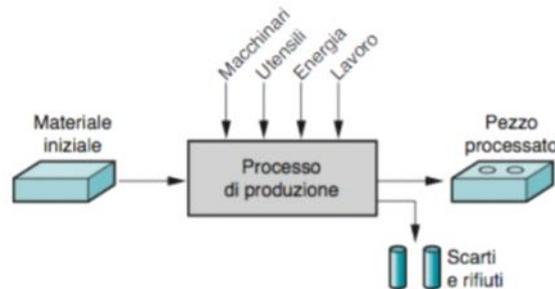


1.1 - La tecnologia meccanica

Le tecnologie di produzione (o tecnologie di lavorazione meccanica) costituiscono l'insieme dei processi (fisici e chimici) e dei metodi per modificare la geometria, le proprietà e l'aspetto di un materiale grezzo in ingresso al fine di realizzare un prodotto o delle parti di esso.

Il sistema di produzione più vicino al processo sono le macchine e gli utensili, questi lavorano sfruttando energia meccanica o termica.

Lo scopo è passare da un materiale grezzo preso da un fornitore e trasformarlo in un pezzo con una forma ben definita. Nella produzione ci saranno degli scarti (o sfridi) e dei rifiuti industriali (oli di lavorazione...)

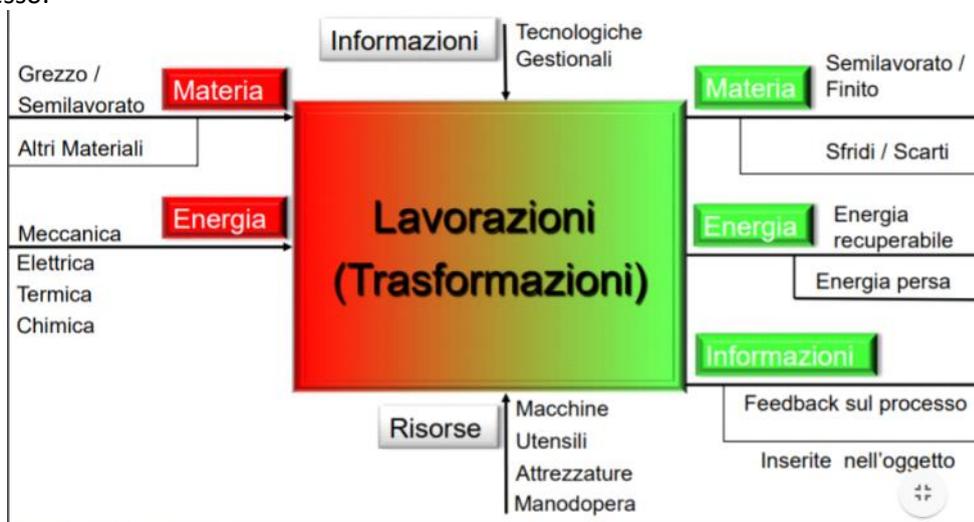


Sottolineiamo che processo lavorazione e trasformazione sono sinonimi.

In un processo dobbiamo introdurre sia materia che energia. Il materiale in ingresso viene detto grezzo o semilavorato a seconda del contesto.

I processi di trasformazione sono generalmente molto lunghi e solo all'ultimo processo di una catena di produzione potremmo parlare di prodotto finito. In generale possiamo dire che da un processo all'altro entrano ed escono dei semilavorati.

Come si vede dallo schema, all'uscita di ogni processo abbiamo, oltre al semilavorato, anche degli scarti di produzione, dell'energia che in parte può essere riutilizzata (ad esempio se nel processo usiamo del vapore, che durante il processo condensa in acqua ad alta temperatura, possiamo tramite scambiatori di calore recuperare energia da questa acqua) e altra che viene irreversibilmente persa, inoltre possiamo ottenere anche dei feedback sotto forma di dati statistici per migliorare il processo.



Da un punto di vista economico la produzione è la trasformazione di materie prime o semilavorati in oggetti di maggior valore, quindi le trasformazioni aggiungono valore al semilavorato e quindi il valore aggiunto compensa il costo della lavorazione.

Processi manifatturieri continui e discreti

Produzione per processo: prodotti continui

Il prodotto in uscita dal processo sono prodotti continui quando sono dei semilavorati, non possono essere scomposti andando a ritroso perché i componenti originari non sono più distinguibili tra loro a valle della trasformazione (ad esempio delle viti finite la trasformazione sono tutte uguali).

Questi vengono detti continui perché non vengono venduti al dettaglio ma per unità di peso o di volume.

Produzione per parti: prodotti discreti

Non ci occuperemo molto delle lavorazioni di processo, ma principalmente tratteremo le lavorazioni discrete o per parti. Queste lavorazioni trattano semilavorati o prodotti finiti che si possono contare (discreti) e che sono composti da un numero finito di parti. Caratteristica delle lavorazioni per parti è che il prodotto finito sia un assieme, ovvero composto da molti singole parti assemblate insieme. L'assemblaggio inizia con dei sotto assiami, che poi vengono assemblati tra di loro fino ad avere il prodotto finito.

Una caratteristica della produzione moderna è avere dei fornitori, quindi a differenza delle aziende all'inizio del secolo, in cui tutto veniva prodotto dalla stessa azienda, ora le parti vengono acquistate da aziende specializzate. Questo fatto porta ad avere parti con una qualità maggiore, ma complica alle volte la fase di progettazione di un nuovo pezzo.

La produzione per parti è composta dalle fasi di:

- Fabbricazione: Insieme delle lavorazioni (trasformazioni) che modificano la forma, le dimensioni, lo stato superficiale di parti singole.
- Assemblaggio: Insieme delle operazioni di giustapposizione di almeno due parti singole per formare un assieme.

Tipicamente le aziende che vendono il prodotto finito (Bosch, Siemens...) non sono aziende di fabbricazione ma aziende di assemblaggio.

Assemblaggio e complessità di produzione

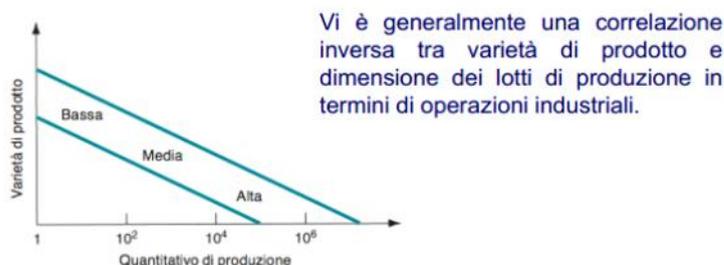
Dei fattori per misurare la complessità sono:

- Il numero di parti che vanno assemblate;
- I volumi produttivi;
- I tempi di setup

I tre fattori ovviamente influenzano la complessità di produzione se il loro numero è alto, molte parti da assemblare, molti prodotti fabbricati durante l'anno.

Un pezzo si dice prodotto in serie limitata se ne vengono prodotti da 1 a 100 all'anno, una produzione media di un pezzo implica una produzione dalle 100 alle 10.000 unità annue, mentre oltre si parla di produzione in grande serie. Questi limiti tra unità ovviamente sono arbitrari.

Oltre non sempre produrre molti pezzi è un vantaggio, infatti una serie di prodotto limitata permette una maggior personalizzazione del prodotto finito, al fine di andare in contro al meglio alle specifiche richieste dal cliente.



Infine un altro che influenza la complessità del processo è il setup delle macchine di produzione. Con setup si intende l'operazione di preparazione della macchina per effettuare una lavorazione specifica, quindi comprende l'impostare la macchina correttamente sia da un punto di vista di programma (tornio o fresa automatizzati) che da un punto di vista degli utensili; far andare a regime la macchina, infatti i primi pezzi spesso sono di scarto etc.. Più setup vanno fatti a una stessa macchina durante il periodo di lavorazione del prodotto e più aumenta la complessità di produzione. L'operazione di setup può richiedere anche delle ore o addirittura dei giorni.

Capacità di una fabbrica

La capacità di una fabbrica indica quanti pezzi una fabbrica può produrre. Si riferisce ai limiti tecnici e fisici di un'impresa. La capacità tecnica coinvolge sia i processi fisici che le competenze professionali del personale; la capacità produttiva invece si riferisce specificamente alla quantità di pezzi producibili nel periodo di tempo

Ritmo produttivo e tempo ciclo

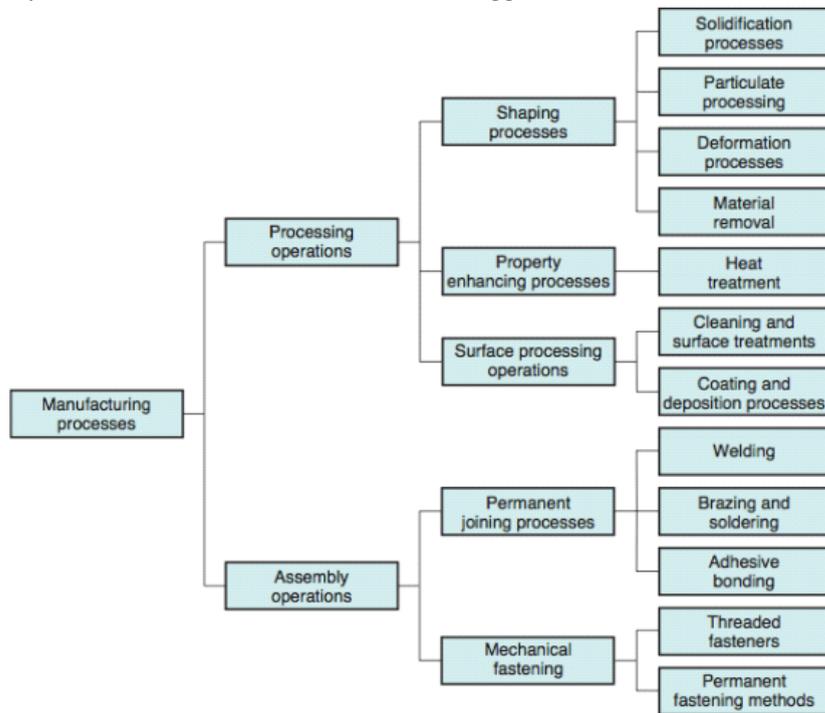
Il ritmo produttivo di un processo è il numero di parti prodotte in un determinato tempo e si misura in parti per ora (jobs/hour=JBH); il tempo ciclo è l'intervallo di tempo tra due uscite successive di pezzi (comprende anche i tempi di setup) ed è l'inverso del ritmo produttivo.

Processi di produzione:

- Colata: fusione in forma transitoria o in forma permanente

- Formatura: laminazione, forgiatura, estrusione, trafilatura, formatura della lamiera, metallurgia delle polveri e stampaggio
- Asportazione: Tornitura, Alesatura, Foratura, Fresatura, Piallatura, Limatura, Broccatura, Rettifica, asportazione con ultrasuoni, lavorazioni chimiche, elettriche ed elettrochimiche, lavorazioni con fasci di energia concentrata.
- Assemblaggio, collegamento: Saldatura, Brasatura, Saldatura per diffusione e mediante adesione, collegamenti meccanici
- Finitura: Levigatura, Lappatura, Lucidatura, Rullatura, Sbavatura, Trattamenti superficiali e rivestimenti.

Le trasformazioni comportano in genere una variazione di massa del pezzo, in particolare abbiamo che la massa diminuisce in processi come l'asportazione truciolo, si conserva nel caso della deformazione plastica o aumenta durante l'assemblaggio o tramite tecniche additive (3D Printing)



I materiali

Ci occuperemo principalmente di leghe metalliche e metalli puri, principalmente ferrosi (acciaio e ghisa) e non ferrosi (alluminio, rame, magnesio, titanio, nichel)

Dal punto di vista degli utensili il materiale di costruzione possono essere gli acciai per utensili (con proprietà meccaniche superiori a quelle del pezzo che vanno a lavorare), o i carburi sinterizzati (materiali ceramici).

Di polimeri, ceramici e compositi non ne parleremo approfonditamente.

I polimeri si dividono in:

- Termoplastici, possono essere manipolati scaldandoli;
- Termoindurenti, induriscono alle alte temperature e sono più duri dei termoplastici;
- Elastomerici, ottenuti da vulcanizzazione, processo di polimerizzazione irreversibile, usati per gli pneumatici;

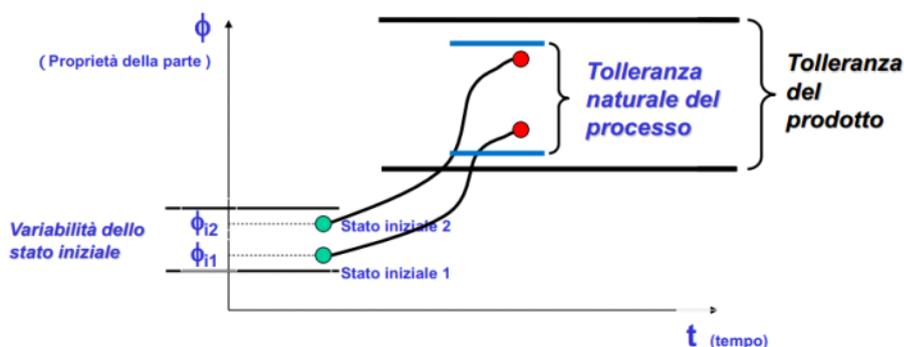
I materiali compositi sono una quarta categoria di materiali molto importanti ai fini ingegneristici, sono materiali composti da 2 sotto materiali, un materiale di matrice, che fornisce la tenacità del materiale e la fibra (o supporto) che irrigidisce il materiale e fornisce resistenza agli sforzi. Si possono avere fibre lunghe o corte. La vetroresina è un materiale composito in matrice polimerica con fibre di vetro.

Processi tecnologici come trasformazioni

Per fare una trasformazione serve tempo, il tempo implica che una macchina e il suo operatore sono occupati e la macchina, maggiore è il tempo di lavorazione e maggiore è la sua usura. Il tempo quindi è un driver di costo. La traiettoria ideale di una trasformazione indica quali sono i processi e i tempi da ottenere per passare dallo stato iniziale del grezzo/semilavorato allo stato finale. Tuttavia la traiettoria reale soffre di una dispersione dovuta alla variabilità dei processi, dai quali non sempre il pezzo esce con le specifiche desiderate, addirittura può uscire uno scarto. Inoltre le trasformazioni sono influenzate anche dal semilavorato in ingresso, che non sempre ha la forma ideale, poiché è già

stato lavorato. Questa variabilità, studiata statisticamente, genera quella che è la tolleranza naturale del processo.

Quindi la tolleranza naturale del processo deve essere inferiore alla tolleranza imposta dal progettista del processo.



Nel caso in cui la variabilità del risultato ottenibile sia superiore alla tolleranza imposta si deve:

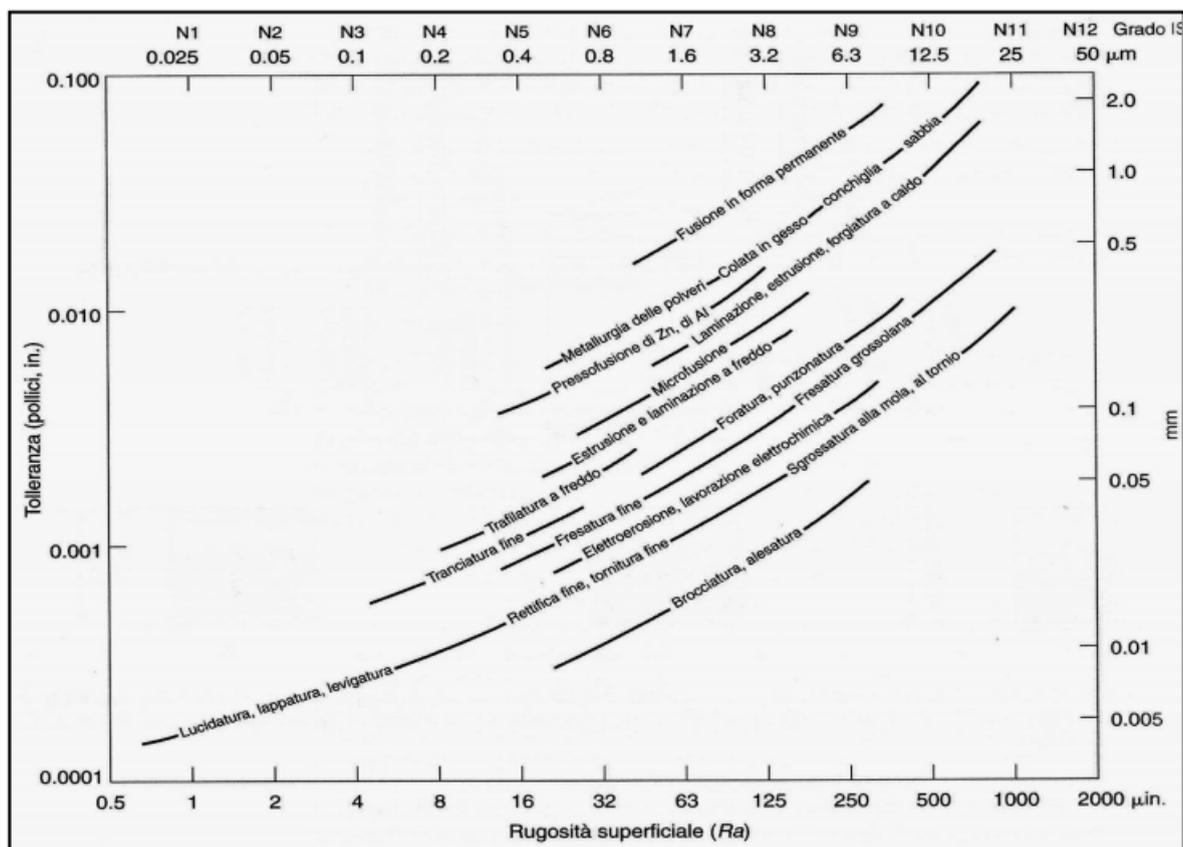
- Cambiare il progetto del prodotto
- Migliorare il processo
- Cambiare il processo
- Selezionare il prodotto (una percentuale dei prodotti sarà scarto)

Tolleranze dei processi di produzione

Quando parliamo di tolleranze dei pezzi meccanici dobbiamo tener conto di due fattori principali sono:

- La rugosità superficiale (presa come media aritmetica)
- La tolleranza geometrica

Il grafico rappresenta i limiti ottenibili da alcune lavorazioni, la zona di maggior precisione di lavorazione è quella in basso a sinistra.

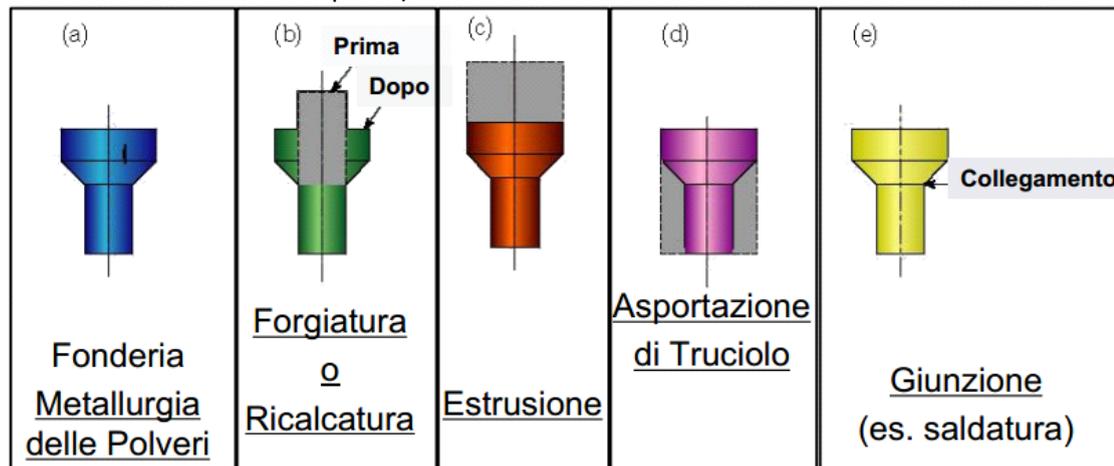


I processi meno precisi sono quelli di fonderia, quelli con precisione media sono quelli di deformazione e infine quelli più precisi sono i processi di asportazione, infatti sono processi di finitura nell'ambito del processo.

