di registrazione del tagliente principale;

$$\Rightarrow k_c = \frac{k_{cs}}{h_D^x} = \frac{k_{cs}}{f^x \sin^x(k)} = \frac{k_{cs}}{f^x} \cdot \left(\frac{1}{\sin(k)}\right)^x$$

$$\Rightarrow F_c = k_c \cdot A_D = k_c \cdot f \cdot a_p = k_{cs} \cdot f^{1-x} \cdot a_p \cdot \left(\frac{1}{\sin(k)}\right)^x$$

- $a_p = \frac{D_i - D_f}{2}$: profondità di passata;



Verifica FATTIBILITÀ della lavorazione:

-> Affinché una lavorazione sia realizzabile è necessario verificare che:

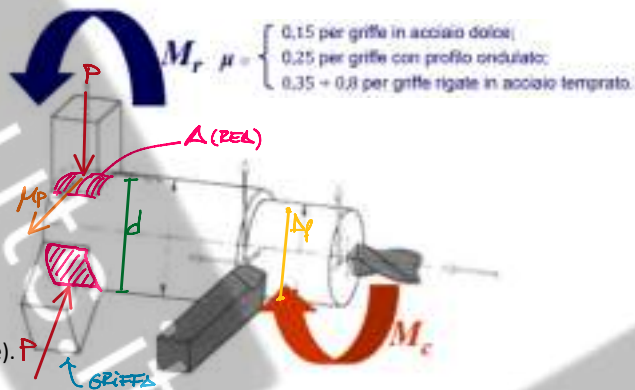
- a_p sia compatibile con l'utensile selezionato;
- f sia ammissibile per il tornio;
- v_c e quindi n selezionato sia compatibile con le caratteristiche del tornio;
- P_c necessaria alla lavorazione sia effettivamente erogabile;
- I parametri di taglio siano
 - compatibili con la finitura superficiale richiesta;
 - Compatibili con le tolleranze dimensionali e geometriche imposte;
- L'attrezzatura sia in grado di afferrare saldamente un pezzo in lavorazione.

Verifica AUTOCENTRANTE:

-> Verificare atterraggio tra pezzo e griffa: $M_r \geq M_c$

- Momento di taglio: $M_c = F_c \cdot \frac{D_f}{2}$;
- Momento resistente: $M_r = z \cdot \mu \cdot p \cdot A \cdot \frac{D_r}{2}$;
 - D_r : diametro nel punto di serraggio;
 - z : # griffe dell'autocentrante;
 - p : pressione di contatto griffa-pezzo;
 - A : area di contatto griffa-pezzo;
 - μ : coefficiente di attrito statico;

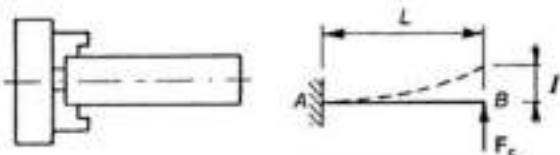
💡 Se i dispositivi dell'autocentrante sono di tipo meccanico allora la pressione di contatto p varia con la velocità di rotazione n : (se n aumenta $\Rightarrow p$ diminuisce).



Verifica INFLESSIONE pezzo:

-> Il pezzo, a seconda di come è fissato, tende a scappare dall'utensile.

- Caso 1: **A SBALZO**

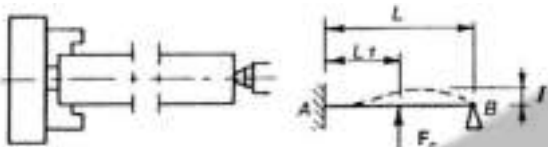


$$\Rightarrow I = \frac{1}{3} \cdot \frac{F_c \cdot L^3}{E \cdot J}$$

J momento di inerzia

✂️ L'inflessione I è massima quando la forza è applicata all'estremità libera.

- Caso 2: **AUTOCENTRANTE-CONTROPUNTA**

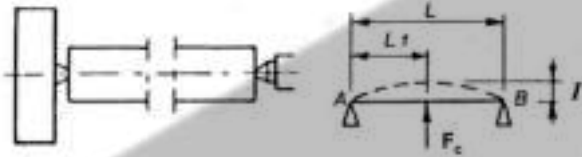


$$\Rightarrow I \approx \frac{1}{107} \cdot \frac{F_c \cdot L^3}{E \cdot J}$$

✂️ L'inflessione I è massima quando $L1 = 0,6L$ (circa).

4.7) Asportazione:

- Caso 3: TRA LE PUNTE (PUNTA-CONTROPUNTA)



$$I = \frac{1}{48} \cdot \frac{F_c \cdot L^3}{E \cdot J}$$

L'inflessione I è massima quando L1=L/2.

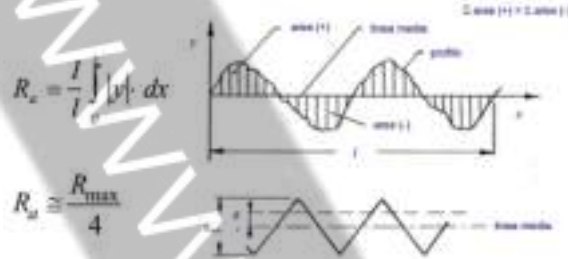
RUGOSITÀ:

-> Definizioni:

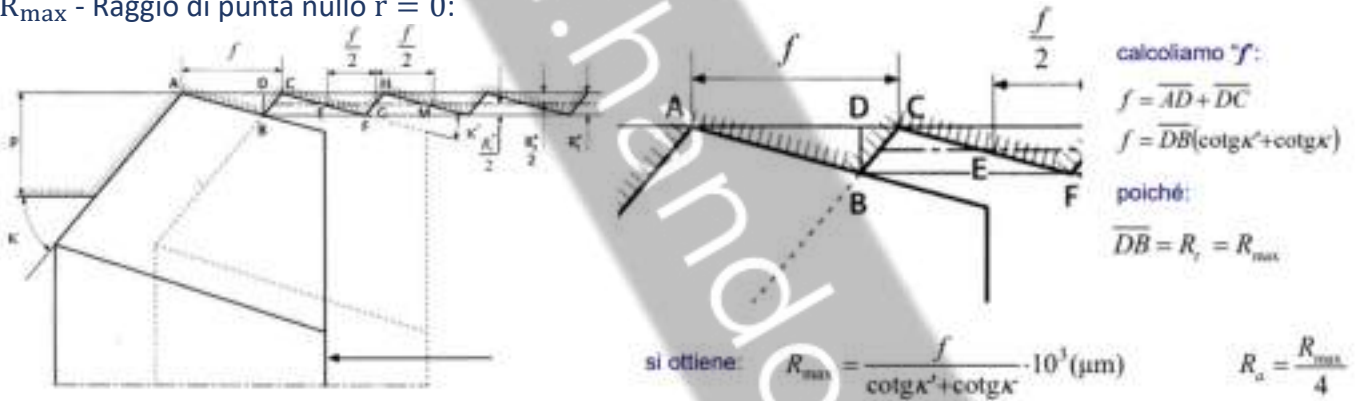
- RUGOSITÀ TEORICA: rugosità calcolabile teoricamente a partire dalle caratteristiche geometriche della lavorazione.
- RUGOSITÀ REALE: rugosità che, a causa di molteplici fattori, si ha effettivamente sul pezzo lavorato.

-> Parametri:

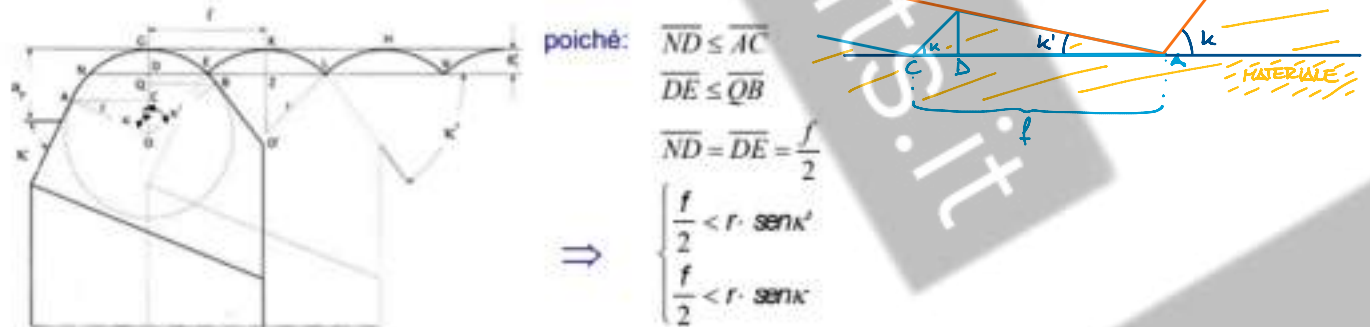
- R_{max} o R_t : "distanza massima fra creste predominanti e punti più profondi dei solchi";
- R_a : "media aritmetica (misurata in μm) dei valori assoluti delle deviazioni y del profilo reale della linea media"



R_{max} - Raggio di punta nullo $r = 0$:



R_{max} -Raggio di punta $r \neq 0$:



quindi si ottiene:

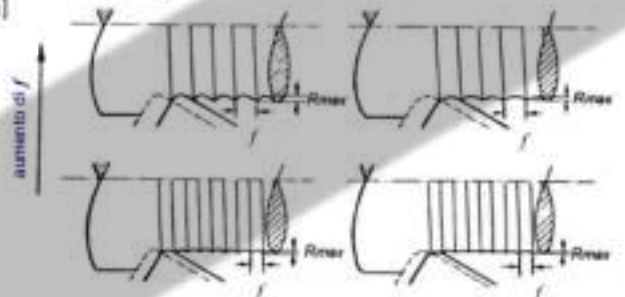
Formula approssimata di Schmalz

$$R_{max} = R_t = \overline{OG} - \overline{OD} = \overline{OG} - \sqrt{\overline{ON}^2 - \overline{ND}^2} = \left(r - \sqrt{r^2 - \frac{f^2}{4}} \right) 10^3 = \frac{f^2}{8 \cdot r} 10^3 [\mu m]$$

$$R_a = \frac{1000}{32} \frac{f^2}{r}$$

aumento di r

Influenza dell'avanzamento "f" e del raggio di punta "r" ->



4.8) ✂️ Asportazione:

UTENSILE, VITA UTENSILE E OTTIMIZZAZIONE (Fumero's back):

Modalità danneggiamento dell'utensile:

- Danneggiamento da frattura o scheggiatura: si verifica quando la forza di taglio diventa eccessiva.
- Deformazione plastica: si verifica quando la temperatura di taglio è troppo alta, fatto che origina una riduzione delle proprietà meccaniche del materiale dell'utensile.
- Usura graduale: si tratta sostanzialmente di un'usura progressiva che, modificando la geometria iniziale dell'utensile, compromette l'efficienza e la qualità del taglio.

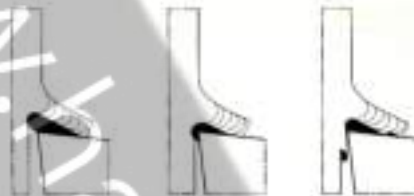
-> Scheggiatura e deformazione plastica determinano una messa fuori servizio prematura dell'utensile e, quindi, sono situazioni da evitare. L'usura graduale è quella meno critica perché permette l'uso prolungato dell'utensile con conseguenti vantaggi economici e produttivi.

Meccanismi d'usura:

- **ABRASIONE:** usura meccanica causata da particelle di elevata durezza incluse nel materiale lavorato che rimuovono piccole porzioni dell'utensile;
- **ADESIONE:** microsaldature tra materiale in lavorazione e materiale dell'utensile che staccandosi modificano la geometria dell'utensile (caso estremo: tagliante di riporto);
- **DIFFUSIONE:** migrazione di atomi tra materiale in lavorazione e materiale dell'utensile che riduce le proprietà meccaniche dell'utensile e lo rende più vulnerabile all'abrasione e all'adesione;
- **OSSIDAZIONE:** ossigeno atmosferico forma sull'utensile ossidi facilmente asportabili;
- **DEFORMAZIONE PLASTICA:** sollecitazioni meccaniche che modificano il bordo e lo rendono più vulnerabile alle altre cause di usura;
- **FATICA:** dovuta a cicli meccanici e termici.

TAGLIANTE DI RIPORTO:

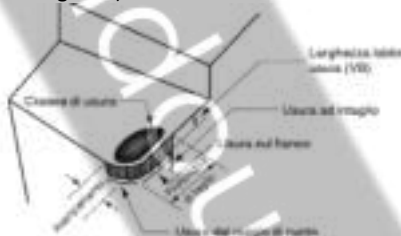
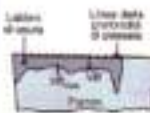
-> DEF: fenomeno per il quale del materiale da tagliare rimane tra tagliante e l'oggetto da tagliare.



Forme d'usura:

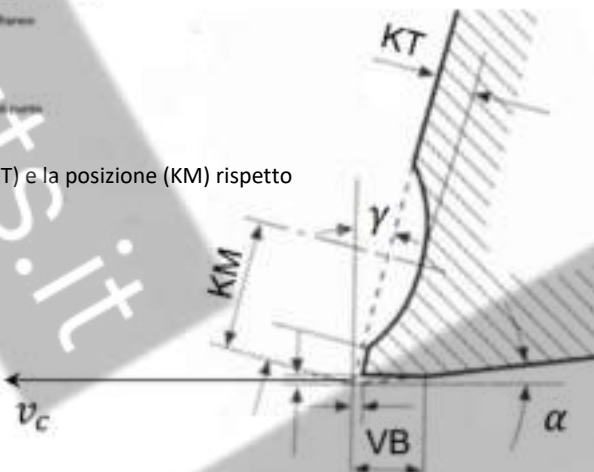
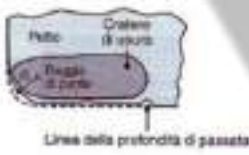
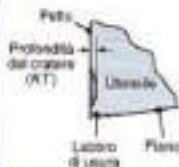
- Usura sul FIANCO (labbro di usura):

Sul fianco si genera una superficie di usura parallela alla direzione di taglio, si misura con la grandezza VB (valutata parallelamente alla direzione di taglio e a partire dallo spigolo tagliante originale).



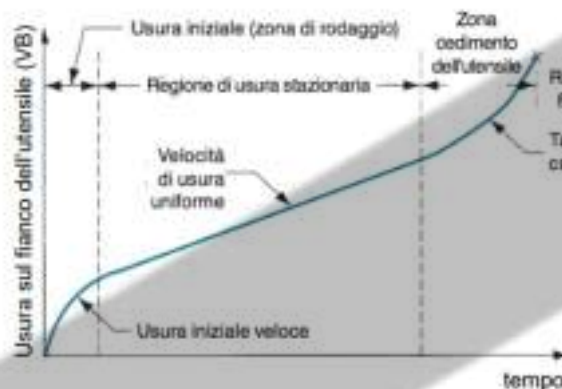
- Usura sul PETTO (cratere d'usura):

Sul petto si forma il cratere di usura, di cui si misura la profondità massima (KT) e la posizione (KM) rispetto allo spigolo tagliante originale.



-> L'usura cresce con il tempo di contatto utensile /pezzo:

v: costante

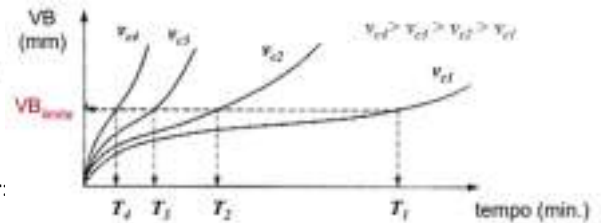
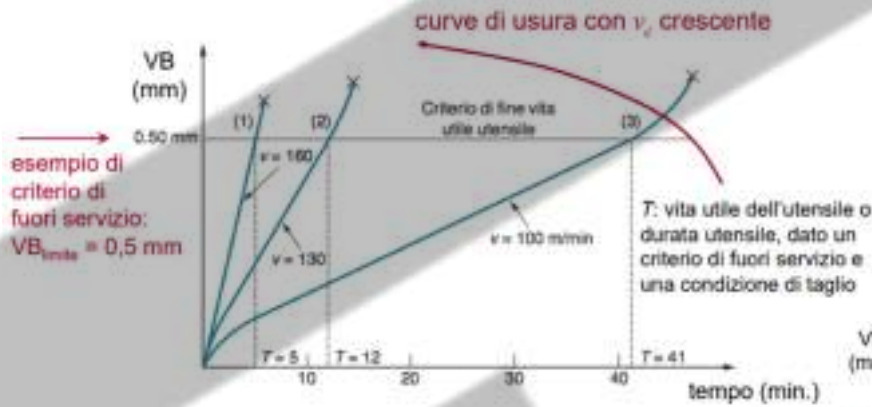


✂️ La rapidità con cui avviene l'usura dipende da molti fattori:

- Materiale dell'utensile;
- Condizioni di taglio;
- Condizioni di lubrificazione/refrigerazione.

4.9) Asportazione:

-> Per determinare l'istante in cui sostituire l'utensile si deve fissare un criterio di fuori servizio in termini di usura



RELAZIONE DI VITA UTENSILE:

È possibile esprimere la durata dell'utensile mediante la seguente **relazione di Taylor**:

$$v_c * T^n = C;$$

Dove

- v_c : velocità di taglio [m/min];
- T : è la durata dell'utensile [min];
- n : è un esponente che dipende dai materiali dell'utensile e del pezzo;
- C : è una costante che dipende dalle condizioni di taglio;

➤ Ogni combinazione di materiale del pezzo e dell'utensile e ogni condizione di taglio ha i propri valori di n e C .

Un usura più contenuta comporta:

- Un aumento della capacità produttiva:
 - o Aumento del volume rimosso nell'unità di tempo;
 - o Minori tempi morti di sostituzione dell'utensile usurato;
- Una riduzione dei costi;
 - o Minor costo dell'utensile;
 - o Minor costo imputato al pezzo.

OTTIMIZZAZIONE DELLE CONDIZIONI DI TAGLIO:

-> Hp:

- L'**usura utensile è deterministica** e segue la legge di Taylor;
- Il **prezzo di vendita** dei prodotti è **definito** e non dipende dalle quantità prodotte;
- **Macchina singola** (non si considerano le altre macchine del sistema);
- Macchina completamente **saturo** (la macchina ha sempre pezzi da lavorare e può sempre depositare a valle i pezzi lavorati);
- **Non si considerano buffer** e sistemi di immagazzinamento;
- **Non si considerano eventi stocastici** (guasti macchina, rotture utensili);
- Tutti i **pezzi lavorati sono buoni** e la qualità dei pezzi lavorati è indipendente dai parametri di lavorazione scelti.