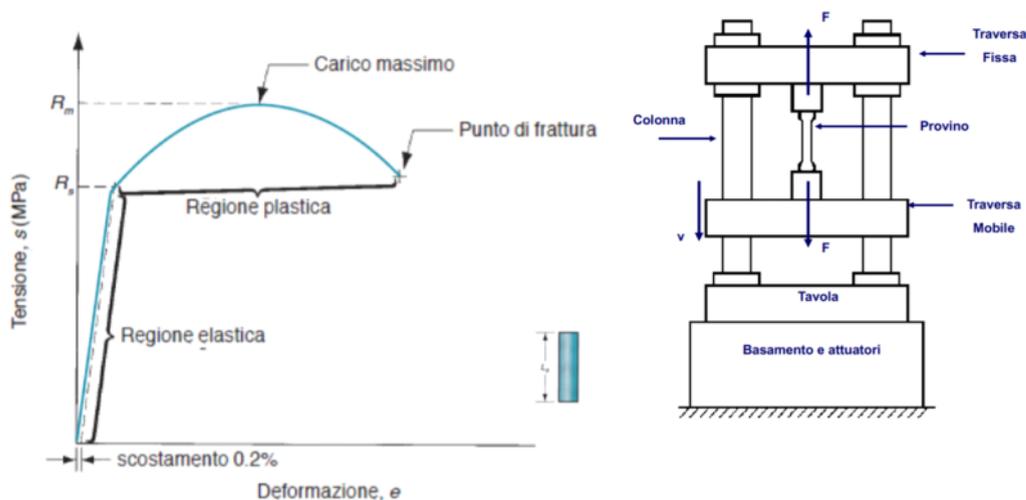
Note finali

Non esiste mai un solo modo per realizzare un determinato pezzo, ci sono sempre delle alternative tecnologiche. La scelta del processo da usare è dovuta dalla tolleranza che il prezzo deve avere, il

prezzo del processo, la disponibilità di macchinari, la facilità di realizzazione (influenzata da materiale e dimensioni del pezzo).



1.2 - La prova di trazione



Di interesse per il corso della prova a trazione è il campo plastico, ovvero la seconda metà della curva che inizia dopo allo snervamento. La curva raggiunge il suo carico massimo in quello che è il punto di strizione, punto dal quale la deformazione si localizza e il provino inizia ad avere una forma di clessidra. Nel punto di strizione compaiono anche gli altri sforzi del tensore, che prima di quel punto potevano essere assunti come nulli. Lo sforzo uniassiale in direzione di trazione è:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0}$$

Ed è lo sforzo reale, a differenza dello sforzo calcolato come forza su variazione di allungamento che è lo sforzo ingegneristico. Definisco lo sforzo reale poiché, visto che s a un certo punto diminuisce, creano un legame costitutivo:

In campo elastico il legame tra sigma e epsilon è lineare, mentre in quello plastico sappiamo che il legame è dato da:

$$\varepsilon = \ln(1 + e)$$

$$\sigma = s(1 + e)$$

$$\sigma = K \varepsilon^n$$

L'esponente n viene detto esponente di incrudimento ed è minore di uno. L'incrudimento è il fatto che la sigma da applicare deve aumentare nel campo plastico perché il materiale si indurisce.

Dimostrazione, L'inizio della strizione inizia per una deformazione pari a n

L'esponente di incrudimento n è un fattore di duttilità, ovvero indica quanto un materiale può resistere prima di rompersi.

Differenziamo F , e la imponiamo uguale a zero per cercare il punto di stazionarietà: $dF = 0$

$$F = \sigma S \rightarrow dF = \sigma dS + S d\sigma$$

$$dF = 0 \rightarrow \frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{dS}{S}$$

Chiediamo che ci sia la costanza del volume (almeno nel campo plastico):

$$d(SL) = 0 \rightarrow LdS + SdL = 0$$

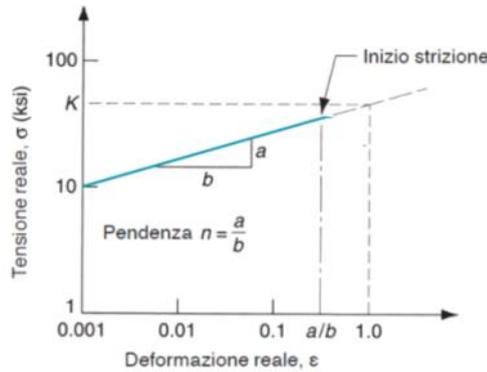
Quindi al ridursi della sezione aumenta la lunghezza. Quindi, poiché compare $-\frac{dS}{S}$ con $d\varepsilon$

$$-\frac{dS}{S} = \frac{dL}{L} = d\varepsilon$$

Quindi:

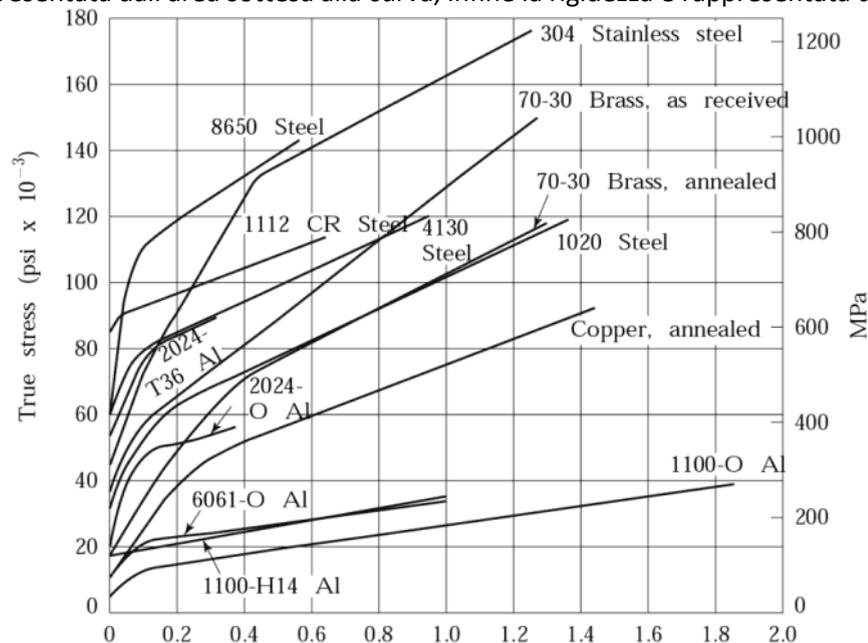
$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \left\{ \begin{array}{l} \sigma = K\varepsilon^n \\ \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = nK\varepsilon^{n-1} \rightarrow nK\varepsilon^{n-1} = K\varepsilon^n \rightarrow \varepsilon = n \end{array} \right.$$

Spesso per calcolare n si riportano i punti della prova di trazione su di un diagramma in scala logaritmica, che rende rettilineo il tratto plastico della prova.



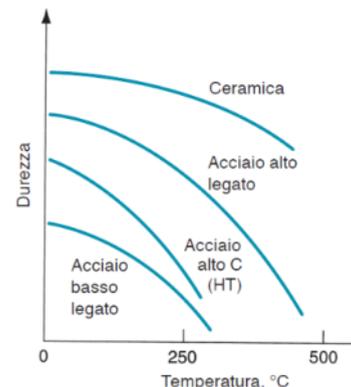
Effetti della temperatura, dello stato di tensione idrostatico

La duttilità è rappresentata dal punto finale della curva, più la curva è lunga e più il materiale è duttile; la tenacità di un materiale è rappresentata dall'area sottesa alla curva, infine la rigidezza è rappresentata dal primo tratto.



Le curve di un materiale sottoposto a riscaldamento e successiva deformazione, evidenziano l'allungamento del campo plastico e l'abbassamento del punto di snervamento; quindi le curve risultano abbassate e spostate verso destra; facendo aumentare la duttilità e riducendo la resistenza del materiale in esame.

Al surriscaldamento i materiali reagiscono in modo diverso, ad esempio i materiali ceramici, hanno bisogno di alte temperature per poter apprezzare una riduzione di durezza al crescere della temperatura, mentre acciai basso legati diminuiscono velocemente la loro resistenza all'aumentare della temperatura.



Altri fattori che influiscono sul comportamento elastoplastico del materiale sono ad esempio la pressione media che il corpo subisce (tensione idrostatica), vedremo il modificarsi infatti della curva della prova a trazione, se un provino viene testato a pressione atmosferica, a pressione più alta o più bassa. Un caso in cui la tensione idrostatica

è molto importante nel caso dei processi di estrusione, dove la macchina applica uno sforzo negativo, ovvero una pressione, su tutte le facce del pezzo.

Deformazione e velocità di deformazione

La velocità con cui deformiamo il provino influenza i dati ottenuti.

La velocità di deformazione è la derivata di epsilon rispetto al tempo.

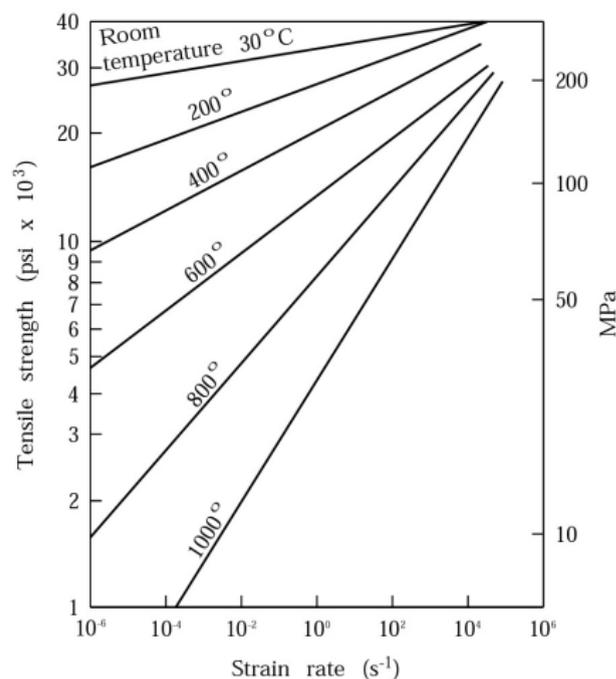
Nei vari processi vedremo che la velocità di deformazione sono molto diverse, per andare in contro alla risposta meccanica del materiale che viene processato.

Nel lavoro a freddo, la velocità di deformazione è generalmente trascurabile, quindi consideriamo sigma indipendente dal dalla velocità.

$$\sigma = k\epsilon^n \quad \text{a freddo}$$

Quando invece lavoriamo in temperatura, il materiale ricristallizza e cambia la sua struttura, questo effetto si chiama incrudimento, durante il quale il materiale perde di resistenza perché continua a riorganizzare la sua struttura cristallina, e nel caso di deformazioni sufficientemente veloci, questa non riesce a riformarsi.

All'aumentare della temperatura, sigma viene maggiormente influenzata dalla velocità di deformazione. Quindi se sono ad alte temperature, e non do il tempo al materiale di rilassarsi e riformare la struttura metallurgica, il materiale incrudisce e aumenta la sua resistenza meccanica, mentre se do il tempo al materiale di ricristallizzarsi al materiale non è apprezzabile l'effetto dell'incrudimento.



Le deformazioni a caldo sono quelle a T maggiori a 2/3 della temperatura di fusione, a tiepido sopra all' 1/3, mentre al di sotto diciamo che stiamo lavorando a freddo e quindi possiamo trascurare gli effetti della velocità di deformazione.

L'asportazione di trucioli è un esempio di lavorazione a caldo, infatti il materiale si scalda per effetto dell'attrito dell'utensile sul grezzo in lavorazione.

La prova di trazione ha dei limiti: la presenza di strizione è il principale, che non permette di raggiungere valori di sforzo reali, quindi non ci consente di avere completezza di risultati.

Prova di compressione

Riesce a misurare valori di deformazione maggiori rispetto alla prova di trazione, e ci permette di avere una valutazione della sigma sia per valori positivi di epsilon, che per valori negativi di deformazione. Si utilizzano provini cilindrici, al più anulari.

La prova di trazione ha il difetto di non darci sempre il comportamento del materiale in trazione, infatti non sempre i materiali hanno comportamento simmetrico, inoltre gli attriti tra provino e piatto vanno considerati e non sono eliminabili, anche se sono riducibili con soluzioni quali la lubrificazione, la lucidatura del provino, o l'interposizione di un foglio di teflon tra piatto superiore e provino.

In generale lo stato di deformazione e quindi anche di sforzo non è uniassiale, come nel caso della prova di trazione nel tratto a deformazione omogenea, quindi per risolvere il problema ci si riferisce ad uno stato di sforzo e di deformazione equivalenti e indichiamo la relazione costitutiva con il pedice f per sottolineare che la utilizziamo per prevedere il flusso del materiale

$$Y_f = K \epsilon_f^n$$

Nel caso della prova di compressione abbiamo che $\epsilon_f = |\epsilon_1|$

Tuttavia non vogliamo creare una relazione per ogni prova a cui possiamo sottoporre un materiale, quindi sfruttiamo le relazioni Tresca-von Mises, in cui abbiamo l'espressione di uno sforzo equivalente come la somma di tre differenze quadratiche del tensore degli sforzi, infatti gli sforzi si riferiscono alle direzioni principali.

$$Y_f = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}$$

Il tensore degli sforzi rappresenta uno stato di sforzo triassiale, in cui: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$

Nella prova di trazione, compare solo il σ_1 .

Campo elastico

Le relazioni tra le tensioni e le deformazioni nel campo elastico sono:

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

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

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

Che nel caso della prova di trazione diventano:

$$\sigma_1 > 0; \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E}$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_3 = -\nu \frac{\sigma_1}{E}$$

Dove ν è il rapporto di Poisson:

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

Modelli costruttivi reologici dei materiali

Nella trattazione della plasticità, facciamo spesso delle semplificazioni, ad esempio un materiale particolarmente duttile, senza incrudimento (alta temperatura, processo lento) è ammissibile la semplificazione a materiale rigido. Plastico perfetto, approssimando la σ ad una costante.

Per considerare gli effetti della velocità e della temperatura a partire dalla legge $\sigma = K \epsilon^n$ si usa moltiplicare la relazione per la velocità di deformazione a un suo esponente che ci dice quanto sigma dipende dalla velocità.

$$\sigma = K \epsilon^n \dot{\epsilon}^m$$

Questa relazione si semplifica a seconda dei casi:

- Lavorando a freddo, $m=0$;
- Lavorando a caldo con bassa velocità, $n=0$
- Lavorando a caldo e ad alte velocità di deformazione, $\begin{cases} n \leq 0.1 \\ m \leq 0.1 \end{cases}$

Per generalizzare ulteriormente la relazione, possiamo esprimere n , m , k in funzione della temperatura:

$$\sigma = K(T) \epsilon^{n(T)} \dot{\epsilon}^{m(T)}$$

Meccanica della deformazione plastica

Come prima cosa mettiamo in evidenza quelle che sono le principali differenze tra la deformazione elastica e quella plastica:

1. Le deformazioni elastiche sono transitorie, ovvero scompaiono quando viene tolto il carico, mentre quelle plastiche sono permanenti
2. In campo elastico lo stato tensionale e il campo deformativo sono legati biunivocamente, noto uno si può ricavare l'altro. Questo non vale in campo plastico, infatti il comportamento delle deformazioni dipende dalla storia di deformazione subita dal materiale stesso

Relazioni fra tensioni e deformazioni in campo plastico

A partire dalla meccanica della deformazione plastica, bisogna fare 3 considerazioni per poter ricavare una relazione efficace che descriva le tensioni e le deformazioni:

1. Le equazioni devono avere un carattere incrementale per tenere conto del cammino di deformazione;
2. Non sono ammesse variazioni permanenti di volume: $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = 0 \rightarrow \nu = \frac{1}{2}$
3. Al posto della costante E deve essere presente una quantità variabile che tenga conto del cammino di deformazione che il materiale ha già percorso.

La forma generale di queste deformazioni è:

$$d\epsilon_1 = d\lambda \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \right)$$

$$d\epsilon_2 = d\lambda \left(\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)$$

$$d\epsilon_3 = d\lambda \left(\sigma_3 - \frac{\sigma_2 + \sigma_1}{2} \right)$$

Dove il termine $d\lambda$ tiene conto della storia deformativa pregressa del materiale. Questo termine, nel caso di comportamento rigido plastico è stato ricavato indipendentemente sia da Levy che da von Mises.