TEMPO CICLO unitario di produzione:

$$T_c = T_h + T_m + T_{cu} = T_h + \frac{V}{Q} + \frac{T_t}{T} * \frac{V}{Q} = T_h + \frac{V}{Q} * \left(1 + \frac{T_t}{T}\right)$$

-> Indica il tempo di produzione di un pezzo;

- T_h : tempi fissi, tempo impiegato per cambiare il pezzo, in cui la lavorazione non avviene [min];
- n_p : numero pezzi prodotti con un utensile, $n_p = \frac{T}{T_m} = \frac{Q * T}{V}$;
- T_t : tempo cambio utensile [min];
- T_m : tempo di lavorazione, $T_m = \frac{V}{Q}$ [min];
- T_{cu} : cambio utensile, $T_{cu} = \frac{T_t}{n_p}$ [min];
- $Q = A_D * v_c$: volume di materiale asportato nel tempo [mm³/min];
- V : volume di materiale da asportare [mm³];

COSTO TOTALE unitario di produzione:

$$C_c = C_0 * T_c + \frac{C_t}{n_p} = C_0 * T_h + C_0 * \frac{V}{Q} + C_0 * \frac{V}{Q} * \frac{T_t}{T} + \frac{C_t}{T} * \frac{V}{Q}$$

$$C_c = C_0 * T_h + C_0 * \frac{V}{Q} * \left(1 + \frac{T_t}{T} + \frac{C_t}{C_0} * \frac{1}{T}\right) = C_0 * T_h + C_0 * \frac{V}{Q} * \left(1 + \frac{1}{T} * \left(\frac{T_t}{T} + \frac{C_t}{C_0}\right)\right)$$

- C_0 : costo al minuto della risorsa produttiva utilizzata (macchina utensile e operatore) [€/min.];
- C_c : costo medio del tagliente [€/tagliente];

4.10) ✂ Asportazione:

TASSO di PROFITTO [P_r]:

$$P_r = \frac{R - C_c}{T_c}$$

- R : ricavo;
- $T_c = T_h + \frac{V}{Q} * \left(1 + \frac{T_t}{T}\right)$
- $C_c = C_0 T_h + C_0 * \frac{V}{Q} * \left(1 + \frac{1}{T} * \left(\frac{T_n}{T} + \frac{C_t}{C_0}\right)\right)$

-> Vincoli:

- Potenza massima: $F_c v_c \leq E * P_t$;
- Inflessione massima del pezzo: $I_{pezzo} \leq \epsilon_{pezzo}$;
- Inflessione massima dell'utensile: $I_{utensile} \leq \epsilon_{utensile}$;
- Avanzamento e velocità: $f_{min} \leq f \leq f_{max}$ $v_{c,min} \leq v_c \leq v_{c,max}$;
- Rugosità: $\frac{f^2}{32r} \leq R_a$;

Ottimizzazione non vincolata ad un parametro:

- $T_c = T_h + \frac{V}{Q} \left(1 + \frac{T_t}{T}\right)$
- $C_c = C_0 T_h + C_0 \frac{V}{Q} \left(1 + \frac{1}{T} * \left(\frac{T_n}{T} + \frac{C_t}{C_0}\right)\right)$

$$\Rightarrow F = F_0 + \frac{\alpha}{Q} \left(1 + \frac{\varphi}{T}\right) \text{ funzione obbiettivo;}$$

-> Se si considera come parametro la velocità di taglio:

$$F = F_0 + \frac{\alpha}{Q} \left(1 + \frac{\varphi}{T}\right)$$

$$T = T(v_c); Q = A_D v_c;$$

$$\Rightarrow F = F_0 + \frac{\alpha}{A_D v_c} \left(1 + \frac{\varphi}{T(v_c)}\right) \Rightarrow F = F_0 + \frac{\alpha'}{v_c} \left(1 + \frac{\varphi}{T(v_c)}\right)$$

$$\frac{dF}{dv_c} = 0 \Rightarrow \frac{d}{dv_c} \left[F_0 + \frac{\alpha'}{v_c} \left(1 + \frac{\varphi}{T(v_c)}\right) \right] = 0 \Rightarrow -\frac{\alpha'}{v_c^2} \left(1 + \frac{\varphi}{T}\right) \frac{\alpha'}{v_c} \frac{\varphi}{T^2} \frac{dT}{dv_c} = 0;$$

$$-\frac{\alpha'}{v_c^2} \left(1 + \frac{\varphi}{T} + \frac{\varphi v_c}{T^2} \frac{dT}{dv_c}\right) = 0 \rightarrow 1 + \frac{\varphi}{T} + \frac{\varphi}{T} \frac{v_c}{T} \frac{dT}{dv_c} = 0 \rightarrow 1 + \frac{\varphi}{T} \left(1 + \frac{d \ln T}{d \ln v_c}\right) = 0;$$

-> Considerando la relazione di Taylor possiamo facilmente determinare il valore di velocità e durata utensile ottimi:

Determinazione del fattore $\frac{d \ln T}{d \ln v_c}$; $n \ln T = \ln C - \ln v_c$

-> $\ln T = \frac{1}{n} \ln C - \frac{1}{n} \ln v_c$: Siamo interessati al rapporto tra derivate $\left(\frac{d \ln T}{d \ln v_c}\right) \Rightarrow$ deriviamo per ricavare il suo valore;

-> $\frac{d \ln T}{d \ln v_c} = -\frac{1}{n}$: Taylor ci dice che possiamo sostituire nell'equazione precedente il rapporto tra derivate:

-> Sostituiamo nelle condizioni di ottimo: $1 + \frac{\varphi}{T} \left(1 - \frac{1}{n}\right) = 0$;

=> Determiniamo i valori ottimi: $T_{opt} = \varphi \left(\frac{1}{n} - 1\right) \rightarrow v_{c,opt} = \frac{C}{T_{opt}^n}$;

Considerazioni: la condizione di ottimo è strumentalmente equivalente sia per T_c che per C_c . Poiché:

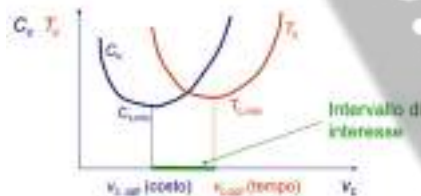
$$\varphi_{tempo} = T_t < \varphi_{costo} = T_t + C_t / C_0;$$

Allora

$$T_{opt}(tempo) < T_{opt}(costo);$$

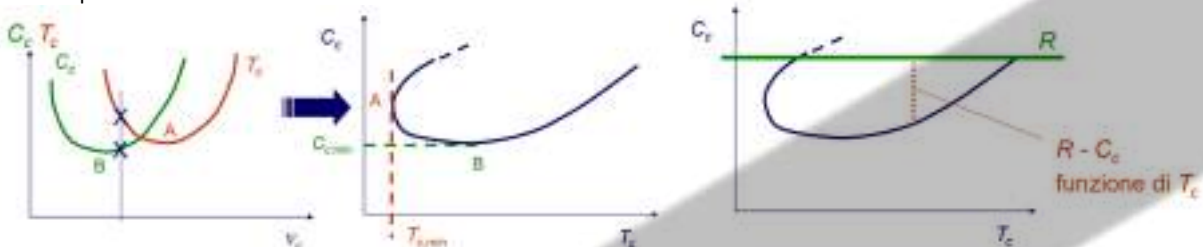
$$V_{c\ opt}(tempo) > V_{c\ opt}(costo);$$

Rappresentazione ottimizzazione non vincolata ad un parametro:



Tasso di profitto:

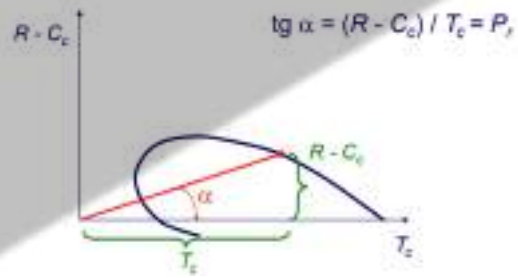
✂ Ipotizzando ricavi costanti



-> La distanza tra la curva e la retta R è la differenza ricavo - costo (e dipende dal tempo).

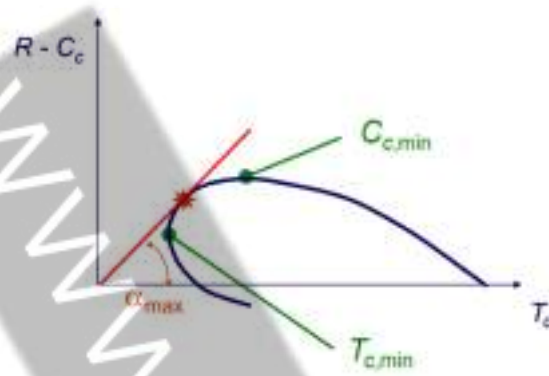
4.11) ✂ Asportazione:

-> Ribaltiamo la curva (è la stessa)



-> Tentiamo di massimizzare l'angolo alfa per avere il miglior profitto.

-> Non possiamo calcolare α_{max} , ma quella condizione (tangente al costo minimo e al tempo minimo) è intermedia tra e condizioni di minimo tempo e minimo costo.



www.handouts.it

4.12) ✂️ Asportazione > Definizioni:

TAGLIENTE: linea di intersezione tra petto e dorso, è uno spigolo (è un punto);

PETTO: superficie sulla quale il truciolo è obbligato a scorrere (attrito + interazione termica);

FIANCO o **DORSO:** superficie che si affaccia sulla superficie lavorata del pezzo. Inclinato per evitare di generare attrito. Voglio avere un grande angolo tra petto e fianco per rendere l'utensile più robusto;

PIANO DI SCORRIMENTO: piano in cui il materiale si deforma.

TORNITURA: processo di produzione industriale ottenuta per asportazione di truciolo. La tornitura viene definita da un moto rotatorio del pezzo e un moto per lo più rettilineo dell'utensile (nella fresatura e nella foratura l'utensile possiede invece un moto rotatorio). Il tagliente dell'utensile penetra nel materiale del pezzo e ne stacca la parte in eccesso (*sovrametallo*) formando così un truciolo. La macchina utensile usata per la tornitura è il tornio.

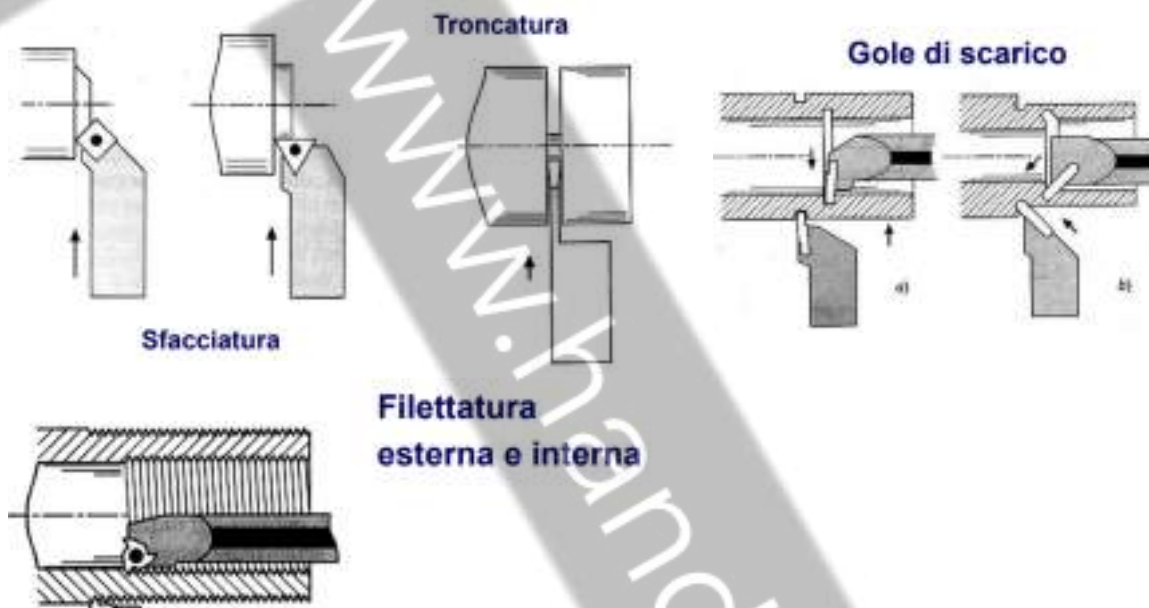
FRESATURA: lavorazione per asportazione di materiale che consente di ottenere una vasta gamma di superfici (piani, scanalature, spallamenti, forature ecc.) mediante l'azione di un utensile tagliente a geometria definita.

FORATURA: L'atto, l'operazione di forare, di praticare uno o più fori in un materiale.

LUNETTA: tipologia di fissaggio laterale.

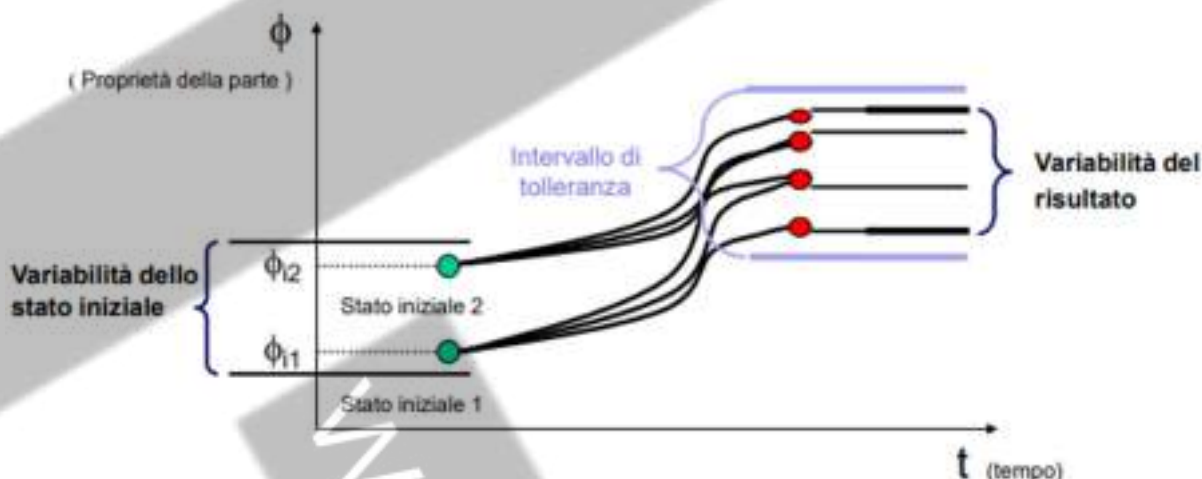
AUTOCENTRATE: altro modo per chiamare il mandrino, parte che fissa con le pinze il pezzo rotante;

PUNTA: punta con cui fissiamo l'ulteriore parte del pezzo.

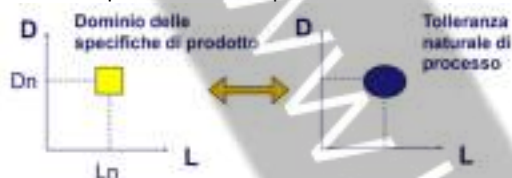


5.1) Qualità:

Tutte le trasformazioni REALI sono influenzate da fenomeni non controllabili (disturbi) che influenzano il risultato finale.



Le tolleranze si possono applicare a più caratteristiche di qualità (o proprietà).
 Le caratteristiche di qualità di un prodotto o di un processo sono variabili aleatorie



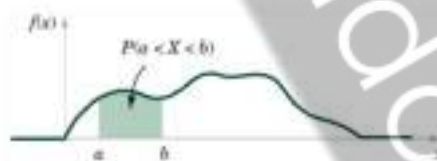
-> La condizione desiderata è quella di un processo in condizioni stabili e in regime tecnico.

Problemi:

- Come determinare se il processo è in condizioni stabili (processo in controllo)? Carte di controllo;
- Come decidiamo se il processo è adeguato? Analisi di capacità di processo.

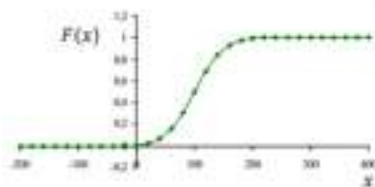
RICHIAMI DI ANALISI STATISTICA:

- Funzione di densità di probabilità, $f(x)$:



$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx$$

- Funzione di distribuzione cumulativa, $F(x)$:



$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(u) du$$

per $-\infty < x < \infty$

-> Data X variabile aleatoria continua con funzione di densità $f(x)$:

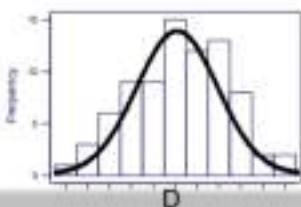
Popolazione:

- Media (valore atteso):
 $\mu = E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx;$
- Varianza:
 $\sigma^2 = V(X) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx;$
- Deviazione standard:
 $\sigma = \sqrt{V(X)};$

Campione causale (di dimensione n):

- Media campionaria:
 $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n};$
- Varianza campionaria:
 $s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n-1};$
- Deviazione standard campionaria:
 $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n-1}};$

-> Se la variabilità della caratteristica di qualità in uscita è dovuta a molte cause differenti => è approssimabile ad una distribuzione gaussiana (normale):



μ e σ sono i parametri della distribuzione, tali che:

$$-\infty < \mu < \infty ; \sigma > 0$$

$$E(x) = \mu ; V(x) = \sigma^2$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{per } -\infty < x < \infty$$

5.2) Qualità:

- > Possiamo quindi confrontare (monitorare) nel tempo i parametri della distribuzione (media e varianza) grazie alle **carte di controllo**.
- > Possiamo stimare la tolleranza naturale di processo e confrontare con i limiti di specifica grazie all'**analisi di capacità del processo**.

Controllo statistico della qualità: SPC

-> **DEF:** quando si parla di controllo statistico della qualità (Statistical Process Control - SPC) ci si riferisce a una collezione di tecniche qualitative e quantitative che consentono di:

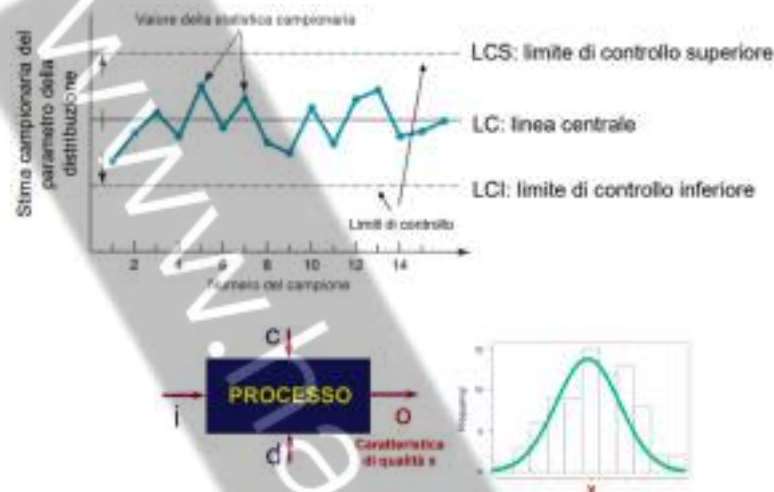
- Mantenere in controllo il processo;
- Conoscere la capacità (capability) del processo;
- Migliorare la capacità.

Tra le tecniche SPC troviamo le carte di controllo.

Carte di controllo:

-> **DEF:** Le carte di controllo sono una metodologia statistica che, attraverso un'analisi regolare dell'output di un processo, consente di accorgersi di uno scostamento di un processo dalla sua condizione nominale.

Esempio carta di controllo:



⚠ ATTENZIONE ⚠
Limiti di controllo
LCS, LCI !!! = limiti di specifica LSI, LSS.

-> x (output del processo) è distribuita secondo una nota legge di densità di probabilità (per effetto della variabilità intrinseca del processo).

- **Processo in controllo:** se il processo rimane in condizioni nominali di funzionamento e la fluttuazione di x sarà prevedibile;
- **Processo fuori controllo:** se dovessero intervenire cause identificabili a turbare il processo e la fluttuazione di x cambierà.

-> **hp:** in condizioni in controllo, i valori di X sono indipendenti e identicamente distribuiti secondo una normale di media μ_0 e deviazione standard σ_0 ;



-> Per tenere sotto controllo la caratteristica di qualità di interesse X occorre monitorare i parametri della sua distribuzione: media μ_0 e deviazione standard σ_0 .