Imponendo quindi la costanza del volume e esprimendo il modulo di plasticità:

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = 0 \rightarrow v = \frac{1}{2}$$

$$\frac{Y_f}{d\epsilon_f} = \text{modulo di plasticità}$$

Si possono scrivere le deformazioni come:

$$d\epsilon_1 = \frac{d\epsilon_f}{Y_f} \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \right)$$

$$d\epsilon_2 = \frac{d\epsilon_f}{Y_f} \left(\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)$$

$$d\epsilon_3 = \frac{d\epsilon_f}{Y_f} \left(\sigma_3 - \frac{\sigma_2 + \sigma_1}{2} \right)$$

Da cui quindi ricaviamo:

$$\begin{cases} Y_f = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ d\epsilon_f = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(d\epsilon_1 - d\epsilon_2)^2 + (d\epsilon_2 - d\epsilon_3)^2 + (d\epsilon_3 - d\epsilon_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases}$$

Sforzo di flusso medio

Si preferisce in virtù dello sforzo di flusso, poiché il materiale durante la deformazione incrudisce, quindi per evitare le complicazioni modellistiche viene calcolato come il valore medio nella curva di sforzo di deformazione dal valore iniziale a quello finale. Questo può anche essere letto come il rapporto tra il lavoro di deformazione e la deformazione stessa.

$$\bar{Y}_f = \frac{1}{\epsilon_{fin}} \int_0^{\epsilon_{fin}} \sigma d\epsilon = \int_0^{\epsilon_{fin}} K \epsilon^n d\epsilon$$

$$\bar{Y}_f = \frac{K \epsilon_{fin}^n}{1+n}$$

La temperatura nelle lavorazioni di deformazione plastica

La temperatura e la velocità di deformazione influenzano il tipo di lavorazione:

- A freddo, temperatura ambiente
- A tiepido, temperatura inferiore a quella di ricristallizzazione
- Formatura a caldo, superiore alla temperatura di ricristallizzazione ma a bassa velocità
- Isotermica

$$v = \frac{dL}{dt} \quad \frac{v}{L} = \frac{dL}{Ldt} = \frac{d\epsilon}{dt} = \dot{\epsilon}$$

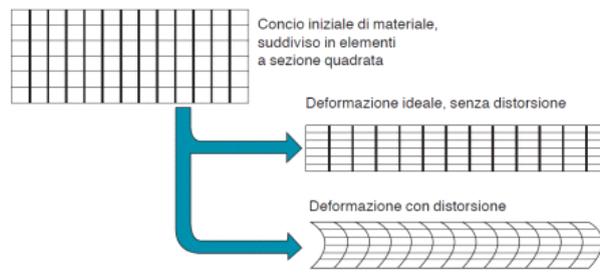
Valori tipici in diverse lavorazioni

Process	True strain	deformation rate (1/s)
Lavorazioni a freddo		
Forgiatura, laminazione	0.1-0.5	0.1-100
trafilatura	0.05-0.5	0.1-100
Explosive forming	0.05-0.2	10-100
Lavorazioni in temperatura		
Forgiatura, laminazione	0.1-0.5	0.1-30
estrusione	2-5	0.1-1
Machining	1-10	0.1-100
Sheet-metal forming	0.1-0.5	0.05-2
Superplastic forming	0.2-3	10^{-4} - 10^{-2}

Lavoro di deformazione

Il lavoro di deformazione si suddivide in tre parti:

- Lavoro ideale, prodotto da una deformazione senza deformazioni
- Lavoro di attrito
- Lavoro ridondante, dovuto alle distorsioni



La presenza di attrito nel materiale aggiunge delle problematiche nello studio del lavoro e nel deformare il materiale stesso:

- Il flusso del metallo viene rallentato causando possibili difetti
- Le forze e le potenze di lavorazioni aumentano
- Gli utensili si usurano maggiormente
- Si riduce la precisione dimensionale

Nel valutare il lavoro totale quindi dobbiamo tenere conto delle altre componenti:

$$L_{tot} = L_{id} + L_{att} + L_{rid}; \quad \eta = \frac{L_{id}}{L_{tot}}$$

La relazione integrale per il calcolo del lavoro di deformazione plastica parte dal lavoro elementare di deformazione, ovvero quello che serve per deformare un volume elementare:

$$L_{el} = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}$$

Integrando poi il lavoro elementare su tutto il dominio spaziale otteniamo in lavoro di deformazione:

$$L_g = \int_V L_{el} dV$$

In particolare, per calcolare il lavoro nei casi pratici:

Lavorazioni a freddo
Legge di Hollomon

$$\bar{\sigma} = k \cdot \bar{\epsilon}^n$$

$$L_{el} = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \bar{\sigma} \cdot d\bar{\epsilon} = K \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \bar{\epsilon}^n \cdot d\bar{\epsilon}$$

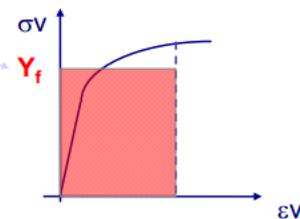
$$L_{el} = K \cdot \frac{\bar{\epsilon}^{n+1}}{n+1} = \frac{K \bar{\epsilon}^n}{n+1} \cdot \bar{\epsilon} = \frac{\bar{\sigma}}{n+1} \cdot \bar{\epsilon} = Y_f \cdot \bar{\epsilon}$$

Lavorazioni a caldo

$$\bar{\sigma} = C \cdot \dot{\bar{\epsilon}}^m$$

$$L_{el} = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \bar{\sigma} \cdot d\bar{\epsilon} = \bar{\sigma} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} d\bar{\epsilon} = \bar{\sigma} \cdot \bar{\epsilon}$$

Sollecitazione media di flusso



Tipologie ed effetti di attrito

Un attrito troppo elevato, dovuto a temperature e pressioni, può portare all'aderenza, specie nel caso di formatura a caldo, che diventa strumento di trasporto completo della deformazione.

Le forze di attrito dipendono da:

- Pressione di contatto
- Velocità relativa
- Materiali
- Rugosità
- Lubrificanti
- Temperatura
- Cambiamento di forma delle superfici

Gli effetti principali dell'attrito sono:

- Limita il flusso di materiale nelle zone vicine al contatto
- Ha un effetto distorcente

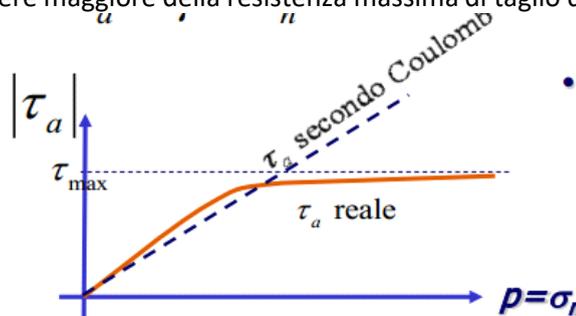
$$\tau_a = \frac{f_a}{A}; \quad \sigma_n = \frac{f_n}{A}$$

Questi sono solo stress apparenti poiché l'area di contatto reale è sempre molto inferiore all'area nominale, per via delle asperità delle superfici

Modello coulombiano

$$f_a = \mu \cdot f_n; \quad \tau_a = \mu \cdot \sigma_n$$

Questo modello in realtà è limitato, infatti vale solo se le pressioni in gioco non sono molto elevate, inoltre l'andamento della τ_a nel modello coulombiano è crescente, mentre sappiamo dalla pratica che questa non può mai essere maggiore della resistenza massima di taglio del materiale più tenero.



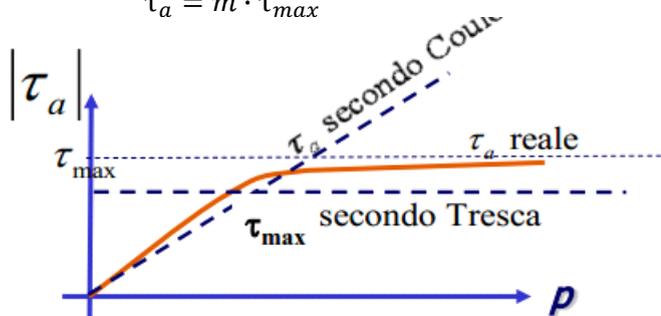
Modello dell'attrito di Tresca

Questa modellazione tiene conto del massimo sforzo di taglio ammissibile, infatti secondo von Mises

$$\tau_{max} = \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$$

E quindi la relazione tiene conto del fattore di attrito m:

$$\tau_a = m \cdot \tau_{max}$$

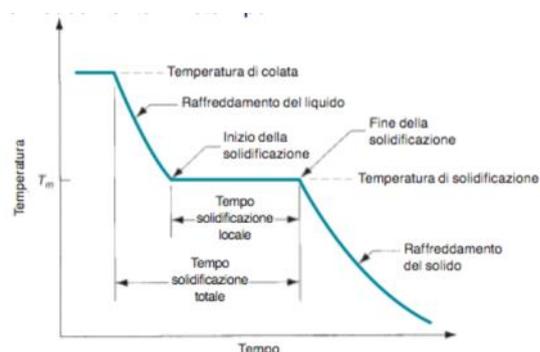


2.1 - Fondamenti della colata dei materiali

I processi di fonderia vedono il passaggio di un metallo dallo stato solido a una completa fusione, per poi essere colato in uno stampo e solidificare nuovamente. Sarebbe preferibile da un punto di vista tecnico, del comportamento più semplice e della qualità metallurgica, l'utilizzo di metalli puri; tuttavia questo non è possibile e si ricorre, nel campo ingegneristico, alla colata di leghe metalliche, dal comportamento più complesso ma che garantiscono proprietà fisiche del materiale per certi versi migliori (ad esempio le leghe di alluminio, le leghe di acciaio...)

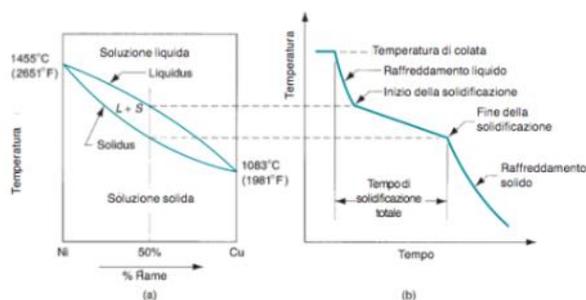
Tempo di raffreddamento

Partendo dalla temperatura di colata, si cola il materiale nella forma di fonderia dove comincia il suo raffreddamento per conduzione con parete della forma, fino al raggiungimento della "melting temperature" (T_M), la temperatura di fusione; dove inizia ad avvenire la solidificazione. Poiché il raffreddamento avviene per contatto con la parete della forma, avremo che durante il processo di solidificazione il materiale sia un semisolido, con presenza di liquido e solido. Per i metalli puri inoltre la solidificazione è una trasformazione isoterma. Dopo la completa solidificazione possiamo estrarre il pezzo dalla forma, per velocizzare il processo di raffreddamento.



Tuttavia per una lega la curva di solidificazione è più complessa, poiché i costituenti della lega hanno T_M diverse. Identificheremo sul grafico due curve, in funzione del tenore di uno dei costituenti della lega. La prima è la curva di "liquidus", curva dalla quale inizia la solidificazione, la seconda è quella di "solidus", dalla quale il metallo si è completamente solidificato. Per le leghe non abbiamo una transizione isoterma, ma abbiamo una transizione che avviene nell'intervallo di temperature di liquidus e solidus.

Curva di raffreddamento - leghe:



La solidificazione di una lega avverrà per accrescimento dendritico, ovvero delle lamelle di materiali partono dalla parete e "avanzano" fino al centro del liquido.

Lo spessore del materiale non è quindi costante, ma delle profusioni ortogonali alla parete, dette dendriti, stratificano il materiale.



Nel caso reale il fronte dendritico nel suo accrescimento potrebbe formare delle camere chiuse, ovvero delle bolle di metallo liquido circondate da metallo solido. Queste camere di liquido diventeranno poi delle porosità nel pezzo finito, poiché il metallo solidificandosi si contrae, intaccando

alcune proprietà meccaniche del prodotto lavorato. Si vuole che l'accrescimento dendritico sia lento per evitare la formazioni di queste; tale accrescimento è facilitato dalla differenza di temperatura tra liquidus e solidus.

L'accrescimento dendritico è presente anche nei metalli puri, dipende dalla velocità di solidificazione.

La velocità di solidificazione, fissata la lega, dipende dalla forma utilizzata (materiale, spessore, presenza o meno di canali di raffreddamento).

Nelle forme di sabbia, dove il raffreddamento è più lento, poiché il materiale della forma è poco conduttivo, si ha una maggiore tendenza alla formazione dendritica.

In una forma metallica permanente si ha una minor tendenza alla formazione di dendriti, poiché la forma metallica diventa un buon conduttore termico.

Quindi il caso migliore sarebbe quello di metallo puro colato in forma metallica.

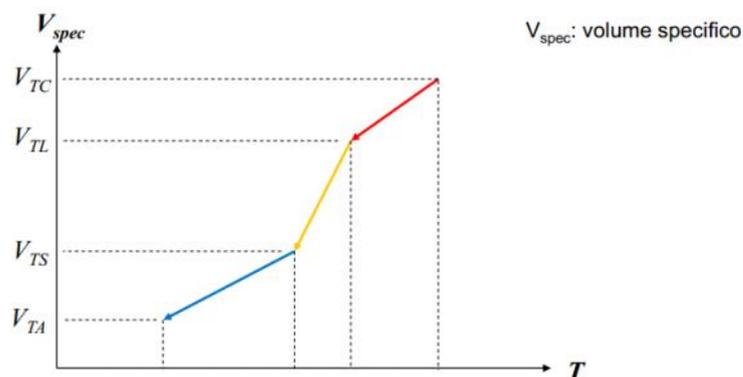
La formazione dendritica porta ad avere materiali anisotropi, ovvero materiali per i quali le proprietà meccaniche variano da punto a punto. Un altro difetto che comporta l'accrescimento dendritico è la microsegregazione.

Il tempo di raffreddamento inoltre viene influenzato dalla massa complessiva del pezzo e dalla superficie di scambio termico del pezzo.

Per superficie di scambio si intende quella che scambia più calore con l'ambiente, ad esempio un pezzo appoggiato su un tavolo in metallo, avrà come parete di scambio quella di appoggio, mentre un pezzo appoggiato su un tavolo di un materiale refrattario allo scambio termico, scambierà per convenzione dalle altre facce libere.

Il ritiro e le tensioni

Il ritiro del materiale nei tre stadi del processo è la diminuzione del volume del materiale durante il raffreddamento. Ne incontriamo 3: durante il raffreddamento in fase liquida, durante la fase di solidificazione e infine durante il raffreddamento in fase solida (rappresentati dalle 3 frecce sul grafico)



Spesso per fare le misurazioni del fenomeno si opta per un metodo direzionale anziché volumetrico; ovvero si misura la riduzione di dimensione apprezzabile solo su una direzione e non su tutte e tre. Il rapporto tra il volume e superficie di scambio termico, M (modulo termico), ci indica, se è molto elevato un corpo massivo, al contrario un M piccolo indica un corpo sottile. Un corpo sottile si raffredda più velocemente di un corpo massivo.

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \propto \frac{1}{M} \cdot (T - T_A)$$

Riducendosi il gradiente termico si riduce anche la derivata temporale.

Su due pareti a contatto si possono anche generare delle Tensioni perché esse hanno due moduli termici diversi, quindi si raffreddano con velocità diverse e la superficie comune tenderà ad assecondare il comportamento di entrambi i corpi, subendo così i ritiri differenti.

La colata

È un processo che può avvenire in gravità, se appunto il metallo viene colato nella forma sfruttando la forza gravitazionale, in sorgente, se si sfrutta la pressione e la spinta metallo statica o si può avere una colata in piano. Il componente realizzato tramite colata si chiama grezzo o getto.

La forma è l'insieme di tutti i dispositivi e le attrezzature che entrano in gioco nella colata.

Distinguiamo da subito due tipi di colata:

- In forma transitoria, per ogni nuovo componente andrà costruita nuovamente, quindi la colata è adatta a produzioni in serie limitata.

- In forma permanente, dove lo stampo viene riutilizzato più volte (numero idealmente infinito). Ha una sua vita che dura tra le 1000 e le 10000 colate prima di dover subire un restauro. Lo stampo sarà di materiale metallico, con un punto di fusione più alto del materiale fuso che inseriremo e con una forma tale per cui non si formino sottosquadri (ovvero dei problemi di estrazione del pezzo dalla forma).

Il processo quindi è composto da:

- Fabbricazione della forma (una tantum se permanente, ogni volta se transitoria),
- Colata vera e propria,
- Solidificazione del materiale,
- Rottura della forma (se transitoria) e estrazione del pezzo.

Il processo tipico di fonderia è la colata in sabbia, tuttavia altre lavorazioni moderne sono la microfusione, la colata in gesso, la colata in polistirene espanso...

I sottosquadri: (citati sopra) si possono presentare sia in forme permanenti impedendo l'estrazione del pezzo dalla forma; che nelle forme transitorie, anche se in questo caso il problema riguarda l'estrazione del modello dalla forma. È importante notare che una cavità nel pezzo sarà sempre in sottosquadro, quindi per creare nello stampo queste cavità vengono utilizzate le anime.

Prodotti

Può essere usata per creare forme complesse sia esternamente al pezzo che internamente. Alcune tecniche di fonderia sono in grado di produrre pezzi net shape, ovvero che non necessitano asportazione di parte del metallo per avere un grado adeguato di finitura, anche se normalmente la tolleranza naturale dei processi di fonderia richiede lavorazioni di finitura successive (processi near net shape).

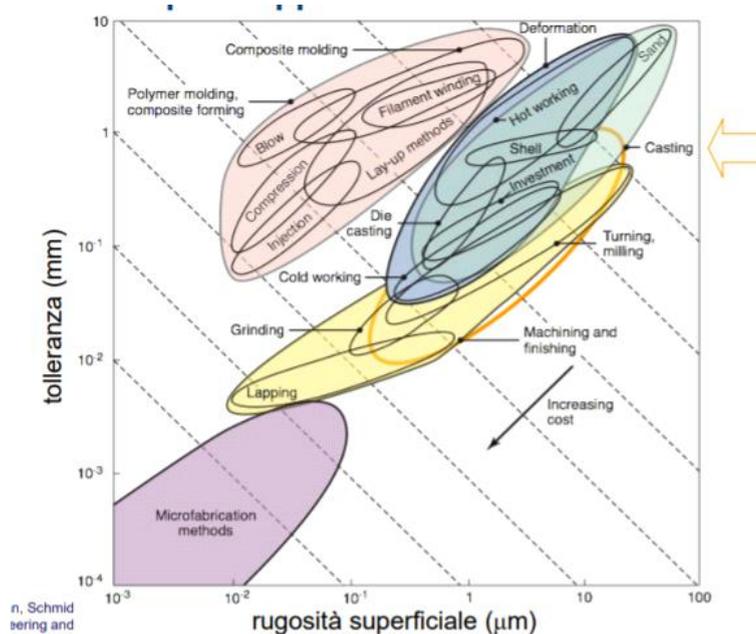
Un altro vantaggio della colata è la produzione di pezzi di grandi dimensioni (alberi di trasmissione navali...) tuttavia le grandi dimensioni dei pezzi comportano un maggior rischio di formazione di vuoti per il lungo tempo raffreddamento.

Idealmente la colata può essere fatta su qualsiasi metallo, tuttavia ci sono metalli che rendono questo processo più vantaggioso; infatti metalli con un elevato coefficiente di ritiro si prestano poco ai processi di fonderia, o anche metalli molto viscosi allo stato liquido non sono vantaggiosi nei processi di fonderia. (colabilità, punto di fusione, coefficiente di ritiro termico, dendriti)

Leghe di alluminio con silicio (punto di fusione abbassato dal silicio) e altre leghe sono ad esempio più adatte.

Campo di applicazione

A seconda della tecnica utilizzata, si possono ottenere tolleranze dimensionali e rugosità superficiali piccole.

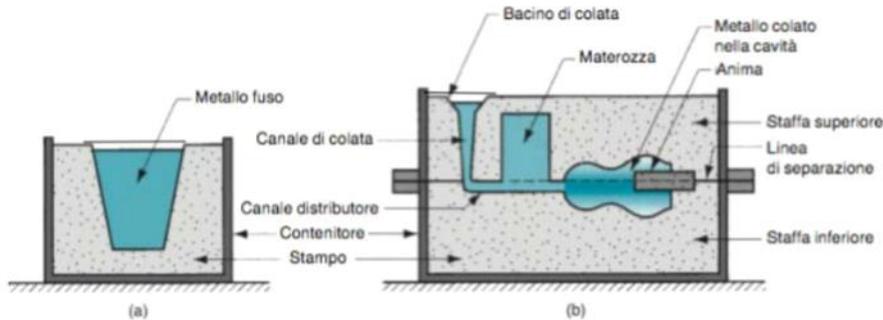


Criticità e limiti applicativi

- Proprietà meccaniche dei getti.
- Tensioni termiche di ritiro e residue.
- Porosità dei getti.

- Scarsa precisione dimensionale.
- Scarsa finitura superficiale.
- Sicurezza operatore durante la lavorazione dei metalli ad alte temperature.
- Problematiche ambientali ed energetiche.

Processo di colata



Schema del processo di colata della fonderia in terra:

- Staffe (superiore e inferiore) separate da un piano di separazione
- Contenitori, contengono la terra di fonderia
- Dentro la forma abbiamo la semi cavità della staffa superiore e quella della staffa inferiore che formano:
 - o Bacino di colata, imbocco del canale di colata.
 - o Il canale di colata, punto di iniezione del metallo
 - o Canale distributore, posto normalmente sul piano di distribuzione delle staffe e per semplicità costruttiva solitamente è orizzontale
 - o Materozza, serbatoio di metallo liquido che compensa il ritiro in fase liquida. Contiene un "eccesso" di metallo liquido per rifornire il pezzo di materiale fuso mentre si restringe. È progettata dal tecnico del processo e deve raffreddarsi più lentamente del pezzo e contenere sufficiente materiale per compensare il ritiro.
 - o Cavità, contiene il pezzo
 - o Anima, servono a creare cavità nel pezzo, sono aggiunte successivamente poiché le anime sono sempre in sottosquadro, quindi non possono essere create con il modello, altrimenti verrebbero distrutte nell'estrazione.

Fusione e colata, riscaldamento del metallo

L'energia termica richiesta per riscaldare il metallo ad una temperatura di fusione sufficiente è la somma dei seguenti termini:

1. Il calore necessario ad aumentare la temperatura fino al punto di fusione;
2. Il calore latente di fusione per convertire il metallo da solido a liquido;
3. Il calore per aumentare la temperatura del metallo fuso affinché possa essere versato, cioè abbia la fluidità necessaria alla colata

Supponendo che il calore specifico non vari al variare della temperatura, che la temperatura di fusione sia unica (quindi risulta un modello non applicabile alle leghe) e che durante il riscaldamento non venga scambiato calore con l'ambiente:

$$H = \rho V \left\{ \overbrace{C_s(T_M - T_0)}^1 + \overbrace{\hat{H}_f}^2 + \overbrace{C_l(T_P - T_M)}^3 \right\}$$

H: calore totale [J]

H_f: calore latente di fusione [J/g]

T_m: temperatura di fusione del metallo [° C]

T₀: temperatura iniziale [° C]

T_p: temperatura di colata [° C]

ρ: densità metallo [g/cm³]

V: volume metallo da riscaldare [cm³]

C_s: calore specifico metallo solido [J/g*° C]

C_l: calore specifico metallo liquido [J/g*° C]

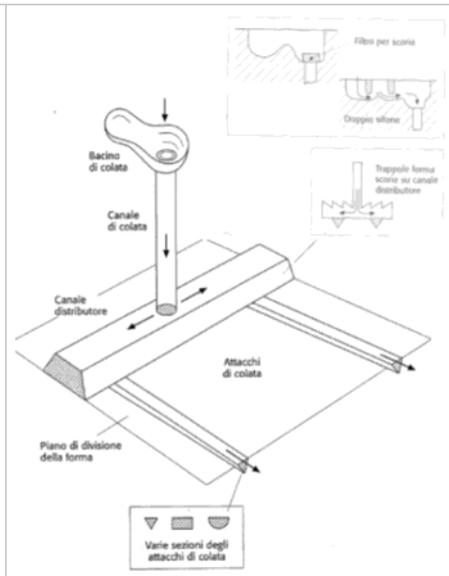
Il tempo di colata deve essere inferiore al tempo di solidificazione del pezzo, per permettere al metallo di riempire completamente la forma di fonderia, questo tempo è influenzato da:

- Temperatura di colata, a temperature alte aumenta il tempo di solidificazione, ma anche la fluidità del metallo e il costo energetico aumenta.
- Velocità di colata, a alte velocità si riduce il rischio che il materiale solidifichi prima che la forma sia piena, tuttavia si ha il rischio di turbolenze, erosioni della forma e intrappolamenti di aria.

Il sistema di colata

In generale è composto:

1. Bacino di colata, normalmente il metallo da crogiolo viene colato sul bordo del bacino di colata, così che il metallo sia idealmente fermo prima di entrare nel canale di colata, inoltre posso inserire delle "trappole" per fermare le scorie che galleggiano sul metallo.
2. Canale di colata, normalmente cilindrico
3. Canale distributore o collettore
4. Attacchi di colata



Analisi ingegneristica della colata

La velocità di colata viene impressa dal Δh del canale di colata.

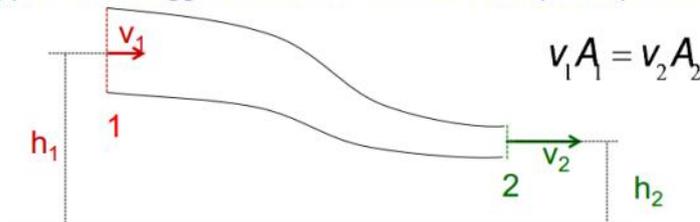
Vogliamo ora analizzare come determinare l'area della sezione trasversale del canale di colata.

Legge di continuità, assumendo un fluido incomprimibile, una forma/ stampo con pareti impermeabili, la massa di fluido che passa in ogni sezione nell'unità di tempo, portata volumetrica Q , è costante:

$$Q = vA = \text{cost}$$

Q : portata volumetrica [cm^3/s].
 v : velocità del metallo [cm/s].
 A : area della sezione trasversale del canale attraversato dal liquido [cm^2].

Applicando la legge di continuità a due sezioni qualunque del canale:



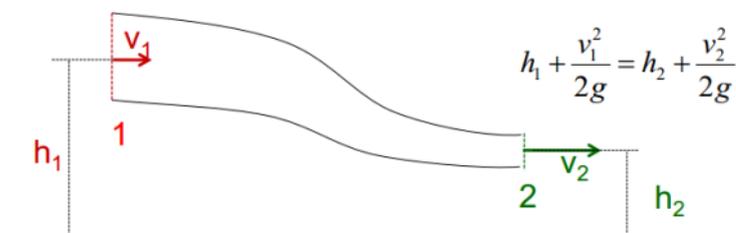
NOTABENE PER ESAME!!!!

Teorema di Bernoulli: la somma delle energie potenziale, di pressione, cinetica è costante.

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

h : altezza del liquido [cm]
 p : pressione sul liquido [N/cm^2]
 ρ : densità metallo [g/cm^3]
 g : costante di accelerazione gravitazionale - 981 [cm/s^2].

Applicando la legge di Bernoulli a due sezioni qualunque del canale:



Non considero in prima approssimazione gli attriti e le variazioni di pressione dovute al materiale colato.

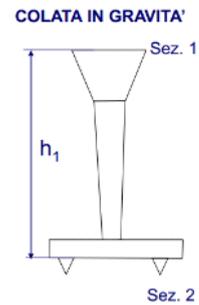
Colata in gravità

Possiamo dire che la velocità iniziale sarà nulla, consideriamo h_1 l'altezza del canale dalla linea di separazione delle staffe, quindi, per la legge di Bernoulli:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{con} \quad \begin{cases} v_1 = 0 \\ h_2 = 0 \\ h_1 = \text{altezza pelo libero} \end{cases}$$

Quindi:

$$v_2 = \sqrt{2gH} \quad \text{con} \quad H = h_1$$



Notiamo che la velocità durante il processo di riempimento non è costante ma mano a mano rallenta.

FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

Colata in sorgente

All'attacco di colata, considerando nulla la velocità al bacino nulla:

$$v_{2,t_0} = \sqrt{2gh_1}$$

A fine colata:

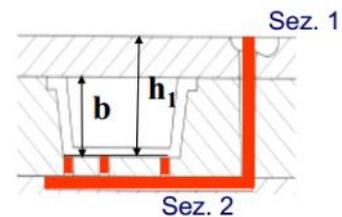
$$v_{2,t_f} = \sqrt{2g(h_1 - b)}$$

Velocità media:

$$v_2 = \sqrt{2gH_{sorgente}}$$

$$\text{con} \quad H_{sorgente} = \left(\frac{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_1 - b}}{2} \right)^2$$

COLATA IN SORGENTE



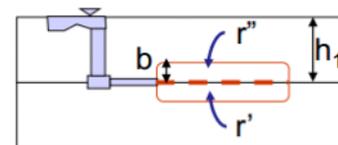
Colata in piano

Per metà è una colata in gravità, poi diventa una colata in sorgente, ovvero il liquido arriva da sotto

$$v_2 = \sqrt{2gH_{piano}}$$

$$\text{con} \quad \sqrt{H_{piano}} = \frac{1}{\left(\frac{r'}{\sqrt{H_{gravità}}} \right) + \left(\frac{r''}{\sqrt{H_{sorgente}}} \right)}$$

Colata in piano



Dove r' e r'' sono espressi in rapporti e non come percentuali.

Nella fonderia è importante non avere un distacco della vena fluida dalla parete, quindi siamo interessati a ridurre l'area del canale di colata per non avere discontinuità.

Conoscendo questi fattori possiamo quindi, sapendo il volume da riempire e sapendo la velocità di colata, calcolare il tempo di colata.

Deve essere considerato un tempo minimo, perché quest'analisi non considera le perdite dovute all'attrito e le eventuali costrizioni del flusso nel sistema di colata

$$T_{MF} = \frac{V}{Q}$$

Gli attacchi

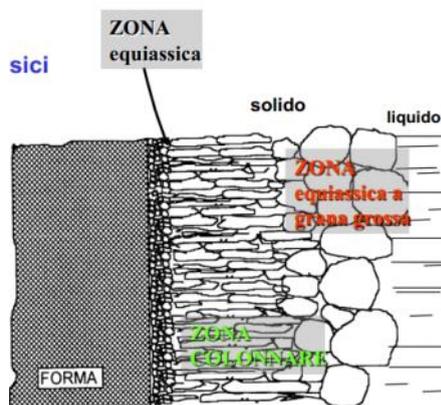
I collegamenti tra canale distributore e forma si chiamano attacchi, gli attacchi più usati sono quelli a pettine, dal basso a sella e dal basso a sorgente, tuttavia esiste anche la colata dall'alto a pioggia ma comporta un rischio elevato di gocce.

Solidificazione e raffreddamento, il tempo

Gli aspetti legati alla solidificazione del getto comprendono il tempo di solidificazione, la solidificazione direzionale, la progettazione della materozza e i fenomeni di ritiro.

Come visto, il metallo si solidifica formando dei grani, a partire dalla superficie a contatto con la forma, fino ad arrivare al centro del pezzo. Questo fatto comporta che la solidificazione non sia omogenea. Infatti a contatto con la parete, abbiamo un gradiente termico elevato (ΔT) che permette il formarsi quasi istantaneo di una crosta di materiale solida, costituita da grani fini e ed equiassici. Tuttavia, la successiva formazione di strati che procedono dall'esterno verso il cuore del pezzo, comporta una diminuzione del gradiente termico e quindi un tempo di solidificazione più lungo. L'allungarsi del tempo di solidificazione fa sì che i grani abbiano si dispongano lungo la

direzione del flusso termico e di assumere forme più allungate. In queste zone possono presentarsi delle anisotropie per il materiale. Infine, l'allungarsi ulteriore dei tempi di solidificazione nel cuore del pezzo, a causa di gradienti termici bassi, fa sì che il flusso termico non sia direzionato e che i grani diventino grossi e equiorientati.



La struttura finale di un getto fuso, implica però che lo schema descritto sopra per il raffreddamento avvenga contemporaneamente da ogni faccia del getto a contatto con le pareti della forma. Per uniformare la struttura metallurgica del pezzo, ridurre le disuniformità microstrutturali e per garantire che la grana rimanga fine (che garantisce buone caratteristiche meccaniche) è auspicabile un'elevata velocità di raffreddamento per ; ottenibile con pezzi con spessori ridotti, per favorire quelli che sono gli effetti di bordo o una forma con una buona rugosità, infatti una forma scabra peggiora la finitura superficiale del getto, ma garantisce un migliore scambio termico. L'esempio fatto per i metalli puri vale identicamente per le leghe metalliche, dove tuttavia la struttura metallurgica finale dipende anche dal tenore dei costituenti di lega.

La solidificazioni delle leghe e dei metalli puri richiede del tempo e il tempo di solidificazione totale (t tale che il pezzo solidifichi) può essere calcolato secondo la legge di Chvorinov, che tiene conto della forma (materiale di cui è fatta e le sue proprietà fisiche), delle proprietà termiche del metallo colato e della temperatura di colata. Questa legge empirica è;

$$T_{TS} = C_m \cdot M^n \text{ con } \begin{cases} T_{TS} \text{ tempo di solidificazione totale} \\ M \text{ modulo termico} \\ n \text{ esponente adimensionale sperimentale (di solito = 2)} \\ C_m \text{ costante sperimentale della forma} \end{cases}$$

Non vogliamo tuttavia utilizzare un modulo termico unico per il pezzo, ma spesso scegliamo di scomporre il pezzo in parti, di cui risulta facile calcolare il modulo termico.

Per calcolare il modulo termico delle parti che compongono il pezzo finito calcoliamo:

$$M_x = \frac{\text{Volume}}{\text{superficie scambiante}}$$

$$M_{sfera} = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3}{4\pi R^2} = \frac{R}{3}$$

$$M_{cilindro} = \frac{\pi R^2 H}{2\pi R^2 + 2\pi RH} = \frac{1}{2\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{H}\right)}$$

Il modulo termico di un cilindro è importante nel caso applicativo poiché le materozze hanno tipicamente forma cilindrica.

Possiamo anche calcolare il modulo termico di una piastra:

$$M_{piastra} = \frac{b \cdot a \cdot S}{2ab + 2aS + 2bS} \approx \frac{S}{2}$$

Poiché facendo i conti nella considerazione di una piastra, con i lati molto più grandi dello spessore e semplificando, resta solo quello come termine che influenza il risultato.

Il ritiro

Il ritiro in fase liquida si misura attraverso il ritiro volumetrico percentuale:

$$r_V = \frac{V_{TC} - V_{TS}}{V_{TC}}$$

Per il ritiro in fase solida invece calcoliamo un ritiro lineare:

$$r_l = \frac{L_{TS} - L_{TA}}{L_{TS}}$$

In tutti i processi a caldo, il ritiro in fase solida da delle problematiche nella pianificazione del processo. Quindi dobbiamo utilizzare i coefficienti di contrazione lineare per decidere quanto più grande deve essere la forma per ottenere un pezzo della dimensione desiderata.

Metallo	Contrazione lineare	Metallo	Contrazione lineare	Metallo	Contrazione lineare
Leghe di alluminio	1.3 %	Magnesio	2.1 %	Acciaio al cromo	2.1 %
Ottone giallo	1.3 % - 1.6 %	Leghe di magnesio	1.6 %	Stagno	2.1 %
Ghisa grigia	0.8 % - 1.3 %	Nichel	2.1 %	Zinco	1.6 %
Ghisa bianca	2.1 %	Acciaio al carbonio	1.6 % - 2.1 %		

Le problematiche legate al ritiro non sono solo legate alla dimensione finale del pezzo. Considerando il ritiro in fase liquida, supponendo di voler creare un cilindro. Appena finita la colata, sulle pareti della forma si forma lo strato di crosta, ma nel mentre si sta anche raffreddando tutto il pezzo, quindi il pezzo sta subendo un ritiro. Al passare del tempo ad esempio abbiamo un abbassamento del pelo libero. Anche quando il pelo libero inizia a solidificare, nel cuore del pezzo avremo ancora del metallo fuso, che subirà ancora un effetto di ritiro. Il ritiro che subisce il cuore del pezzo, va a creare quella che è chiamata cavità di ritiro, ovvero una cavità che si forma per la contrazione in fase liquida del pezzo, che crea degli spazi vuoti nel cuore del getto che sta solidificando. Le cavità di ritiro possono essere causate dalla formazione dendritica, come abbiamo visto precedentemente.

Infine anche la formazione di gas all'interno della lega, infatti la solubilità di alcuni gas nei materiali metallici (ad esempio l'idrogeno nelle leghe di alluminio) decresce bruscamente nel passaggio liquido-solido. Questo comporta la formazione di microporosità o microcavità nel solido.

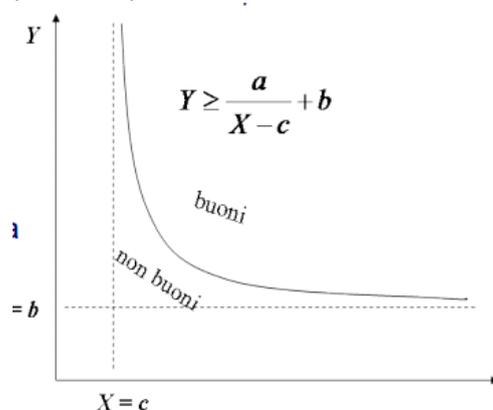
La materozza, progettazione

La materozza deve essere commisurata al pezzo, vogliamo che solidifichi circa con il getto stesso e quindi deve avere un modulo termico simile al modulo termico del pezzo. Quindi andiamo a definire due rapporti, che verranno utilizzati sugli assi del diagramma di Caine:

$$X = \frac{M_m}{M_p}; \quad Y = \frac{V_m}{V_p}$$

Tendenzialmente il modulo termico della materozza sarà uguale o al massimo il doppio di quello del pezzo. Inoltre per motivi economici non vogliamo che il volume della materozza sia troppo grande, al fine di non scartare troppo materiale.

Queste relazioni possono essere rappresentate sul diagramma di Caine, che separa la regione dei pezzi difettosi da quella dei pezzi buoni.



La curva, ricavata sperimentalmente che divide il piano in due regioni, ha equazione:

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

Il coefficiente di contrazione b si ricava ipotizzando che la velocità di raffreddamento della materozza sia infinitamente più piccola della velocità di raffreddamento del pezzo, quindi il volume della materozza necessario a contrastare il ritiro del getto è pari alla contrazione del pezzo stesso:

$$x = \frac{M_m}{M_g} \rightarrow \infty \text{ allora: } y = \frac{V_m}{V_g} = b$$

Allo stesso modo si ricava la velocità di raffreddamento relativa c, infatti supponendo che getto e materozza solidifichino con la stessa velocità di raffreddamento e x tenda a c, allora il volume della materozza tenderà all'infinito

$$x = \frac{M_m}{M_g} \rightarrow c \text{ allora } y = \frac{V_m}{V_g} \rightarrow \infty$$

È possibile dimostrare che sia migliore una materozza bassa e larga.

Per migliorare il modulo termico della materozza, senza aumentarne il volume possiamo ricorrere a materozze coibentate, ovvero le isoliamo termicamente affinché disperda meno calore.

Esistono tipi di materozze diverse, ad esempio le abbiamo a cielo aperto e cieche, tendenzialmente quelle cieche disperdono meno calore; e di forme anche diverse dalla forma cilindrica. Le materozze cieche hanno una cupola, non finiscono piatte.

Le materozze cilindriche sono quelle più efficienti, infatti fissato un valore di X sono quelle con modulo termico più alto.

Dimostrazione:

Rapporto di forma $\delta = \frac{H}{D}$ $x = \frac{M_m}{M_p}$ $y = \frac{V_m}{V_p}$

$$M_m = \frac{V_m}{S_m} = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 H}{\pi D H + \frac{\pi}{4} D^2} = \frac{DH}{4H+D} = \frac{D \cdot \delta}{4\delta+1} \quad D = \frac{4\delta+1}{\delta} M_m \quad \text{ma } M_m = x \cdot M_p$$

$$y = \frac{V_m}{V_p} = \frac{\frac{\pi}{4} \delta}{V_p} D^3 = \frac{\frac{\pi}{4} \delta (4\delta+1)^3}{V_p \delta^3} M_m^3 = \frac{\pi M_p^3 (4\delta+1)^3}{4 V_p \delta^2} x^3$$

$$y = f(x) = k \cdot x^3$$

Non c'è il 2 nella formula della superficie di scambio, perché una delle superfici di scambio è a contatto con il pezzo, quindi non scambia calore. Anche la superficie di base superiore scambia molto poco.