Per un campione di numerosità n :

$$X_i \sim N(\mu_X, \sigma_X^2) \rightarrow \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \sim N\left(\mu_X, \frac{\sigma_X^2}{n}\right)$$



Utilizzo carte di controllo:



-> Schema generale per il calcolo dei parametri di una carta di controllo:

$$LCS = \mu_w + K\sigma_w;$$

$$LC = \mu_w;$$

$$LCI = \mu_w - K\sigma_w;$$

Dove:

$$\mu_w = E(w);$$

$$\sigma_w = \sqrt{V(w)};$$

$$K = Z_{\alpha}; \text{coefficiente positivo};$$

5.3) Qualità:

Risultati della carta di controllo:

-> Falso allarme: $\alpha = P(\text{ALLARME} | \text{SISTEMA IN CONTROLLO})$;

		Risultato del controllo	
		No allarme	Allarme
Reale stato del sistema	Fuori controllo	Ok	Falso allarme
	In controllo	Mancato allarme	Allarme giustificato

-> Se α elevato => è una situazione particolarmente grave se le procedure prevedono il fermo impianto durante l'analisi.

✂ In assenza di cambiamenti di processo, il numero medio di campioni prima di avere un falso allarme è: $ARL(H_0) = \frac{1}{\alpha}$;

📌 Utilizziamo $K=3$ perché ha un numero accettabile di falsi allarmi ma permette un controllo sicuro.

-> Mancato allarme: $\beta = P(\text{NO ALLARME} | \text{SISTEMA FUORI CONTROLLO})$;

		Risultato del controllo	
		No allarme	Allarme
Reale stato del sistema	Fuori controllo	Ok	Falso allarme
	In controllo	Mancato allarme	Allarme giustificato

-> Se elevato => il rischio è costituito dal fatto che per effetto del fuori controllo potremmo produrre parti fuori specifica.

✂ Probabilità di avere un allarme al primo campione successivo allo scostamento del processo dalla sua condizione nominale: $1 - \beta$;
Al secondo: $\beta(1 - \beta)$; al terzo: $\beta^2(1 - \beta)$; ... al J-esimo: $\beta^{J-1}(1 - \beta)$;

✂ Numero medio di campioni per avere un allarme: $ARL(H_1) = \sum_{j=1}^{\infty} j * \beta^{j-1} * (1 - \beta) = \frac{1}{1 - \beta}$;

Analisi di capacità del processo:

-> DEF: Analisi che ci permette di capire se il processo è adeguato.

-> La caratteristica di qualità realizzata dal processo deve rimanere all'interno di un intervallo definito dai limiti di specifica di produzione LSS e LSI.

-> Questi definiscono la quantità di prodotti difettosi...

- ...su una o più grandezze;
- ...insieme alla variabilità del processo.

-> H_0 : X (caratteristica di qualità) è una variabile indipendente e identicamente distribuita secondo una gaussiana:

$$X \stackrel{iid}{\sim} \mathcal{N}(\mu_0, \sigma_0^2)$$

=> La probabilità di non conformità totale del processo è: $\gamma = \gamma_s + \gamma_i$;

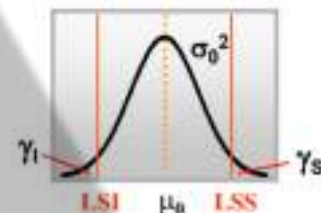
$P(X \in R) = 1$ dove R è dominio di esistenza di X (area sottesa da f(x) è pari a 1).

- $P(X < LSI) = \gamma_i$;
- $P(X > LSS) = 1 - P(X < LSI) = \gamma_s$;

=> γ rappresenta la percentuale attesa di scarti.

📄 Procedura verifica capacità del processo:

1. Verifica delle H_0 : processo in controllo, condizioni nominali;
2. Stima della tolleranza naturale del processo;
3. Stima di indici di capacità per valutare l'adeguatezza del prodotto rispetto al processo.



-> Ricapitolando, il primo problema è come fare per determinare se il processo è in condizioni stabili di regime tecnico:

- PRIMO PROBLEMA: il **PROCESSO** è **IN-CONTROLLO**?? => **CARTE** di **CONTROLLO** per rispondere;

Il secondo problema è capire se il processo che utilizzo è adeguato:

- SECONDO PROBLEMA: il **PROCESSO** è **ADEGUATO**?? => utilizzo **L'ANALISI** di **CAPACITÀ** di processo.

5.4) 🔍 Qualità:

CARTE DI CONTROLLO:

🔗 Approfondiamo l'utilizzo delle carte di controllo.

-> Tipi:

- **VARIABILI:** richiedono la misurazione della dimensione della caratteristica di qualità.
- **ATTRIBUTI:** si applicano quando la caratteristica di qualità è:
 - NON MISURABILE (es difetto di un tessuto);
 - MISURABILE ma TRASFORMATO (dimensione in o fuori tolleranza);
 - Associabile a un verdetto si/o.

🔗 Ci concentriamo sulle carte di controllo per variabili.

Carte di controllo per variabili:

IPOTESI:

-> Hp: assenza di autocorrelazione temporale, ovvero $X^{iid} \sim N(\mu_0, \sigma_0^2) \Rightarrow$ Indipendenza dei dati.

-> Se Δt è sufficientemente piccolo spesso esiste autocorrelazione.

-> Test di Bartlett: metodo per la verifica di assenza di autocorrelazione.

-> Metodi per la verifica dell'ipotesi di normalità:

- Metodo grafico (qualitativo);
- Test di Anderson-Darling (quantitativo);

LE CARTE DI CONTROLLO - TIPOLOGIE:

Carta della media (\bar{X}):

-> Statistica $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ ha distribuzione $\bar{X} \sim N\left(\mu_0, \frac{\sigma_0^2}{n}\right)$

-> La distribuzione $\bar{X} \sim N\left(\mu_0, \frac{\sigma_0^2}{n}\right)$:

- Un'approssimazione con il teorema del limite centrale per $n \rightarrow \infty$ e variabili indipendenti;
- Esatta se $X_i \sim NID(\mu_0, \sigma_0^2)$;

-> Limiti:

- Considerando la statistica campionaria w :

$$LCS = E(w) + K\sqrt{V(w)};$$

$$LC = E(w);$$

$$LCI = E(w) - K\sqrt{V(w)};$$

- In questa situazione $w = \bar{X} \sim N\left(\mu_0, \frac{\sigma_0^2}{n}\right)$

$$LCS = \mu_0 + Z_{\alpha/2} \sqrt{\sigma_0^2/n};$$

$$LC = \mu_0;$$

$$LCI = \mu_0 - Z_{\alpha/2} \sqrt{\sigma_0^2/n};$$

-> Se $K = Z_{\alpha/2} = 3 \Rightarrow \alpha = 0,0027$;

🔗 **COSTANTI TABULATE**, si possono usare solo con $K=3$:

$$A_2(n) = \frac{3}{d_2(n)\sqrt{n}}; D_4(n) = 1 + \frac{3d_3(n)}{d_2(n)}; D_3(n) = 1 - \frac{3d_3(n)}{d_2(n)};$$

Carta per la dispersione ($= \sigma$):

-> È necessario sorvegliare la variabilità del processo:

- Perché condiziona la difettosità del processo;
- Per interpretare correttamente gli allarmi sulla carta Xbar se i parametri fossero incogniti.

-> Le carte per la dispersione σ_0 sono:

- Carta S^2 (varianza campionaria);
- Carta S (deviazione standard campionaria);
- Carta R (Range):
 - o Facile da calcolare;
 - o Efficienza paragonabile a S se $n < 5$ e costante.

Carta R:

-> **DEF:** R: il range di un campione di n osservazioni, ciascuna proveniente da una gaussiana di varianza σ_0^2 ;

-> Hp: che deve essere verificata $X_i \sim NID(\mu_0, \sigma_0^2)$;

🔗 È possibile utilizzare l'escursione campionaria R come stimatore della dispersione associata a un campione di osservazioni

- R è una variabile aleatoria con:
 - o Media: $E(R) = d_2(n) \sigma_0$;
 - o Varianza: $V(R) = (d_3(n) \sigma_0)^2$;

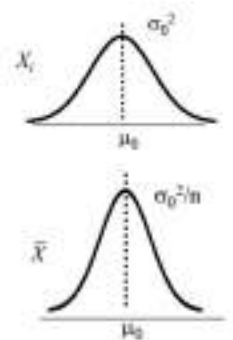
🔗 d_2 e d_3 : costanti tabulate.

🔗 Limiti:

$$LCS = E(R) + Z_{\alpha/2} \sqrt{V(R)};$$

$$LC = E(R);$$

$$LCI = E(R) - Z_{\alpha/2} \sqrt{V(R)};$$



🔗 **NID:** distribuiti normalmente e in modo indipendente.

🔗 **K** si chiama percentile; alfa errore di primo tipo.

5.5) Qualità:

-> Nell'ipotesi di conoscere i parametri (μ_0, σ_0) la carta può essere utilizzata per monitorare il processo.

✂ Procedura:

-> PER OGNI NUOVO campione i:

1. Calcolo le statistiche \bar{X} e R .
2. Confronto le statistiche con i limiti di controllo delle due carte \bar{X} e R per capire se il processo sia o meno in controllo.

Parametri incogniti:

Fase 1: progettazione della carta di controllo:

1. **Assicurarsi** che il processo sia in **condizioni** di **regime** tecnico-produttivo;
2. **Estrarre m campioni** (almeno 20-25) di **dimensione n**, misurandone la variabile di interesse;
3. Eseguire un'**analisi esplorativa** dei dati;
4. **Stimare i parametri incogniti e costruire le carte**;
5. **Verificare** che tutti gli m campioni siano in controllo (in relazione ai limiti calcolati). Per i punti «fuori controllo» eseguire una fase diagnostica al fine di individuare l'eventuale «causa assegnabile» ;
6. In caso di **fuori controllo giustificato** (per cui è stata individuata una causa assegnabile), eliminare il campione dal set di campioni e ripetere la progettazione (tornare al punto 4).