Studiando quindi l'andamento di Y in funzione dell'unica variabile libera, il δ ; vediamo che:

Studiamo la dipendenza da delta:

$$y = \frac{\pi M_p^3 (4\delta+1)^3}{4 V_p \delta^2} x^3$$

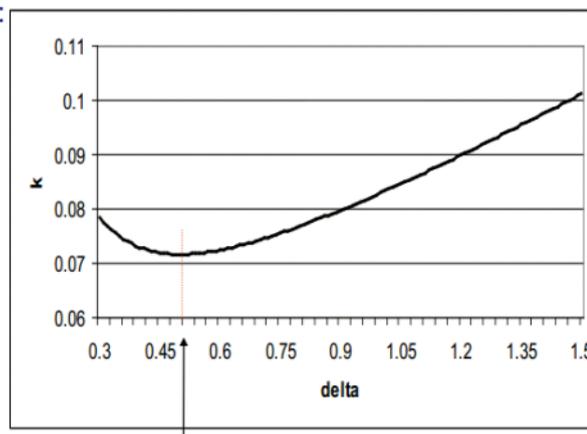
ovvero

$$y = f(x) = k \cdot x^3$$

con

$$k = \frac{\pi M_p^3 (4\delta+1)^3}{4 V_p \delta^2}$$

$$\frac{\partial k}{\partial \delta} = \frac{\pi M_p^3 (4\delta+1)^2 2\delta-1}{2 V_p \delta^2 \delta}$$



Minimo in 0.5

Si osserva pertanto che la materozza con delta 0.5 è più efficiente

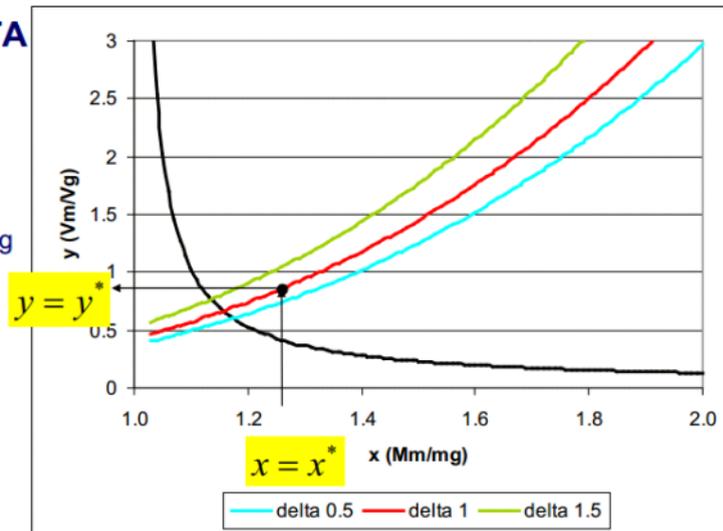
Le curve a isodelta, disegnate sul diagramma di Caine ci fanno vedere che per un delta di 0.5 avremo sempre la soluzione più vantaggiosa

Curve ISODELTA

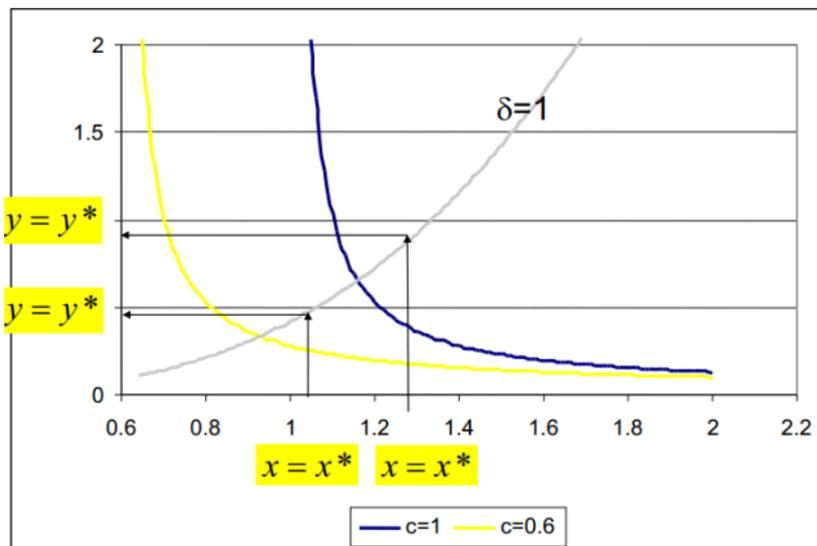
Una volta:

- scelto il rapporto δ
- fissato $x = x^*$

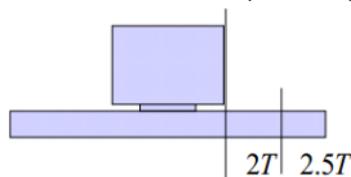
si ricava $y = y^* = V_m/V_g$



Una materozza coivettata consente di avere rese maggiori:



Progettando la materozza bisogna anche tenere in considerazione il raggio di influenza, al di là del quale si perde l'alimentazione della materozza. In prima approssimazione si può usare la legge empirica secondo cui, in una piastra, la materozza copre in un raggio di influenza 2 volte e mezzo lo spessore per l'effetto di bordo e due volte lo spessore per la sola materozza.



Le spinte metallostatiche

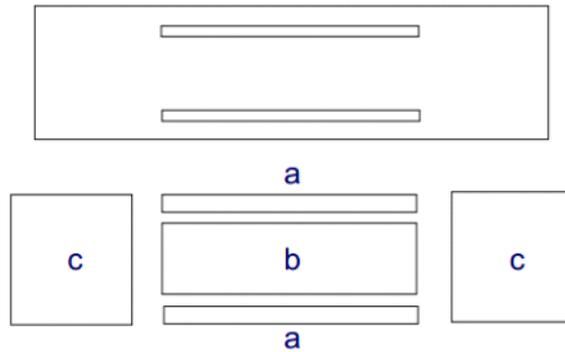
È una pressione esercitata dal metallo liquido sulla parete superiore, che tende a far sollevare la staffa superiore, quindi per contrastare la spinta nel caso in cui questa sia sufficiente da contrastare la staffa superiore, si applicano dei contrappesi e si fissano le staffe superiore e inferiore.

Tensioni termiche

Durante il raffreddamento allo stato solido, si possono generare quelle che sono tensioni di ritiro (in fonderia come per qualsiasi lavorazione a caldo).

Prendendo una piastra piana con due asole e supponendo trascurabile lo sforzo sull'asse dello spessore, vogliamo capire la direzione di σ_1 in direzione assiale. In generale lo stato di sforzo dovuto alle tensioni non sarà piano ma tridimensionale.

Dividiamo quindi la nostra piastra in 5 corpi, 2 corpi sottili a , due corpi massicci c e uno intermedio b



Possiamo iniziare notando che la quantità di calore da scambiare nel raffreddamento è proporzionale alla superficie di scambio:

$$\Delta Q \propto S \cdot (T - T_A) \cdot \Delta t$$

Abbiamo detto che il modulo termico di un corpo esprime la sua velocità di raffreddamento, e sappiamo che la quantità di calore che il corpo deve scambiare per raffreddarsi è proporzionale alla massa del getto per il suo calore specifico c_p

$$\Delta Q \propto m \cdot c_p \cdot \Delta T = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Da cui:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \propto \frac{S}{V} \cdot (T - T_A) = \frac{(T - T_A)}{M_g} \text{ con } M = \frac{V}{S}$$

Quindi la velocità di raffreddamento è proporzionale alla differenza di temperatura tra corpo e ambiente, divisa per il modulo termico del corpo.

Immaginando per semplicità che i corpi a siano a sezione quadrata, abbiamo:

$$M_a = \frac{V_a}{S_a} = \frac{H_a^2 L}{4LH_a} = \frac{H_a}{4}$$

$$V_b = H_a H_b L$$

$$S_b = 2LH_a + 2LH_b$$

$$M_b = \frac{H_a H_b}{2(H_a + H_b)}$$

Quindi

$$\frac{M_b}{M_a} = \frac{2}{\frac{H_a}{H_b} + 1}$$

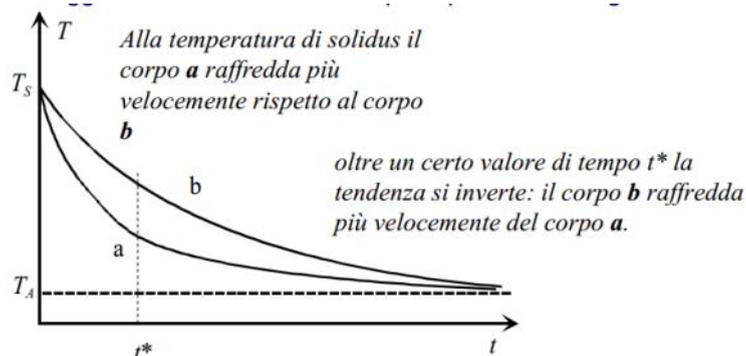
Dato che $H_b \gg H_a$

$$\frac{M_b}{M_a} \approx 2 \rightarrow M_b > M_a$$

Quindi, poiché la legge che lega le grandezze in gioco è:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \propto \frac{1}{M} (T - T_A)$$

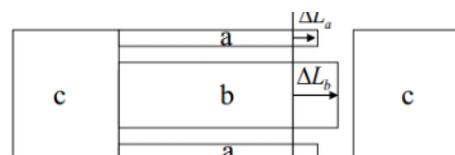
Abbiamo che il raffreddamento è di tipo esponenziale negativo, in cui il corpo a ha velocità raffreddamento più elevata di b fino a un certo istante t^*



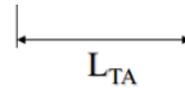
Supponendo i due corpi liberi, l'allungamento assiale seguirebbe la legge:

$$\Delta L_a = L_{TA} \alpha (T_a - T_A)$$

$$\Delta L_b = L_{TA} \alpha (T_b - T_A)$$



Con temperature T_a e T_b diverse durante il processo, quindi allungamenti diversi.



Dato che però i corpi sono vincolati al corpo c, saranno istante per istante in equilibrio; infatti questi avranno la stessa lunghezza L in qualsiasi istante, tuttavia avremo che il corpo a è allungato di δL_a , detta sollecitazione di trazione, mentre il corpo b è accorciato di δL_b , detta sollecitazione di compressione. Questo ovviamente non è il caso generico, ma è il particolare istante in cui il corpo a si sta raffreddando più velocemente di b e quindi ha velocità di ritiro maggiori.

Nelle lavorazioni a caldo in generale, nello specifico nei processi di fonderia; le tensioni possono creare tre situazioni diverse:

- Nessuno dei due corpi si sforza al punto tale da passare in campo plastico
- La sollecitazione di uno dei due corpi o entrambi entrano in campo plastico
 - o Non è insolito, lo sforzo di snervamento a caldo è più basso
 - o Il corpo incrudisce
 - o Il corpo resta più lungo, perché si è plasticizzato. Una volta tornati a temperatura ambiente il corpo resterà in stato permanente di tensione residua dovuta al ritiro, poiché il corpo a cui è vincolato lo comprime nella posizione e nella dimensione di progetto. La tensione residua può generare dei problemi, in particolare potrebbe portare a una distorsione del corpo e deformare il getto. Il problema è critico in pezzi lunghi, infatti se le velocità di raffreddamento sono fortemente differenti nella sezione trasversale possono mostrare deflessioni a freddo per scaricare le tensioni residue (tipico nelle travi a T)
- La sollecitazione di uno dei due corpi supera il limite di rottura. Si generano delle cricche a caldo che portano alla rottura del pezzo.

Per evitare la formazioni di cricche da calore, si usa imporre raccordi con raggi ampi. Il raggio di raccordo ovviamente deve tenere conto anche delle lavorazioni successive.

2.2 - Processi di colata

I metodi di fonderia sono in numero molto elevati, sia in forma transitoria che in forma permanente. Il processo tradizionale è in sabbia o terra da fonderia; detta al verde perché è un processo in cui si lavora con polveri non essiccate.

Colata in sabbia

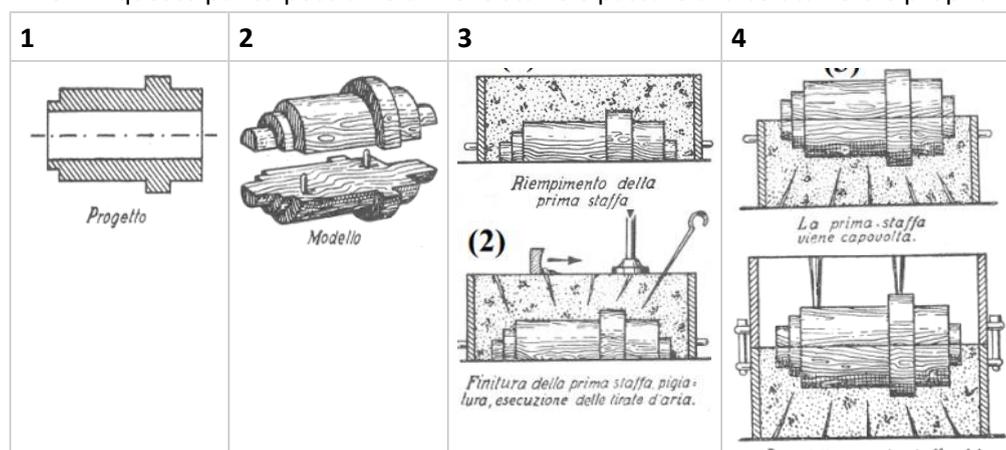
È un processo che consiste nel colare metallo fuso in una forma costruita in sabbia, una volta che il getto solidifica la forma viene rotta e il grezzo estratto. Idealmente tutte le leghe metalliche possono essere impiegate in questo processo, inoltre anche il processo stesso è molto versatile poiché permette di ottenere pezzi di un vasto range di dimensioni e di produrre dal singolo pezzo alle grandi serie di pezzi.

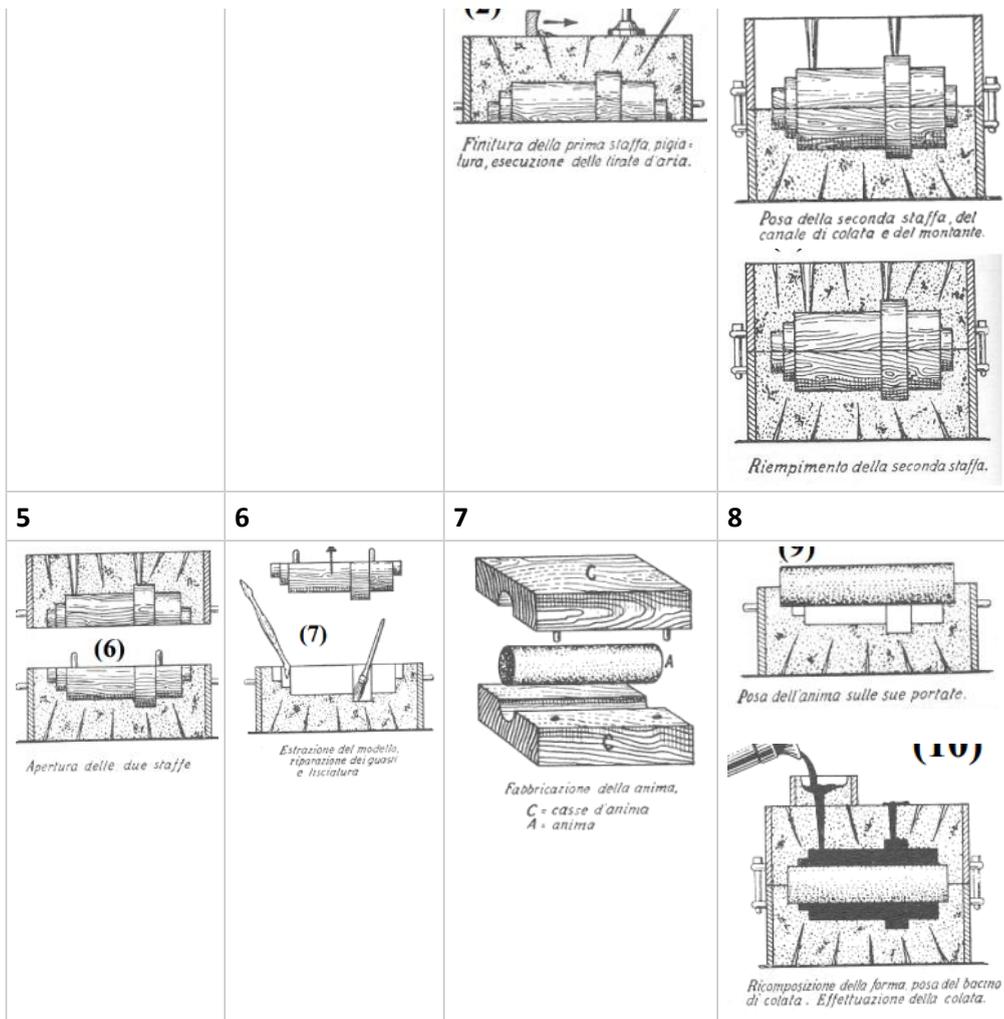
NOTABENE PER ESAME!!!!

Formatura

Il processo di formatura consiste in tutte quelle fasi che ci servono per creare la forma.

1. Inizia con il progetto del pezzo che ci arriva dal progettista, progetto su cui dobbiamo apportare delle modifiche pensando a quelle che sono le lavorazioni successive (sovradimensionare il pezzo per le finiture, creare gli angoli di sforno) e le problematiche che comporta il processo di fonderia (raccordare o smussare gli spigoli vivi per evitare formazioni di cricche).
2. Il progetto viene quindi convertito in un modello, un oggetto, solitamente in legno, che rappresenta il pezzo che serve per poi creare le cavità della forma. Il modello è costituito solitamente da due parti collegate da spine di centraggio. Le parti possono essere anche più di due come vedremo in seguito.
3. Posizioniamo quindi una delle due parti del modello sul tavolo da lavoro, le mettiamo intorno la staffa, quindi iniziamo a riempire la staffa dall'alto e compattiamo. Possiamo anche aggiungere, alla fine del riempimento della forma, sulla parte inferiore della forma delle tirate d'aria, canali creati nella forma per far sfiatare gas che si liberano in fase liquida.
4. Ribaltiamo la prima staffa, accoppiamo la metà superiore del modello con la parte nella staffa inferiore, posizioniamo la staffa superiore e riempiamo, creando anche in questo passaggio il canale di colata e il canale di risalita (riser) nella seconda metà della forma. In questo passaggio viene anche creata la materozza.
5. A questo punto separiamo le staffe e rimuoviamo il modello dalla forma. Il processo di rimozione del modello è la sformatura, per eseguirlo serve che sul modello ci siano quelli che sono gli angoli di sforno, ovvero che le pareti perfettamente verticali del progetto, siano in realtà angolate verso l'esterno, per evitare che la parete perfettamente verticale eroda la forma durante la sformatura.
6. Rifiniamo la forma se è necessario.
7. Se il pezzo ha delle cavità interne, come nel nostro progetto, dobbiamo inserire l'anima nella forma. l'anima come abbiamo detto va prodotta separatamente, perché le cavità e i fori nel pezzo sono sempre in sottosquadro. L'anima viene prodotta nella cassa d'anima e deve essere inserita nella forma prima di chiuderla. Quindi creazione del modello in legno si deve prevedere l'inserimento delle portate d'anima, ovvero gli appoggi dell'anima stessa, che non erano previste da progetto ma devono essere inserite dal progettista del processo.
8. A questo punto possiamo unire le staffe e passare alla colata vera e propria.

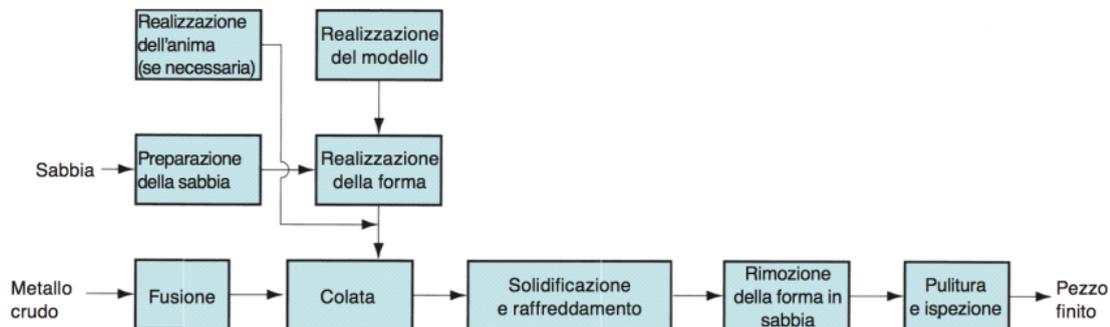




FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

Le macro fasi del processo

È un processo considerato particolarmente economica.