Stima dei parametri e costruzione delle carte:

- Media incognita e varianza nota:

- Stima della media: $\hat{\mu}_0 = \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{x}_i}{m}$;
- Calcolo dei limiti di controllo: $\mu_0 \rightarrow \hat{\mu}_0 = \bar{X} \Rightarrow LC_L^S = \mu_0 \pm Z_{\frac{\alpha}{2}} \sigma_0 / \sqrt{n}$;

📍 La carta R non cambia.

- Media e varianza incognite:

- Stima della dispersione: $\hat{\sigma}_0 = \frac{\bar{R}}{d_2(n)}$ da: $E(R) = d_2(n)\sigma_0$;
- Limiti carta \bar{X} :

$$LCS = \bar{X} + K \frac{\hat{\sigma}_0}{\sqrt{n}} = \bar{X} + A_2(n)\bar{R};$$

$$LC = \bar{X};$$

$$LCI = \bar{X} - K \frac{\hat{\sigma}_0}{\sqrt{n}} = \bar{X} - A_2(n)\bar{R};$$

- Limiti carta R:

$$LCS = [d_2(n) + Kd_3(n)]\hat{\sigma}_0 = \bar{R} + \frac{Kd_3(n)}{d_2(n)}\bar{R};$$

$$LC = E(R) = \bar{R};$$

$$LCS = [d_2(n) - Kd_3(n)]\hat{\sigma}_0 = \bar{R} - \frac{Kd_3(n)}{d_2(n)}\bar{R};$$

⚠ Reminder: LCI (SOLO carta R) ≥ 0 ;

✂ Abbiamo costruito i limiti della carta R con una relazione del tipo $E(w) \pm K\sqrt{V(w)}$ che presuppone una gaussiana per concludere che $\alpha = 0,27\%$ ma R non è distribuito secondo una gaussiana (infatti $R > 0$) quindi $\alpha_{reale} \neq 0,27\%$.

✂ Si stimano media o varianza dal processo a regime.

📍 COSTANTI TABULATE, si possono usare solo con $K=3$:

Curva OC:

-> **DEF:** rappresenta la probabilità di non avere un allarme al primo campione successivo ad un cambiamento dei parametri del processo, in funzione dell'entità del cambiamento stesso.

-> Viene calcolata per una carta \bar{X} nel caso in cui vari la MEDIA del PROCESSO:

$$H_0: \mu = \mu_0 \quad H_1: \mu = \mu_1 = \mu_0 + \delta\sigma_0;$$

$$\beta = P(\bar{X} \in [LCI, LCS] | H_1) = \Phi\left(\frac{LCS - \mu_1}{\frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}}\right) - \Phi\left(\frac{LCI - \mu_1}{\frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}}\right)$$

$$\beta = \Phi(K - \delta\sqrt{n}) - \Phi(-K - \delta\sqrt{n});$$

-> In linea teorica è possibile, con lo stesso approccio, calcolare la curva OC per la carta R: $\beta(\lambda) = P(R \in [LCI, LCS] | \sigma_1 = \lambda\sigma_0)$, con LCS e LCI calcolati con formule viste prima.

-> Errore del primo tipo (HP: processo in controllo e $W \sim N(\mu_W, \sigma_W^2)$):

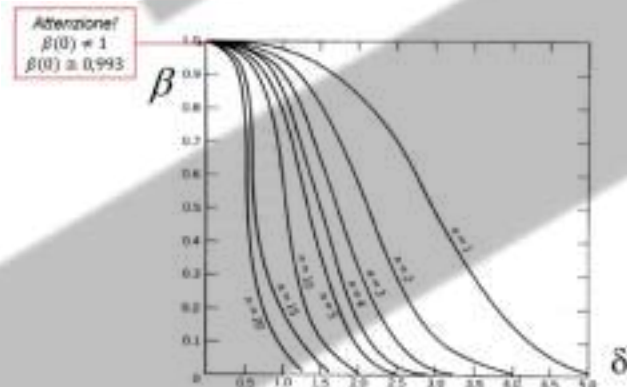
$$\alpha = P(W > LCS | HP) + P(W < LCI | HP);$$

$$\alpha = 1 - P\left(\frac{W - \mu_W}{\sigma_W} \leq \frac{LCS - \mu_W}{\sigma_W} | HP\right) - P\left(\frac{W - \mu_W}{\sigma_W} < \frac{LCI - \mu_W}{\sigma_W} | HP\right)$$

$$\alpha = 1 - \Phi\left(\frac{LCS - \mu_W}{\sigma_W}\right) - \Phi\left(\frac{LCI - \mu_W}{\sigma_W}\right)$$

$$\alpha = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_W + K\sigma_W - \mu_W}{\sigma_W}\right) - \Phi\left(\frac{\mu_W - K\sigma_W - \mu_W}{\sigma_W}\right) = 2(-\Phi(K))$$

-> Sotto ipotesi di normalità α dipende solo da K, con $K = Z_{\frac{\alpha}{2}}$



5.6) 🔍 Qualità:

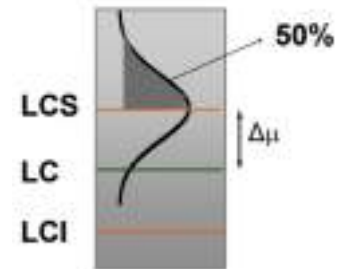
METODO DUNCAN: (carta Xbar)

Metodo Duncan al 50%:

✦ Avendo fissato K, per controllare β possiamo solo scegliere n.

Scegliere n in modo che sia pari al 50% la probabilità di individuazione uno spostamento della media $\Delta\mu$ al primo campione successivo allo spostamento stesso:

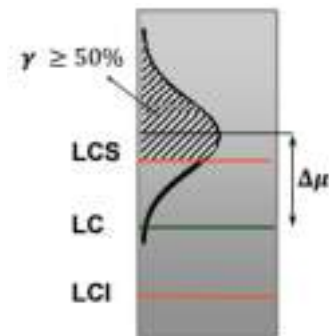
$$\begin{aligned}\mu_0 \pm \Delta\mu &= \mu_0 \pm K\sigma_0/\sqrt{n}; \\ \Delta\mu &= K \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}; \\ n &= \left(\frac{K\sigma_0}{\Delta\mu}\right)^2\end{aligned}$$



Metodo di Duncan generalizzato (carta Xbar):

Scegliere n in modo che sia pari a $\gamma \geq 50\%$ la probabilità di individuare uno spostamento della media $\Delta\mu$ al primo campione successivo allo spostamento stesso:

$$\begin{aligned}P(\bar{X} \leq LCS | \mu_0 + \Delta\mu, \sigma_0) &= 1 - \gamma; \\ P\left(\frac{\bar{X} - (\mu_0 + \Delta\mu)}{\frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}} \leq \frac{LCS - (\mu_0 + \Delta\mu)}{\frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}}\right) &= 1 - \gamma; \\ \Phi\left(\frac{LCS - (\mu_0 + \Delta\mu)}{\frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}}\right) &= 1 - \gamma; \\ \frac{LCS - (\mu_0 + \Delta\mu)}{\frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}} &= Z_\gamma; \\ \mu_0 + \frac{K\sigma_0}{\sqrt{n}} - \mu_0 - \Delta\mu &= Z_\gamma * \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}; \\ n &= \left(\frac{K - Z_\gamma}{\Delta\mu}\right)^2\end{aligned}$$



LE CARTE DI CONTROLLO - TIPOLOGIE (il ritorno):

CARTA I-MR:

-> **DEF:** carte che utilizzano l'approccio Moving Range MR (Range Mobile):

-> Utilizzate perché in alcuni casi la dimensione del campione è unitaria (n=1), cause:

- Ispezione automatica;
- Velocità di produzione bassa;
- Gli elementi del campione sono in realtà misure ripetute che differiscono solo per la variabilità del sistema di misura (che si suppone in controllo) ad esempio processi chimici.

-> È come se costruiamo un campione fittizio formato da n=2 dati consecutivi.

$$MR_i = |X_i - X_{i-1}| \quad i = 2, 3, \dots, m;$$

⚠ Se non sono note le caratteristiche della distribuzione di X, i metodi per la stima della dispersione visti prima non sono applicabili.

-> Calcolo media e dispersione (deviazione standard):

$$\hat{\mu}_0 = \bar{X} = \bar{X} = \frac{1}{m} \sum_{i=1, \dots, m} X_i \quad \hat{\sigma}_0 = \frac{\overline{MR}}{d_2(2)} \quad \text{con} \quad \overline{MR} = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1, \dots, m} MR_i;$$

-> Limiti con carte Xbar & R:

- Carta I:

$$LC_I^S = \bar{X} \pm K\sigma_0 = \bar{X} \pm K \frac{\overline{MR}}{d_2(2)};$$

- Carta MR:

$$LC_M^S = [d_2(2) \pm K d_3(2)]\sigma_0 = [d_2(2) \pm K d_3(2)] \frac{\overline{MR}}{d_2(2)} = \overline{MR} \pm \frac{K d_3(2)}{d_2(2)} \overline{MR};$$

🔍 Anche in questo caso con K=3 si possono utilizzare le costanti tabulate:

$$D_4(n) = 1 + \frac{3d_3(n)}{d_2(n)}; \quad D_3(n) = 1 - \frac{3d_3(n)}{d_2(n)};$$

⚠ Con n=1 il teorema del limite centrale non aiuta più nella carta Xbar.