Come detto il modello viene creato in due sezioni separate, quindi se il processo di creazione della forma è automatizzato, si preferisce utilizzare le placche modello, poiché sono più semplici da manovrare da sistemi automatici, ovviamente questo fatto produrrà sicuramente del sovrametallo, che andrà rimosso in lavorazioni successive.

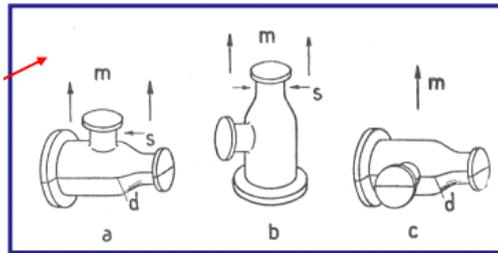
Il modello può essere, oltre che in legno, in plastica o metallo, a seconda della vita che il modello deve avere e dei mezzi a disposizione per lavorare il modello (legno più facile da lavorare, metallo/plastica risentono meno dei fattori atmosferici di usura.). Nel crearlo si deve tenere necessariamente conto sia dell'aggiunta di sovrametallo per consentire lavorazioni successive, che del ritiro in fase solida

Estraibilità

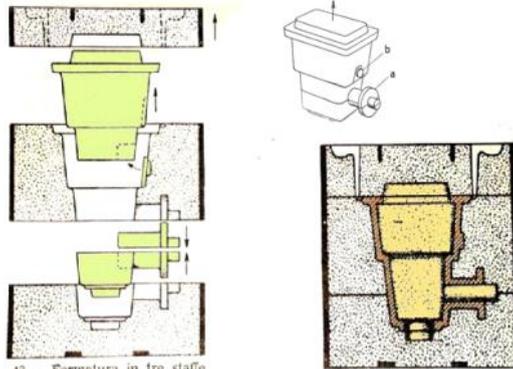
Il modello deve essere estraibile, quindi si devono prevedere gli angoli di sformo, inoltre serve che la rugosità sia bassa, così che non rovini la forma durante lo sformo e non devono esserci sottosquadri. I sottosquadri sono la problematica maggiore, perché bisogna capire sia come evitarli che come estrarre le parti potenzialmente in sottosquadro.

Bisogna quindi capire inizialmente capire come posizionare il pezzo rispetto al piano di divisione

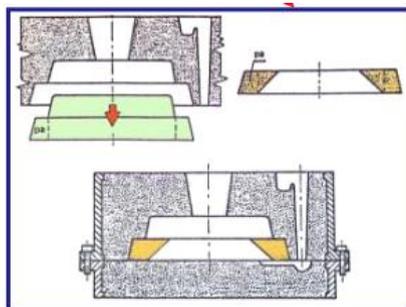
delle staffe per non avere sottosquadri:



Quando i sottosquadri non sono eliminabili semplicemente orientando in modo diverso il pezzo, bisogna pensare altri metodi risolutivi, ad esempio suddividere la forma (quindi il modello) in 3 staffe (o anche 4)



Un terzo approccio per risolvere un sottosquadro è quello di utilizzare dei tasselli. Se abbiamo una porzione di forma in sottosquadro, posso produrre separatamente quella porzione della forma, come si fa per la produzione delle anime. Vediamo quindi che non solo i fori o le cavità del pezzo vengono prodotti con parti aggiuntive, ma anche altre superfici geometriche. Quindi l'anima è un tipo di tassello.

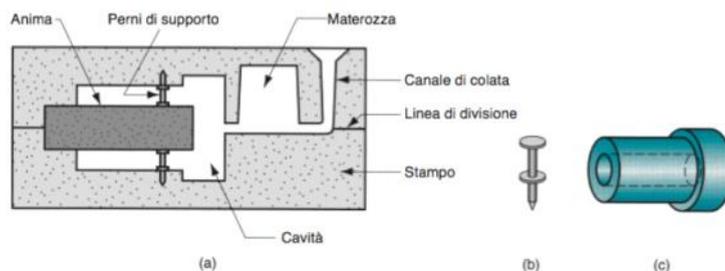


Le anime

Particolari tipi di tasselli, rappresentano il modello dei volumi interni del pezzo; ovvero servono per produrre fori nei getti, che possono essere passanti, quindi saranno appoggiate su due portate d'anima; ma anche un foro cieco.

Questa tipologia di fori crea delle problematiche poiché l'anima può essere messa in posizione su un solo supporto con il rischio che le spinte metallostatiche la spostino o la deformino. Per ovviare a questo problema si possono utilizzare dei perni di supporto o delle armature metalliche interne all'anima. Dobbiamo avere anche una portata d'anima profonda, quindi vogliamo che una buona porzione dell'anima sia incastrata in profondità tra le sezioni della forma quando è a sbalzo.

Una regola empirica è che il baricentro sia nella portata d'anima, per evitare che l'anima fletta sotto le spinte metallostatiche.



Nel caso in cui vengano utilizzati dei perni di supporto, questi saranno perni metallici, con temperatura di fusione maggiore della temperatura di colata e resteranno inglobati nel pezzo a

solidificazione ultimata.

Sabbia per formatura

Le sabbie da fonderia sono a base di silice e devono avere buone proprietà refrattarie, ovvero devono resistere alle temperature elevate. Una miscela tipicamente utilizzata è quella di 90% sabbia, 7% argilla e 3% di acqua.

La forma e la dimensione del grano influenza anche quelle che sono le proprietà della forma stessa, infatti:

- Grano fine: migliore finitura superficiale del pezzo
- Grano grosso: migliore permeabilità
- Grano di forma regolare: migliore porosità
- Grano di forma irregolare: migliore compattazione.

La qualità di una forma per colata in sabbia è data da:

- Robustezza: capacità di mantenere la forma originale e resistere all'erosione causata dal metallo fuso;
- Permeabilità: capacità di far fuoriuscire l'aria calda e i gas attraverso i micro-vuoti nella sabbia;
- Stabilità termica: capacità della sabbia sulla superficie della cavità di resistere all'incrinatura e alla frantumatura a contatto con il metallo fuso (non vogliamo che la sabbia cuocia)
- Cedevolezza: capacità della forma di permettere al grezzo di contrarsi senza rompersi e a fine colata essere rotta facilmente per estrarre il grezzo
- Riutilizzabilità: possibilità di riciclare la sabbia per altre fusioni.

Colata shell molding

Processo adatto a pezzi di piccole dimensioni, in cui è possibile rinunciare alla materozza. Si utilizza un guscio di sabbia ottenuto con sabbia mista a resina termoindurente per avere una forma resistente.

Per creare la forma si utilizza un contenitore, contenente una miscela di sabbia e resina. Una volta chiuso con la placca modello riscaldata, il contenitore viene ribaltato, la sabbia entra in contatto con la placca e lo strato superficiale indurisce, attaccandosi al modello e formando il guscio. A questo punto il guscio viene scaldato in forno per far indurire la forma completamente e consolidare il guscio.

Infine si uniscono le due placche modello in un contenitore attraverso, ad esempio, un morsetto, l'intercapedine del contenitore, formatasi con l'inserimento del guscio, viene riempita per evitare che le spinte metallostatiche rompano il guscio con dei materiali, ad esempio graniglia metallica.

Pro:

Il getto ha una finitura superficiale migliore rispetto alla tradizionale colata in sabbia, inoltre anche le tolleranze dimensionali sono maggiormente rispettate. La forma inoltre è più liscia di una forma tradizionale in sabbia, permettendo uno scorrimento più fluido del metallo liquido, evitando turbolenze e reflussi durante la colata. Inoltre si ottengono forme con cedevolezza sufficiente da non incrinare o rompere il getto.

Contro

La necessità di avere una placca modello in metallo rende questo processo più costoso della colata tradizionale in sabbia verde, inoltre rispetto a quest'ultima, nella colata shell molding si devono considerare anche i costi di cottura della forma.

I costi del processo non ne giustificano l'impiego per i piccoli lotti di produzione, infatti questo processo è semplicemente automatizzabile, risultando economico per le grandi serie di pezzi. È indicato per i grezzi di acciaio di dimensioni medio piccole.

Colata in polistirene espanso

Il processo utilizza una forma di sabbia pressata attorno a un modello in polistirene, che evapora quando viene colato il metallo fuso.

Il grande vantaggio di questo processo è l'inesistenza di sottosquadri, infatti nel modello sono già incluse le anime poiché il polistirene si scioglie a contatto con il metallo fuso; tuttavia il grande rischio è che la colata su polistirolo arricchisca di carbonio la lega che viene colata, con gli scarti della sua combustione.

Il modello in polistirene viene coperto di vernice refrattaria per evitare che la forma collassi durante la colata, inoltre il rivestimento fornisce una superficie liscia, per una buona finitura superficiale. È importante prevedere degli sfiati per i gas di combustione.

Per pezzi unici il polistirene è tagliato a mano, tuttavia il processo è semplicemente automatizzabile, rendendolo efficace anche per produzioni di grandi serie di pezzi.

Pro

Il fatto che il polistirene si scioglia durante la colata, quindi il modello venga distrutto, elimina la problematica dell'estrazione del modello stesso dalla forma, eliminando le problematiche dei sottosquadri e rendendo più veloce il processo.

Contro

Serve un modello per ogni getto che si va a creare, inoltre la forma deve essere sufficientemente porosa per permettere lo sfiato dei gas di combustione del polistirene, inoltre si hanno basse velocità di colata.

Impiegata nella produzione di massa di componenti di motori per automobili.

Microfusione

Altra tecnica in forma transitoria, utilizzata in diversi settori quali il design e l'oreficeria; mentre in ambito meccanico viene utilizzata per la meccanica di precisione, infatti produce pezzi in un buon range di tolleranza e con una buona finitura superficiale.

Adatta anch'essa per pezzi di piccole dimensioni, quindi spesso si utilizza per dei grappoli di pezzi e non per pezzi singoli; quindi si ha un canale di colata unico per più pezzi.

Il modello viene tipicamente fatto in cera, in cui troviamo sia il canale di colata, che gli attacchi che i pezzi raccolti a grappolo.

Il modello in cera viene rivestito di un liquido ceramico, che poi viene fatto essiccare in forno facendo fuoriuscire la cera. Il rivestimento ceramico quindi diventerà la forma in cui facciamo la colata.

I problemi di sottosquadro si presentano nel momento dell'estrazione del grappolo in cera dalla sua forma, inoltre possiamo avere dei problemi di evacuazione della cera se nel modello ci sono delle cavità.

A seconda del materiale lo spessore della parete del modello cambia, normalmente è intorno ai 0.5mm per gli allumini e 1 mm per le leghe ferrose.

Pro

Realizzazione di pezzi complessi e precisi, con un buon controllo dimensionale e una buona tolleranza, oltre alla buona finitura superficiale ottenibile. Si può recuperare la cera per creare altri modelli, inoltre evita solitamente di dover fare lavorazioni di finitura successive sui grezzi.

Contro

È un processo costoso e tipicamente molte operazioni sono manuali.

Utilizzato per la produzione di pezzi di piccola dimensione con idealmente qualsiasi tipo di metallo (tra cui anche acciai al carbonio, inossidabili e altre leghe ad alta temperatura)

Colata in gesso e in ceramica

Tecnica simile alla colata in sabbia, tranne per il materiale in cui è fatta la forma. Alternative utilizzate per ridurre i costi o i tempi di formatura.

Pro

La consistenza fluida della miscela di gesso permette al materiale della miscela di gesso di scorrere bene intorno al modello riproducendo i dettagli, inoltre il risultato è un getto dalla buona finitura superficiale, accuratezza dimensionale e con la possibilità di creare pareti sottili.

Colata in conchiglia

Colata in gravità in forma permanente.

La forma è costituita di due parti tenute in posizione da attrezzature quali pistoni idraulici che devono contrastare le spinte metallostatiche. Nello stampo abbiamo una metà che si muove con il pistone, mentre l'altra metà resta fissa.

La problematica principale è quella dell'estrazione del pezzo, infatti i sottosquadri vanno risolti, ma il fatto che la forma sia in metallo rende costosa l'aggiunta di tasselli. Inoltre bisogna vincere l'attrito di primo distacco o peggio evitare delle microsaldature, quindi a ogni nuova colata dobbiamo utilizzare uno spray distaccante per evitare ciò. Anche in questo tipo di processo possono essere utilizzate delle anime.

Normalmente l'azionamento dello stampo è orizzontale.

Vantaggi:

- Buona finitura superficiale e un ottimo controllo dimensionale,
- La solidificazione più rapida permessa dagli stampi in metallo consente di ottenere una struttura a grana fine, che corrisponde a una maggior robustezza del pezzo.

Svantaggi:

- Il processo si applica generalmente solo a metalli con basso punto di fusione.
- Le limitazioni rispetto alle forme in sabbia sono il poter creare geometrie meno complesse (a causa della necessità di aprire lo stampo ed estrarre il pezzo) e il costo dello stampo più elevato.
- Non si possono colare acciai.

Campi di applicazione:

- I processi a stampi permanenti sono di solito usati per alti volumi di produzione, che quindi consentono una forte automazione.
- Esempi di grezzi realizzati con questo processo sono i pistoni delle automobili, i corpi delle pompe e alcuni parti di aerei e missili.

Colata in bassa pressione

Coliamo il sorgente su uno stampo, non per gravità ma utilizzando dell' aria pressurizzata.

In una camera pressurizzata abbiamo il crogiolo con il metallo fuso, che deve essere tenuto o meno ad alta temperatura a seconda della velocità del processo.

I vantaggi rispetto alla colata in gravità sono ad esempio la possibilità di controllare i costituenti chimici, in particolare dell'ossigeno, che entrano in contatto con il getto durante la colata, evitando la sua ossidazione, in più rispetto alle colate in gravità in generale riduciamo i problemi di turbolenza e quindi di riempimento, evitando che si formi una struttura metallurgica disomogenea o dei vuoti d'aria.

Queste tecniche sono qualitativamente simili alla colata in terra.

Pressofusione

La colata sottopressione implica che il metallo fuso sia iniettato nello stampo permanente in pressione

La classificazione delle pressofusioni non va per la pressione di ignizione ma tiene conto della temperatura di fusione della lega impiegata.

Produce pezzi near net shape, ovvero dalle buone finiture superficiali e tolleranze dimensionali

Il processo può essere:

- A camera calda
- A camera fredda

Il processo a camera calda è usato per leghe che fondono a basse temperatura. La camera riscaldata fa parte del macchinario di presse, e viene riscaldata da bruciatori a gas

Nella conchiglia distinguiamo due metà, la parte fissa e quella mobile, alimentata da una slitta orizzontale.

Si ha la necessità di avere un distaccante e si progettano i ritiri in fase solida in modo che il pezzo resti attaccato alla parte mobile dello stampo, dove sono inseriti n estrattori, ovvero dei pistoncini che espellono in getto.

Il processo a camera fredda è usata per leghe con temperature alte di fusione. l'alluminio è la lega maggiormente utilizzata in questo processo.

Abbiamo sempre una pressa che deve tenere chiusi gli stampi ma non abbiamo la camera calda, ovvero il sistema a collo di cigno, ma abbiamo una camera di ignizione a collo d'oca che deve essere riempita per ogni colata. I tempi di ciclo sono quindi più alti, ma rimangono tempi bassi, adatti alla produzione in serie.

Le pressioni sono più alte rispetto i processi a camera calda.

La camera calda non viene utilizzata perché sarebbe troppo costosa da mantenere a livello energetico e economico quindi.

I ritiri in fase liquida devono essere compensati dal sistema di ignizione, mentre quelli in fase solida vanno calcolati e previsti. In pressofusione gli angoli di sforno possono o no esserci, a seconda delle necessità di processo e dalla profondità delle nervature. Sono tuttavia sempre più piccoli come angoli che nella colata in terra, infatti la finitura superficiale nella pressofusione è migliore, la forma viene spruzzata con un distaccante, il coefficiente di attrito acciaio alluminio è basso, inoltre anche la forma stessa ha una bassa rugosità.

Dobbiamo prevedere l'esistenza di turbolenze durante l'ignizione, che potrebbero rovinare il pezzo creando solidificazioni precoci, inoltre potrebbero iniziare a erodere la forma per effetto di attrito del getto e di fenomeni di cavitazione.

Anche in questo caso abbiamo problemi di estribilità, e sono più gravi che nella fonderia in terra perché si rischia di dover rompere il pezzo o danneggiare la forma nell'estrazione.

Lo stampo è costituita da una parte fissa, il porta stampo dove viene inserita la forma vera e propria. Una sessa macchina può quindi essere configurata per produrre più forme cambiando solo gli inserti nel portastampo.

Va pensato anche ad un sistema di espulsione dei gas, infatti l'acciaio non permette la fuoriuscita di gas attraverso la sua permeabilità.

La pressa da pressofusione è azionata da un meccanismo a ginocchiera. Le cerniere della pressa sono disposte in modo da contrastare le spinte metallostatiche e impedire che lo stampo si apra per errore.

Le forze in gioco sono elevate e devono necessariamente contrastare la pressione di ignizione, considerando quale è l'area di impronta dello stampo, ovvero l'area massima della forma del pezzo che produrremo.

Il materiale pressofuso è più compatto a livello di microporosità, inoltre il raffreddamento veloce porta ad avere una grana fine, quindi una migliore qualità metallurgica.

Vantaggi:

- Alto tasso di produzione raggiungibile e quindi processo economico per grandi quantitativi di produzione.
- Tolleranze dimensionali molto strette, dell'ordine di ± 0.076 mm per parti di piccole dimensioni.
- Buona finitura superficiale.
- Spessori molto sottili, fino a circa 0,5 mm.
- Raffreddamento rapido, che conferisce una granulometria fine e buone proprietà meccaniche al pezzo.

Svantaggi:

- Limitazioni nella geometria del componente, che deve essere estratto con facilità dallo stampo.

Campi di applicazione:

- I processi a stampi permanenti sono di solito usati per alti volumi di produzione, che quindi consentono una forte automazione.
- Esempi di grezzi realizzati con questo processo sono componenti del sistema frenante auto, cerniere per arredamento, componenti per motori elettrici e pompe.

Colata centrifuga

Lo stampo ruota ad alta velocità, viene utilizzato per produrre pezzi cavi a geometria assialsimmetrica

Il materiale fuso viene colato per gravità nello stampo che ruota, quindi il materiale si distribuisce sulle pareti. l'estrazione avviene grazie al ritiro in fase solida del getto.

La superficie interna è cilindrica, con tolleranze molto larghe. Sulla parete esterna possiamo anche realizzare pareti con feature geometriche più particolari (flange, nervature, dissipatori)

La velocità di rotazione deve essere sufficiente da contrastare la forza di gravità.

La forza centrifuga sarà quindi:

$$F_c = \frac{mv^2}{R}$$

$$\text{Forza gravità, } W [N]: \quad W = mg$$

Dove il raggio è espresso in metri, per la lunghezza dei pezzi. Il processo è apprezzato nell'industria dell'OIL and gas per l'assenza di saldature, che modificherebbero il comportamento del tubo quando in pressione.

Il G-factor si calcola come:

$$GF = \frac{F_c}{W} = \frac{v^2}{gR} = \frac{\left(\frac{2\pi RN}{60}\right)^2}{gR}$$

Possiamo quindi esprimere il numero di giri in funzione delle altre variabili.

Un elevato valore di GF permette di lavorare in sicurezza, inoltre permette di ottenere una buona compattezza del materiale intorno alla parete.

Vantaggi:

- Le colate centrifughe sono caratterizzate da alte densità, in particolare in corrispondenza della superficie dove la forza centrifuga è massima.
- La contrazione esterna dovuta alla solidificazione non è importante, poiché la forza centrifuga rialloca continuamente il metallo fuso verso la parete dello stampo durante la solidificazione. Le eventuali impurità tendono a concentrarsi sulla parete interna e se necessario possono essere facilmente rimosse mediante asportazione di truciolo.