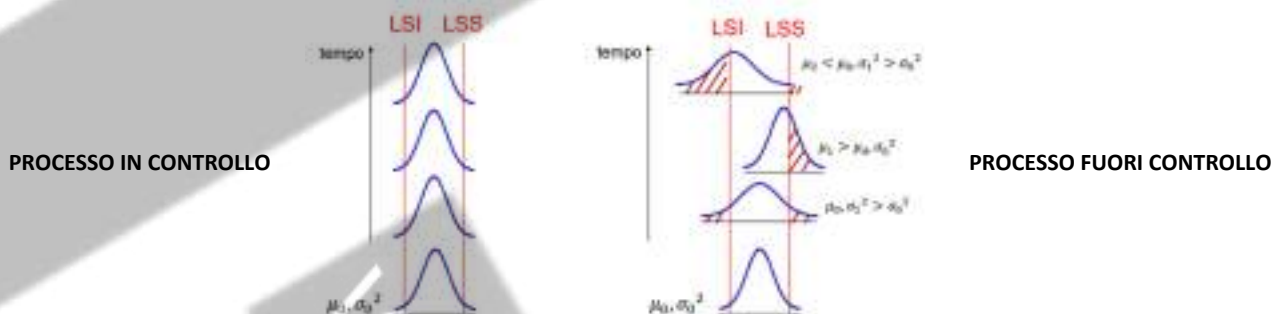
5.7) Qualità > Definizioni:

INTERVALLO STATISTICO DI TOLLERANZA NATURALE: intervallo determinato da un campione casuale tale che, con un certo livello di confidenza, l'intervallo stesso include una data proporzione della intera popolazione.

PROCESSO INSTABILE o **FUORI CONTROLLO:** quando ci sono variazioni nel tempo di frazioni di difettosi e quando è impossibile prevedere lo stato futuro del processo.

PROCESSO IN CONTROLLO: se il processo rimane in condizioni nominali di funzionamento e la fluttuazione di x sarà prevedibile;

PROCESSO FUORI CONTROLLO: se dovessero intervenire cause identificabili a turbare il processo e la fluttuazione di x cambierà. Cambiamenti della media o della dispersione possono aumentare il valore atteso dei non conformi.



LIMITI DI CONTROLLO: Limiti di controllo si applicano a stime campionarie dei parametri della distribuzione (media e varianza) della caratteristica di qualità; servono per determinare se il processo è in controllo oppure no.

LIMITI DI SPECIFICA: Limiti di specifica si applicano direttamente alla caratteristica di qualità; vengono definiti a progetto e servono a garantire le funzionalità del prodotto.

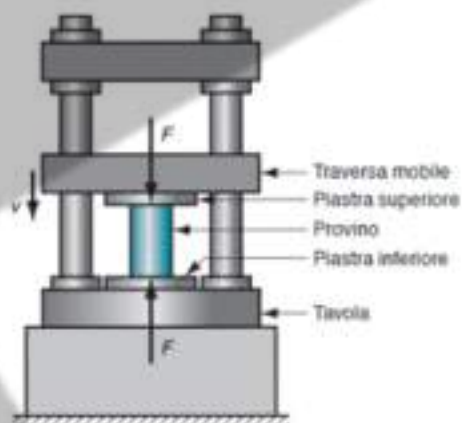
ARL: Average Run Length, numero medio di campioni per...

- H1: avere un falso allarme.

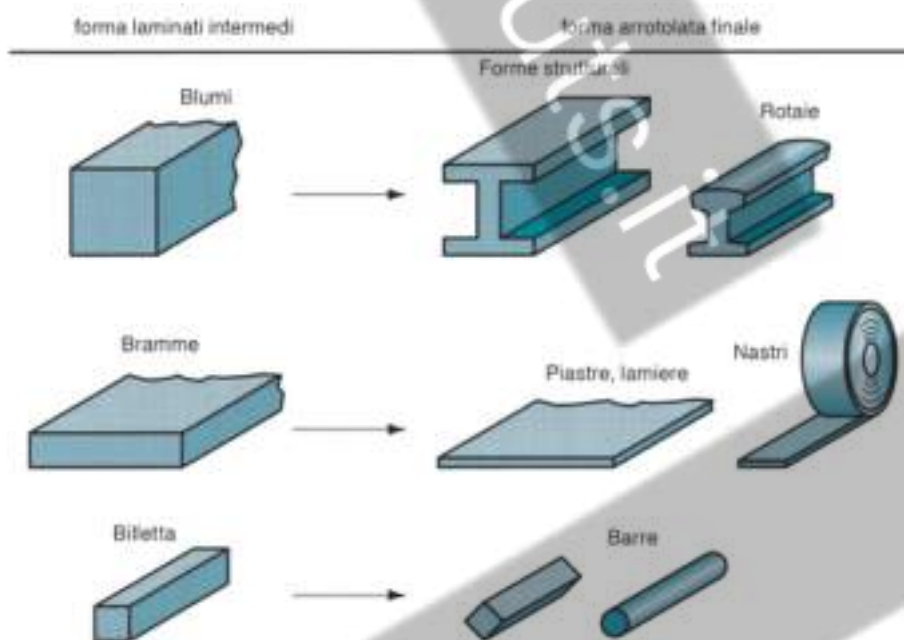
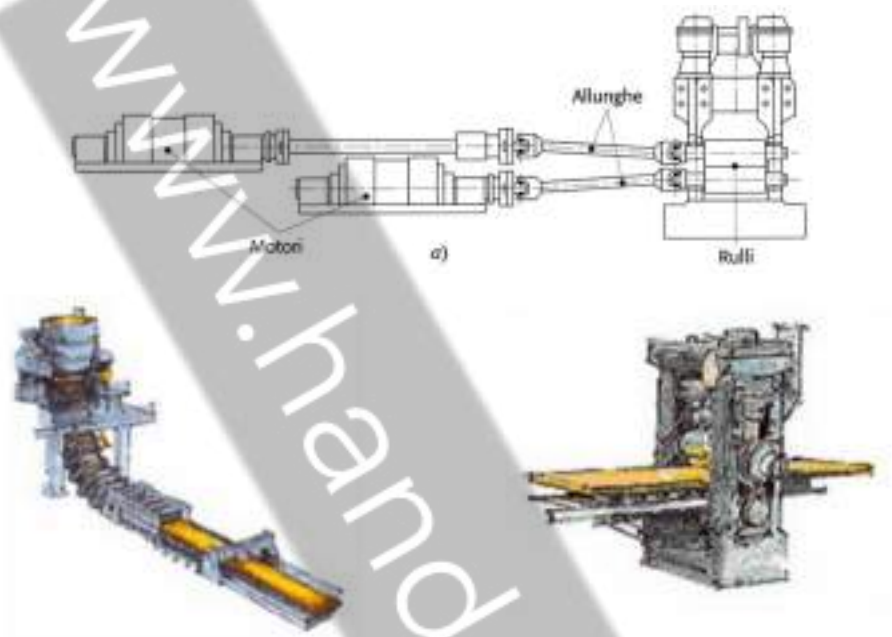
INDICE DI CAPACITÀ: capacità di un sistema, un processo o una compagnia di produrre un prodotto che soddisfa i requisiti del prodotto stesso.

6.1) 🚗 Macchine:

COMPRESSIONE:



LAMINAZIONE:

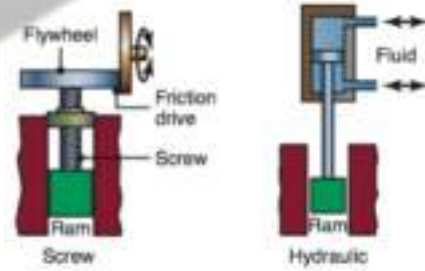
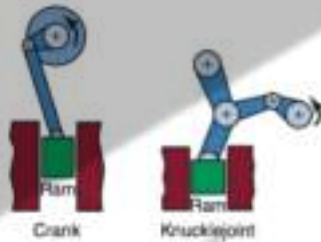


6.2) 🚗 Macchine:

FORGIATURA:

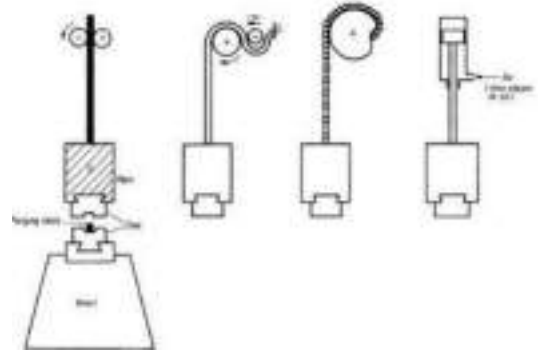
Presse:

- Idraulica: il movimento della slitta è ottenuto con un fluido in pressione
- Meccanica: il movimento è ottenuto con cinematismo biella - manovella
- A vite: il movimento è ottenuto con cinematismo vite - madrevite



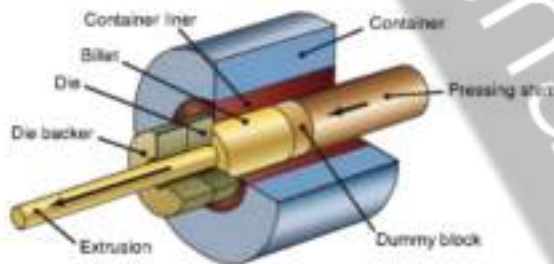
Magli

- La massa del maglio è sollevata con meccanismi differenti e poi lasciata cadere;
- L'energia trasferita deriva dall'energia potenziale del maglio;
- L'energia è limitata;
- Le velocità sono elevate;
- Il raffreddamento minimo.