Svantaggi:

- Controllo del diametro interni indiretto.

Campi di applicazione:

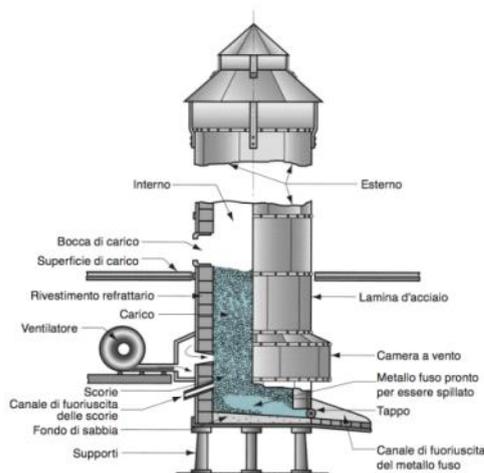
- Configurazione orizzontale: produzione di tubi non saldati di lunghezza elevata.
- Configurazione verticale: piccoli pezzi di lunghezza non superiore al due volte il diametro (la forza di gravità spinge il materiale verso il basso, contribuendo a spessori non omogenei).

I forni da fonderia

La fonderia è una delle industrie manifatturiere che richiede un consumo elevato di energia.

Forno a cubilotto

Usato per la ghisa, infatti serve una quantità elevata di carbone per raggiungere la temperatura di fusione, 0. nella struttura sono presenti sistemi di separazioni delle scorie e sistemi di areazioni



- Il carico, costituito da ferro, coke, flussante ed eventuali elementi leganti, viene inserito attraverso la bocca di carico posizionata a meno della metà dell'altezza del cubilotto.
- L'aria necessaria alla combustione del coke viene introdotta attraverso delle aperture nella parte inferiore della parete.
- Il fondente reagisce con il coke per formare le scorie. Le scorie servono a coprire il metallo fuso, proteggendolo dalle reazioni con l'ambiente interno al cubilotto e riducendo la perdita di calore.

Forni a crogiolo

Fondono il metallo senza che vi sia contatto diretto con la miscela combustibile. Usati per i metalli, esistono di diverse tipologie.

Da un punto di vista energetico abbiamo che i prodotti di combustione vengono immessi in atmosfera, inoltre nonostante le spesse pareti di materiali refrattario, abbiamo una marcata perdita di energia termica, quindi anche il calore viene scambiato con l'atmosfera. Inoltre ci sono anche complessità impiantistiche importanti.

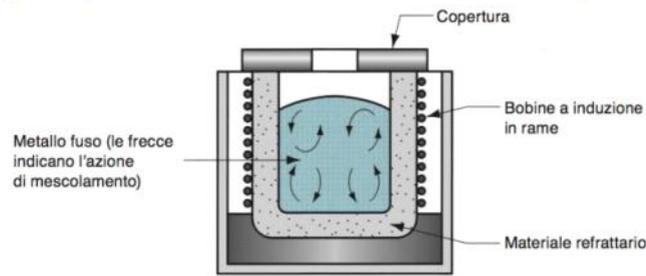


Forni a induzione

Soluzione più hi-tech; richiedono un grosso budget per essere installati, tuttavia sono energeticamente i più efficaci. Il riscaldamento avviene per induzione elettromagnetica, che oltre a scaldare i materiali, riesce anche a rimescolare il metallo fuso, producendo una massa fusa più uniforme. Tendenzialmente quindi è energeticamente il più efficace, produce un fuso

di buona qualità, inoltre è il più controllabile, poiché posso agire direttamente sull'elettricità che genera il campo magnetico, con maggior precisione rispetto a una valvola di un bruciatore.

Le bobine sono molto grandi, poiché devono necessariamente avvolgere tutto il corpo da fondere. Queste sono ciò che incide maggiormente sul costo, infatti oltre al costo del materiale in sé bisogna anche superare delle difficoltà progettuali.



Finiture e trattamenti termici

Dopo la colata vera e propria, il getto va rifinito, eliminando le sbavature dovute al piano di giunzione delle staffe, agli attacchi di colata e alla presenza delle materozze.

La superficie del pezzo va ripulita da eventuali residui di sabbia con aria compressa, dopo di che viene ispezionato il getto, riparato con riporti locali se necessario e se si ha la possibilità di eseguirla; infine avviene un trattamento termico e la spedizione. Tutti i passaggi prima di un trattamento termico successivo sono le operazioni di finitura del getto.

Qualità dei grezzi e ispezione

I possibili difetti sono:

- Incompleto riempimento della cavità, il materiale solidifica prima del termine della colata, ad esempio se vi sono zone con modulo termico troppo basso (geometrie sottili)
- Il difetto di giunto freddo, ovvero quando un canale viene alimentato da due flussi di materiale fuso, che causa una saldatura perché il metallo si è raffreddato troppo.
- Gocce fredde, il metallo è colato troppo velocemente, rimbalzando e creando delle gocce che solidificano.
- Cavità di ritiro, tanto più elevato tanto più grande è il pezzo.
- Microporosità, pori interni al materiale dovuti a un troppo rapido accrescimento dendritico, che può essere contrastato da un forte gradiente termico, senza aumentarlo troppo per evitare che il pezzo risenta di tensioni termiche. Si evita anche evitando di avere un gradiente termico costante, ovvero una geometria costante.
- Le tensioni termiche, non sono né visibili né misurabili, poiché troppo complicate da misurare, ma sono deducibili dalla presenza di distorsioni.
- Porosità superficiali, dovute all'espulsione di un gas durante il processo.

Nella fonderia in terra inoltre

- Inclusioni dovuti ai cedimenti della forma, dove la forma cede e il getto include la sabbia che ha ceduto
-
- Disallineamento delle staffe, a causa di troppo gioco durante la colata.
- Spostamento dell'anima a causa di errori progettuali

Visto che non tutti i difetti sono visibili a occhio nudo, bisogna eseguire ispezioni approfondite con strumenti adeguati. Quindi si eseguono anche misure strumentali, per verificare che le tolleranze siano nei range e che non vi siano distorsioni.

Infine abbiamo anche test metallurgici, chimici e fisici, quindi fare prove in pressione per localizzare perdite nei grezzi, fare analisi con mezzi radiografici o test con gli ultrasuoni per verificare la presenza di disomogeneità nel cuore nel pezzo.

Metalli da fonderia

I materiali tipici della colata in terra sono:

- **acciaio:** si cola relativamente bene in terra.
- **ghisa:** grazie anche all' elevata fluidità e alla relativamente contenuta temperatura di fusione, si cola facilmente in terra.
- **alluminio:** le leghe di alluminio si possono colare in terra, con qualche difficoltà in più legata alla porosità da gas
- **leghe di rame:** bronzi e ottoni si colano facilmente in terra (fonderia artistica).

Prodotti che meglio si prestano alla colata in terra sono caratterizzati da:

- geometria anche complessa ma con pareti non particolarmente sottili
- tolleranze geometriche imposte di circa +/- 0.5% – 2% della quota
- finitura superficiale imposta di circa Ra = 12–24 μm
- pesi medio-grandi
- numerosità bassa (pezzo singolo), media o alta (processo automatizzabile)
- non richiedere una elevata stabilità di progetto (semplice modifica del modello)



Angoli di sforno

Evitano che la forma si rovini durante l'estrazione

I raccordi

La presenza di spigoli vivi va assolutamente evitata. Gli spigoli si distinguono in convessi e concavi, infatti si comportano diversamente sia da un punto di vista del moto del fluido che del flusso termico. Gli spigoli concavi sono zone in cui il flusso termico tende ad aumentare, zone calde; mentre quelli convessi costituiscono una zona fredda. Per rendere più graduale la variazione dei moduli termici si utilizzano i raccordi.

Inoltre da un punto di vista fluidodinamico, gli spigoli convessi del pezzo saranno plausibilmente erosi dal getto, quindi distrutti in una forma di sabbia o erosi in una metallica.

I sovrametalli quindi possono essere aggiunti per le lavorazioni successive di finitura, per modificare il gradiente termico del pezzo, per eliminare gli spigoli vivi, per risolvere i sottosquadri o per prevenire i ritiri e per una corretta sformatura.

Costi di produzione

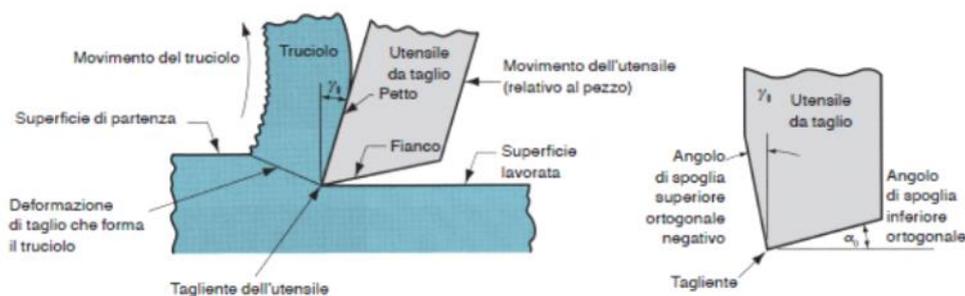
Processo	Costo			Ritmo produttivo indicativo (pz/ora)
	Forma	Sistema	Manodopera	
Pressofusione	Alto	Alto	Medio Bassa	< 200
Conchiglia	Medio	Medio	Medio Bassa	< 60
Sabbia	Basso	Basso	Medio Bassa	< 20
Shell molding	Medio Basso	Medio Alto	Medio Bassa	< 50
Microfusione	Medio Alto	Medio Basso	Alta (*)	< 1000
Centrifuga	Medio	Alto	Medio Bassa	< 50

3.1 - Asportazione di truciolo

L'analisi dei processi per asportazione di truciolo si basa sull'analisi del taglio libero ortogonale, un processo semplice da descrivere sotto i punti di vista dinamico e cinematico, che consente di capire il meccanismo elementare di formazione del truciolo, tuttavia poco usato nell'ambito industriale, per passare poi all'analisi di veri processi industriali complessi quali la tornitura, la foratura, la fresatura e la rettifica.

Come vediamo dall'immagine, possiamo identificare nell'utensile da taglio due angoli di spoglia, quello inferiore, che resterà affacciato al materiale lavorato e quello superiore, sul quale troviamo il petto dell'utensile e contro cui impatta il truciolo nell'operazione di taglio. L'angolo di spoglia superiore può essere sia positivo (più utilizzato) ma per alcuni casi viene utilizzato un angolo di spoglia negativo. L'angolo di spoglia superiore è detto γ_0 mentre quello inferiore è α_0 . L'angolo solido dell'utensile è β .

Gli angoli di spoglia negativi richiedono forze maggiori per il taglio, ma possono rivelarsi più utili in determinate situazioni. Inoltre questi utensili sono molto più massicci di quelli con angoli di spoglia positivi, proprio per resistere meglio al maggiore sforzo a cui vengono sottoposti.

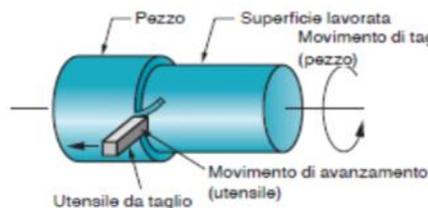


Angolo di spoglia superiore positivo

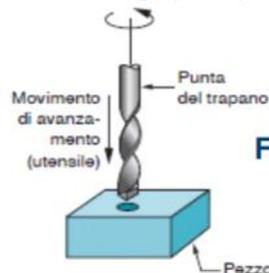
Angolo di spoglia superiore negativo

Le operazioni di asportazione si distinguono sia per il tipo di tagliante utilizzato (monotagliante nel caso della tornitura, bitagliante come nel caso della foratura o multitagliante come per le frese nella fresatura), che per il tipo di moto di taglio utilizzato e ovviamente anche per il risultato del processo.

Tornitura

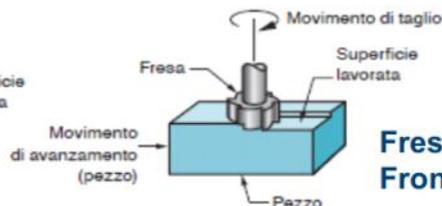


Movimento di taglio (utensile)



Foratura

Fresatura Periferica



Fresatura Frontale

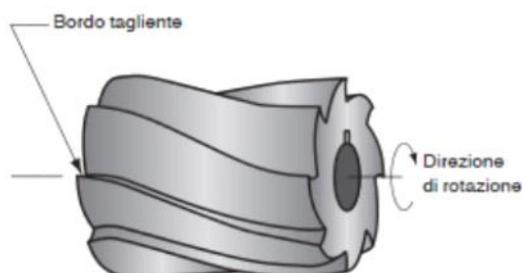
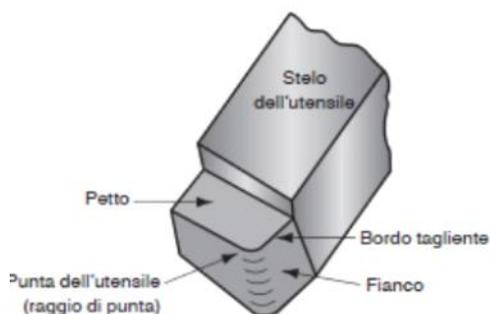
Nella tornitura abbiamo la rotazione del pezzo da lavorare su di un asse, mentre l'utensile si muove lungo il pezzo affondando per lavorare il grezzo. L'operazione di tornitura si distingue in tornitura esterna, quando eseguita sul diametro esterno e tornitura interna se invece viene fatta internamente al pezzo.

La fresatura è il processo in cui il taglio viene eseguito dalla rotazione della fresa, che relativamente al pezzo ha una direzione di avanzamento propria. La fresatura può essere periferica, quando la velocità di avanzamento e di rotazione hanno assi paralleli, mentre è frontale quando la fresatura avviene su un pezzo piano dall'alto.

La foratura è un'operazione in cui viene utilizzato un utensile a due spigoli taglienti, che avanza nel pezzo in direzione ortogonale alla direzione della velocità di taglio.

Le macchine, ovvero i sistemi che realizzano il processo sono: tornio, trapano e fresatrice.

Nello specifico, sull'utensile, possiamo riconoscere, oltre agli angoli di spoglia, anche il bordo del tagliente, il petto, la punta dell'utensile e il fianco dello stesso.



Utensile monotagliente

Utensile a taglienti multipli

I parametri di taglio

Un indice dell'efficacia di un processo di asportazione di truciolo è il tasso di asportazione del materiale o material removal rate. Questo parametro viene calcolato a partire da dei parametri empirici che sono la velocità del taglio (v_c), lo spessore della profondità di taglio (H_D) e l'avanzamento dell'utensile (f).

$$Q_{MR} = v_c f H_D$$

Rifacendoci al caso di taglio ortogonale libero, abbiamo un moto orizzontale dell'utensile nella direzione di taglio, relativamente al pezzo. L'utensile trasla affondando nel materiale, asportando una parte dello stesso, lungo la profondità di taglio. Definiamo quindi H_D lo spessore della profondità di taglio.

Possiamo quindi inserire anche quello che è l'angolo di spoglia, prendendo l'asse ortogonale alla velocità di taglio, e calcolando rispetto ad esso l'angolo γ_0 .

Il processo di taglio crea una superficie nuova asportando una parte del materiale, il truciolo, che viene tolto per deformazione e prendere la direzione dell'angolo di spoglia principale dell'utensile, infatti l'utensile affonda nella superficie deformando il truciolo e spingendolo contro il suo stesso petto, dando così la direzione al truciolo stesso.

Nella rappresentazione 2-D, il tagliente è un solo punto del bordo tagliente principale.

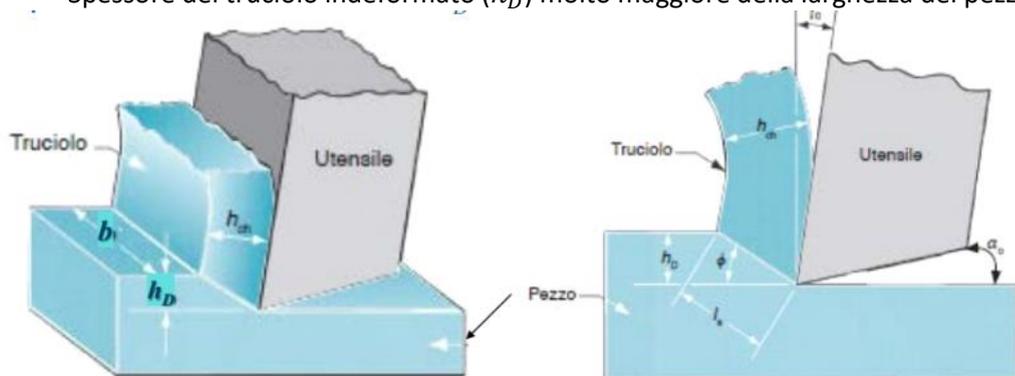
Durante l'asportazione di trucioli abbiamo sia uno strisciamento del materiale lungo il petto che strisciamento lungo il bordo tagliente secondario.

Taglio ortogonale libero

È una modellizzazione dove le grandezze dinamiche e cinematiche appartengono ad un solo piano.

Le ipotesi che dobbiamo considerare sono:

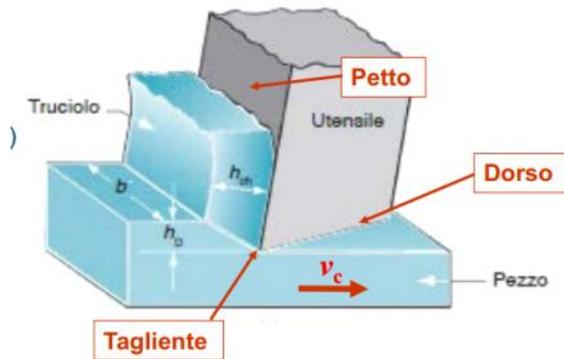
- Tagliente rettilineo e ortogonale alla direzione di taglio
- Utensile più largo del pezzo, truciolo senza vincoli laterali
- Spessore del truciolo indeformato (h_D) molto maggiore della larghezza del pezzo (b).



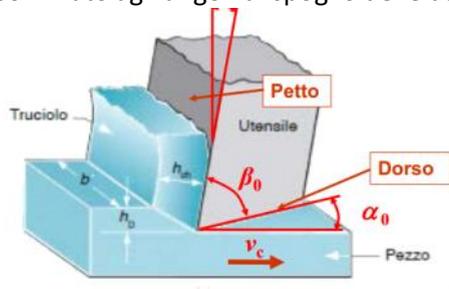
Sull'utensile, nella trattazione 2-D riconosciamo il petto, linea contro cui striscia il truciolo; il tagliente, punto che crea il truciolo; il dorso, lato su cui si affaccia la superficie lavorata.

I parametri da considerare sono:

- La velocità di taglio v_c ,
- Lo spessore di taglio h_D ,
- Lo spessore del truciolo h_{ch} (che è la nostra incognita)
- La sezione teorica indeformata del truciolo $A_D = b \cdot h_D$



Gli angoli di taglio caratteristici vanno dai -15° ai 30° , tipicamente positivo, per l'angolo di spoglia superiore γ_0 , angolo tra il petto e la normale alla velocità di taglio; l'angolo di spoglia inferiore, tipicamente tra i 2° e i 15° , α_0 angolo tra il dorso e la direzione della velocità di taglio; l'angolo solido dell'utensile, che sommato agli angoli di spoglia deve dare un angolo retto.



Nello studio del taglio ortogonale libero, vogliamo il fattore di ricalcamento r_c , da cui poi potremmo ricavare il valore dell'angolo di scorrimento.