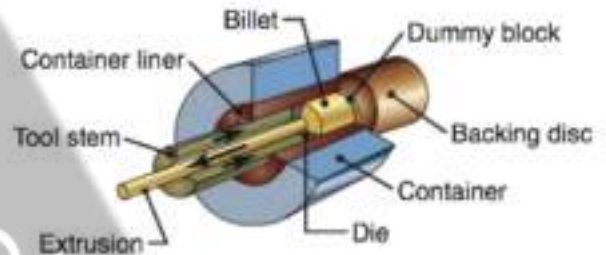


ESTRUSIONE:

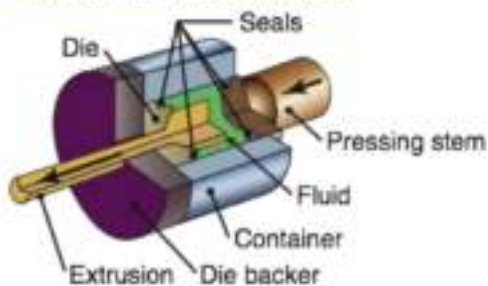
Estrusione diretta



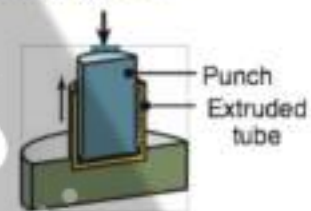
Estrusione inversa



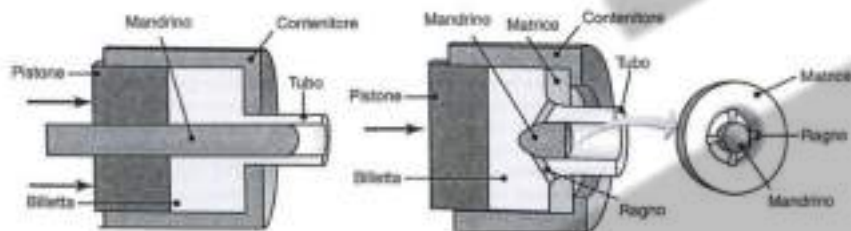
Estrusione idrostatica



Estrusione a impatto

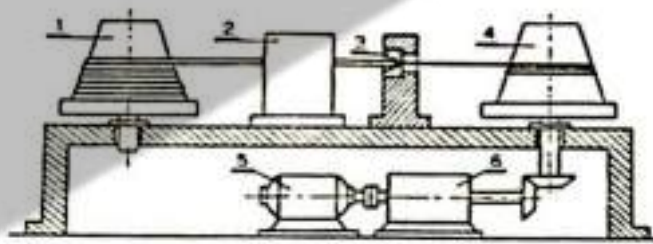


-> Matrici:



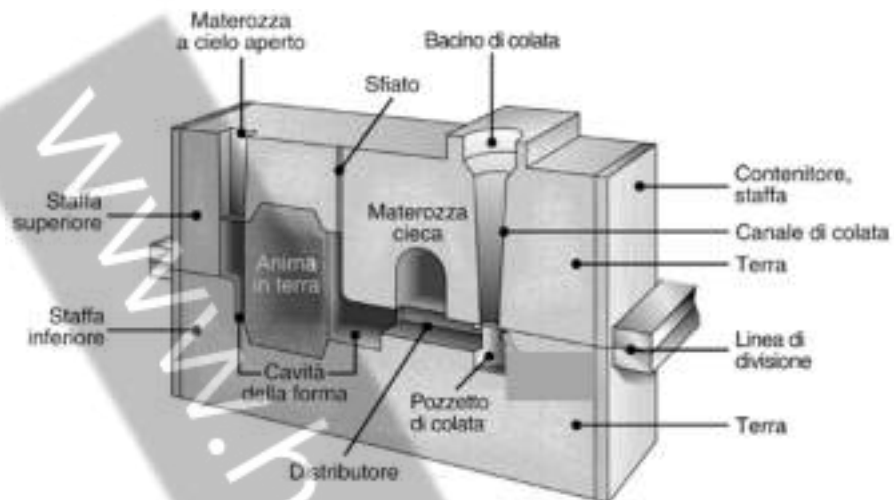
6.3) 🚗 Macchine:

TRAFILATURA:

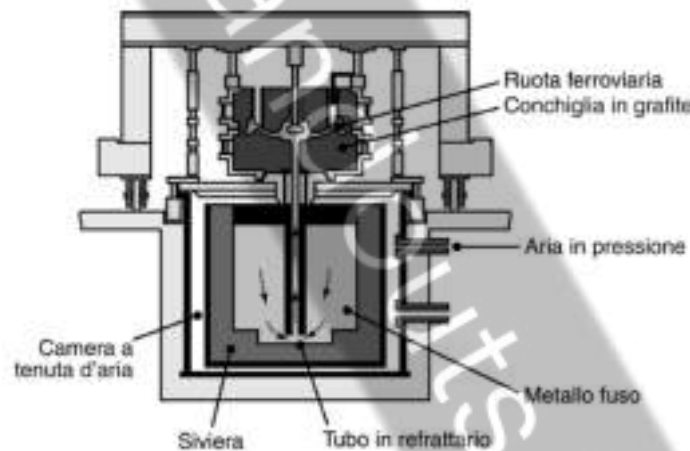


FONDERIA:

FORMA IN TERRA:

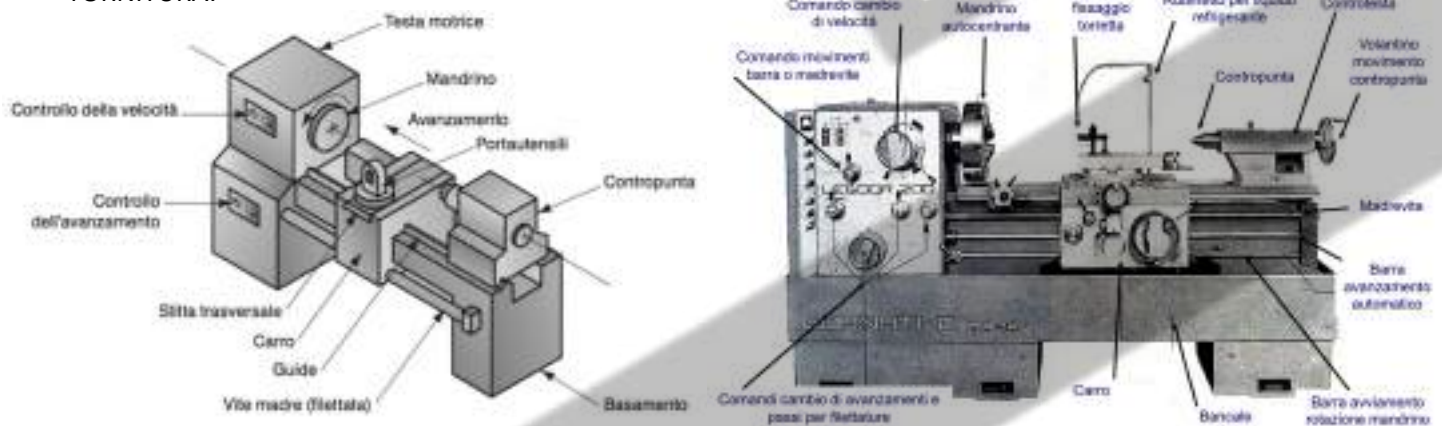


COLATA SOTTO PRESSIONE:



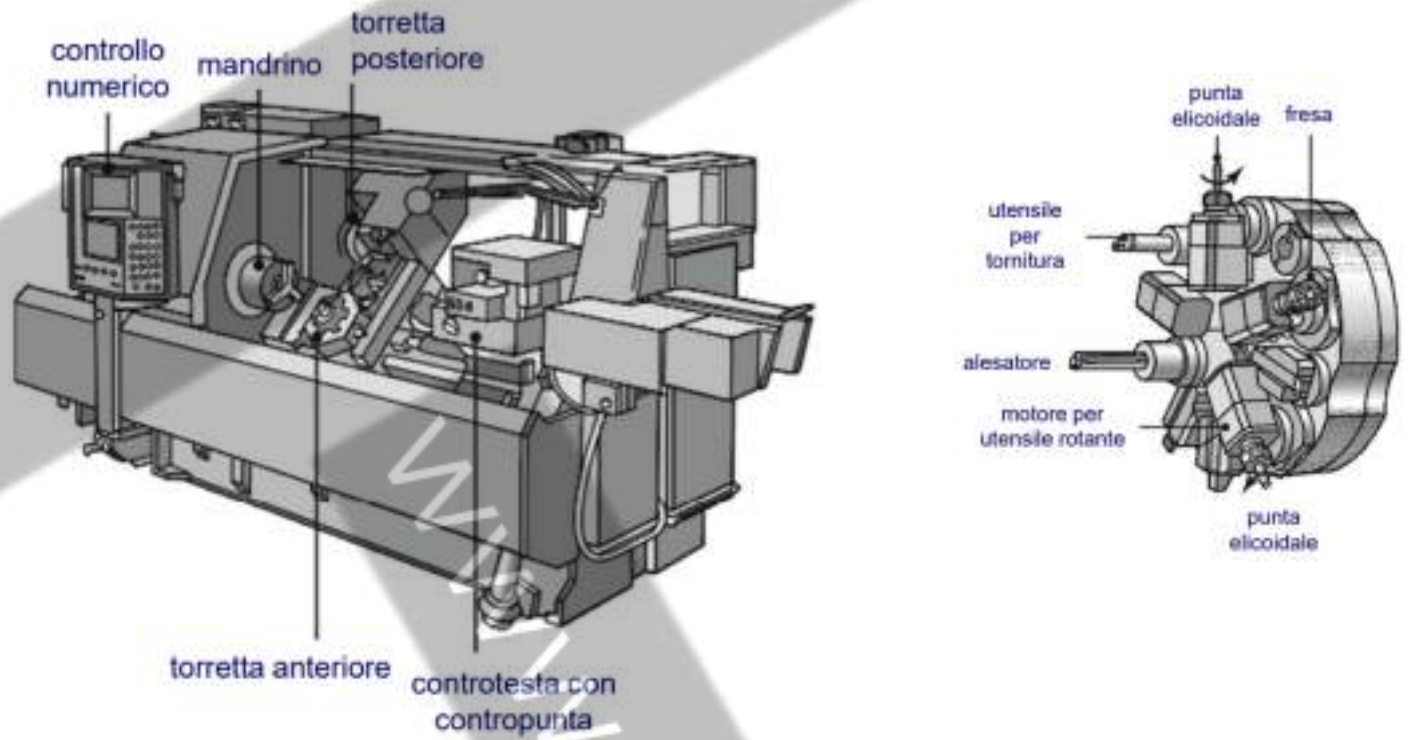
ASPORTAZIONE:

TORNITURA:



6.4) 🚗 Macchine:

TORNIO a controllo numerico:



www.handouts.it