Dato che $h_{ch} > h_D$, abbiamo che r_c sarà minore di 1, quindi è una misura dello stato di deformazione del truciolo.

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

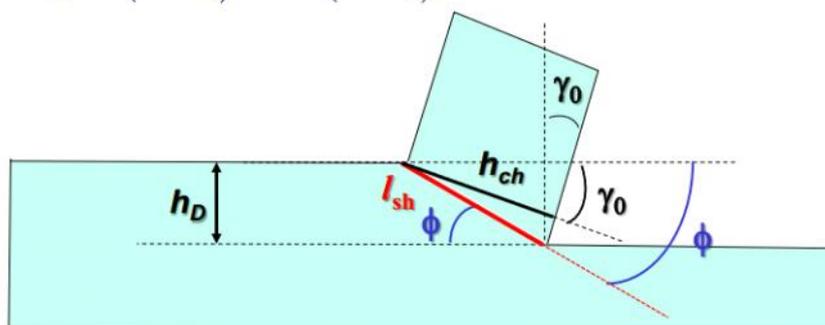
Poiché il volume e la massa del truciolo sono costanti, anche se con una considerevole incertezza sperimentale, possiamo ricavare il fattore di ricalcamento sperimentalmente, ricavando successivamente anche l'angolo di scorrimento.

fattore di ricalcamento:

$$r_c = \frac{h_D}{h_{ch}} \quad r_c < 1$$

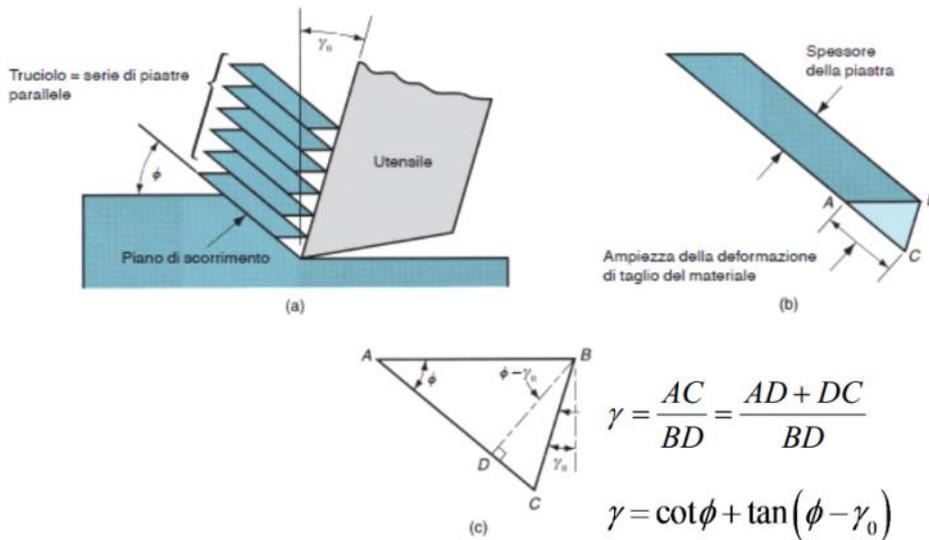
Nota r_c si può ottenere il valore dell'angolo di scorrimento $\phi > \gamma_0$

$$r_c = \frac{h_D}{h_{ch}} = \frac{l_{sh} \sin \phi}{l_{sh} \cos(\phi - \gamma_0)} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma_0)} \rightarrow \tan \phi = \frac{r_c \cdot \cos \gamma_0}{1 - r_c \cdot \sin \gamma_0}$$



Deformazione di taglio

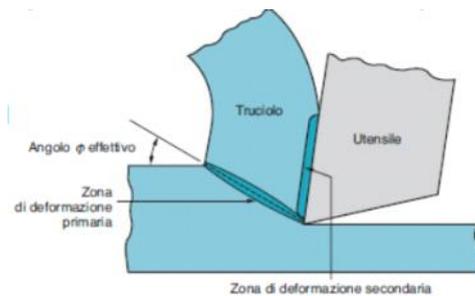
Come abbiamo detto il truciolo viene ottenuto deformando il sovrametallo, quindi possiamo vedere il truciolo come una serie di piastre parallele al piano di scorrimento e sovrapposte.



Zone di deformazione

Il sovrametallo si trasforma in truciolo perché l'utensile sollecita il materiale davanti a sé finché quest'ultimo si deforma plasticamente nella zona primaria di deformazione. In particolare nella modellizzazione di taglio ortogonale libero approssimiamo la zona primaria ad un piano. La sollecitazione separa il sovrametallo dal pezzo, sovrametallo che diventa truciolo e spinge sopra il petto dell'utensile nella zona di deformazione secondaria.

La zona terziaria di deformazione è quella dove abbiamo lo strisciamento tra dorso e superficie lavorata.



Forze di taglio

Tra l'utensile e il pezzo si sviluppa una forza risultante R , scomponibile nella direzione del petto, nella direzione di taglio e in quella del piano di scorrimento. R non è nota a priori ma è determinabile attraverso relazioni matematiche.

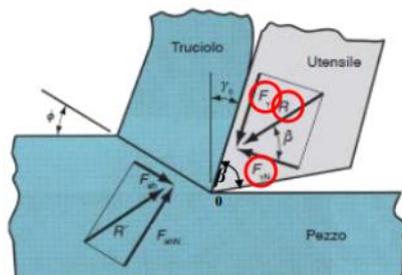
Scomporre la forza nelle sue componenti serve a evidenziare gli sforzi τ e σ applicati lungo il petto, zona di deformazione secondaria; o scomposta per evidenziare gli sforzi τ_{sh} e σ_{sh} applicati lungo il piano di scorrimento.

In particolare:

$$R = \begin{cases} F_Y = R \sin \beta & \text{normale al petto} \\ F_{YN} = R \cos \beta & \text{tangente al petto} \end{cases}$$

$$\mu = \tan \beta = \frac{F_Y}{F_{YN}} \text{ coefficiente di attrito}$$

Dove beta non è l'angolo solido, ma l'angolo di attrito.



- F_{sh} forza sul piano di scorrimento
- F_{shN} forza normale al piano di scorrimento
- τ_{sh} tensione tangenziale media sul piano di scorrimento
- σ_{sh} tensione normale media sul piano di scorrimento

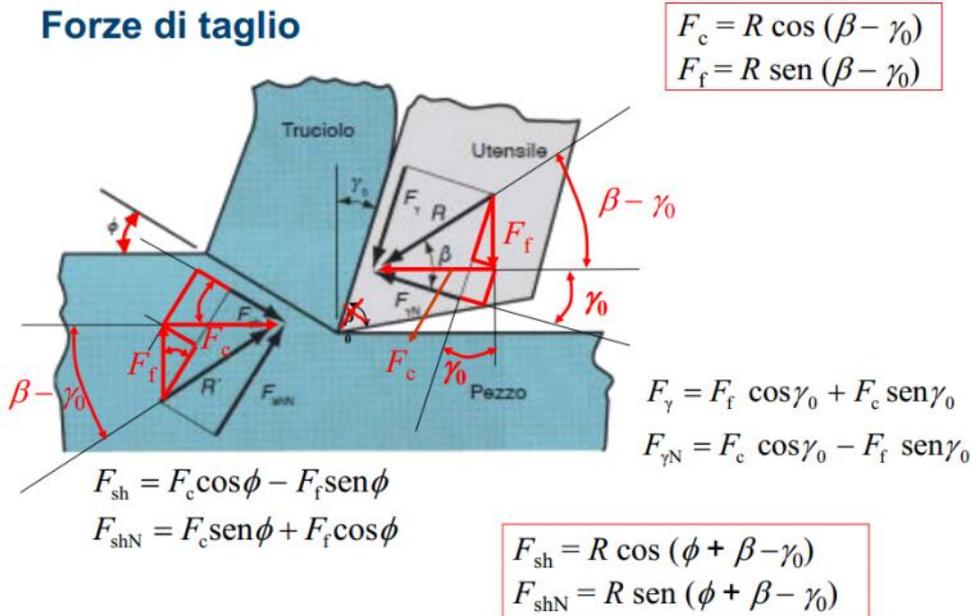
$$\tau_{sh} = \frac{F_{sh}}{A_{sh}} \quad \text{con } A_{sh} = \frac{h_d b}{\sin \phi}$$

Infine possiamo scomporre la risultante R esercitata dal petto sul truciolo rispetto alla direzione di taglio, che è nota a priori:

F_c forza di taglio, parallela al moto

F_f forza di avanzamento perpendicolare alla direzione

NOTABENE PER ESAME!!!! Saper disegnare gli angoli e assi



FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

Forze di taglio

$$F_c = R \cos(\beta - \gamma_0) \rightarrow F_c = \frac{F_{sh} \cdot \cos(\beta - \gamma_0)}{\cos(\phi + \beta - \gamma_0)} \rightarrow F_c = \tau_{sh} \cdot \frac{A_D \cos(\beta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}$$

Dipendenza della risultante dalla forza lungo il piano di scorrimento

Dipendenza della forza lungo il piano di scorrimento dalla τ_{sh}

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

$$\rightarrow F_f = \frac{F_{sh} \sin(\beta - \gamma_0)}{\cos(\phi + \beta - \gamma_0)} = \tau_{sh} \cdot \frac{h_D b \sin(\beta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}$$

Dove:

- τ_{sh} è approssimabile con lo sforzo di snervamento del materiale in direzione di taglio
- A_D È nota a priori
- β È determinabile dalle relazioni precedenti

L'equazione di Merchant

Si basa sulle ipotesi:

- Modello di formazione del truciolo a piano di scorrimento, taglio ortogonale, senza attrito sul dorso, attrito a coefficiente costante sul petto.
- τ_{sh} costante e tipica del materiale, ottenibile per via empirica, trascurando effetti di

temperatura, deformazione angolare, velocità di deformazione angolare

- Piano di scorrimento posto per minimizzare l'energia del taglio.

$$\tau_{sh} = \frac{F_{sh}}{A_D / \sin \phi} = \frac{F_c \cos \phi - F_f \sin \phi}{h_D b / \sin \phi} \quad \text{oppure} \quad \tau_{sh} = \frac{F_c \cdot \sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}{h_D b \cos(\beta - \gamma_0)}$$

Da cui otteniamo che:

$$\phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma_0}{2} - \frac{\beta}{2}$$

Dove il fattore costante $\frac{\pi}{4}$ introduce un errore, infatti è stato supposto costante tuttavia è specifico per ogni materiale.

Relazioni tra potenza e energia nell'asportazione di truciolo

L'angolo del piano di scorrimento influenza la formazione del truciolo:

- All'aumentare di ϕ diminuisce l'area del piano di scorrimento
- Al diminuire di ϕ aumenta l'area del piano di scorrimento

L'angolo del piano di scorrimento aumenta all'aumentare dell'angolo di spoglia superiore.

Potenza nel taglio ortogonale

In azienda viene utilizzato un approccio più pratico per calcolare lo sforzo di taglio.

Si parte ragionando sulla potenza assorbita nel taglio, dove il secondo termine sarà trascurabile.

$$P_c = F_c \cdot v_c + F_f \cdot v_f$$

Potenza di taglio Potenza di avanzamento

Quindi la potenza assorbita dalla macchina durante il processo, tiene conto di un rendimento elettro-meccanico e vale:

$$P_g = \frac{P_c}{\eta} \quad \eta \text{ (E sul Groover) = efficienza meccanica}$$

Quindi possiamo ricavarci la pressione di taglio, ovvero il rapporto tra la potenza di taglio e il tasso di asportazione del materiale:

$$p_c = k_c = \frac{P_c}{Q} = \frac{F_c \cdot v_c}{v_c h_D b} = \frac{F_c}{h_D b}$$

Dove k_c rappresenta la pressione di taglio per definizione della UNI ISO 3002/4

In prima approssimazione possiamo ritenere che il k_c sia unico per il materiale, tuttavia nella pratica dipende da:

- Spessore del truciolo indeformato
- Area della sezione di truciolo indeformato
- Dalle proprietà meccaniche del materiale da lavorare
- Dal materiale dell'utensile
- Geometria del tagliente
- Velocità di taglio
- Condizione di lubrificazione della zona di taglio

I valori così adottati per ricavare k_c sono validi solo se ripetiamo il taglio nelle stesse condizioni in cui abbiamo ricavato il coefficiente.

Quindi la formula per ricavare il k_c è stata rielaborata da Kronenberg, ricavandone una funzione nelle variabili h e b , elevate rispettivamente a un esponente, che si rapportano alla pressione di taglio specifica.

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

Dove:

- k_c diminuisce con legge esponenziale all'aumentare della profondità di taglio
- k_{cs} è la pressione di taglio specifica per asportare una sezione di truciolo di 1mm^2 , con $h_D = 1\text{mm}$ e $b = 1\text{mm}$. Dipende dal materiale da lavorare principalmente.
- x costante che dipende dal materiale dell'utensile
- y con gli attuali materiali per utensili tende a zero, quindi:

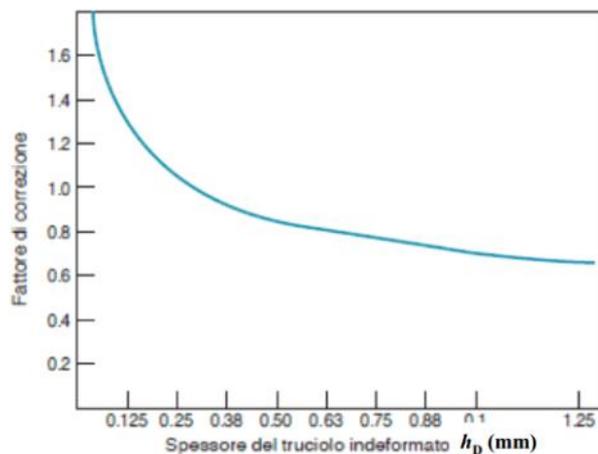
$$k_c = \frac{k_{cs}}{h_D^x}$$

Potenza di taglio/MRR

Basati su utensile non usurato e spessore del truciolo indeformato $h_D = 0,25mm$

Materiale	Durezza Brinell	Pressione di taglio k_c o potenza di taglio per unità di volume p_c
		N/mm ²
Acciaio al carbonio	150-200	1600
	201-250	2200
	251-300	2800
Leghe di acciaio	200-250	2200
	251-300	2800
	301-350	3600
	351-400	4400
Ghise	125-175	1100
	175-250	1600
Acciaio inossidabile	150-250	2800
Alluminio	50-100	700
Leghe di alluminio	100-150	800
Ottone	100-150	2200
Bronzo	100-150	2200
Leghe di magnesio	50-100	400

Viene introdotto un fattore di correzione per la pressione di taglio nel caso in cui lo spessore di truciolo sia diverso da $0,25mm$ ignorando le dipendenze da altri fattori, quali l'angolo spoglia frontale.



Temperatura di taglio

Per calcolare l'aumento di temperatura della superficie di contatto utensile-truciolo si può usare l'equazione di Cook:

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

Dove:

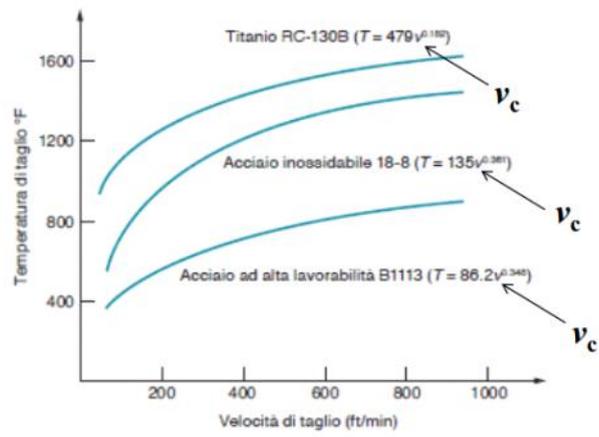
- ΔT aumento di temperatura media in °C
- k_c pressione di taglio dell'operazione $\frac{Nm}{mm^3} = \frac{J}{mm^3}$
- v_c velocità di taglio in $\frac{m}{s}$
- h_D spessore di truciolo indeformato in mm
- ρ densità del materiale in $\frac{kg}{mm^3}$
- C calore specifico del materiale in $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$
- K diffusività termica in $\frac{m^2}{s}$

La relazione di Trigger invece fornisce la relazione tra velocità e temperatura:

$$T = K v_c^m$$

Dove T è la temperatura di contatto, v_c la velocità di taglio e i parametri K e m dipendono da tutti gli altri parametri di taglio, velocità esclusa, e dal materiale da lavorare.

Le due formule sono la stessa cosa, a meno delle costanti impiegate. Inoltre la formula di Cook tiene conto dell'influenza di f grazie alla presenza di h_D



I grafici in figura mostrano l'andamento della temperatura in funzione della velocità di taglio per diversi materiali lavorati, ottenuto usando l'equazione di Trigger.

3.2.1 - Lavorazioni per asportazione di truciolo e macchine utensili

Tipicamente nelle lavorazioni per asportazione di truciolo lavoriamo pezzi massivi o pezzi assialsimmetrici, mentre le lamiere non subiranno questi processi perché ne uscirebbero deformate e quindi non più utilizzabili.

I grezzi solitamente sono pezzi rotazionali, come quelli ottenuti per tornitura; pezzi prismatici, come quelli ottenuti per fresatura; ma possiamo avere anche dei pezzi misti, in cui troviamo feature rotazionali su pezzi prismatici.

Operazioni tipiche di asportazione di truciolo:

- Tornitura cilindrica: la superficie del pezzo lavorato sarà un cilindro, è il tipo di tornitura tradizionale.
- Tornitura conica: ottenuta attraverso portautensili con torrette biassiali o, a partire da una tornitura cilindrica, inclinando il mandrino.
- Tornitura di copiatura: si possono generare sempre superfici assialsimmetriche, ma la cui geometria sia molto più complessa.
- Tornitura con utensile di forma: in cui utilizziamo un utensile di forma o utensile speciale, per ottenere una determinata feature geometrica su di un pezzo, sfruttando un tornio che non potrebbe realizzarla perché troppo antiquato oppure perché la feature è troppo piccola.
- Fresatura periferica: la fresa, utensile multitagliente, presenta solo sulla superficie laterale i taglienti, infatti sarà solo il lato della fresa a scorrere sul pezzo.
- Fresatura frontale: la fresa affonda dall'alto nel pezzo, potendo generare feature di diversa forma all'interno o sui bordi dello stesso. La distinzione con la fresatura periferica non è assoluta, infatti nella fresatura di contornatura ad esempio, abbiamo una fresatrice interfacciata per quella che sembra una fresatura frontale, che invece sta eseguendo una fresatura periferica. Per questo la fresa ha taglienti sia frontalmente che lateralmente.
- La brocciatura: operazione in un'unica direzione, in cui l'utensile è solo traslante e genera feature particolari all'interno di fori.
- Filettatura al tornio: realizzata con un utensile filettatore e attrezzature aggiuntive attraverso un tornio. l'apparato extra serve ad assicurarsi che la regolazione dei parametri di giri al minuto del mandrino e di avanzamento della torretta portautensili siano perfettamente regolati.

3.2.2 - Tornitura

Condizione di taglio in tornitura

Nel regolare la velocità del tornio, non regoleremo mai direttamente la velocità di taglio, infatti poiché il tornio viene azionato da un mandrino rotante, sarà più immediato regolare sulla macchina il numero di giri al minuto a cui girerà il pezzo. Prendendo inoltre come parametro il diametro indeformato del pezzo, abbiamo che:

$$n = \frac{v_c}{\pi D_0} \quad \text{con} \quad \begin{cases} n \text{ [rpm]} \\ v_c \left[\frac{m}{min} \right] \\ D_0 \text{ [mm]} \end{cases}$$

Per sapere quale sarà il diametro lavorato del pezzo dobbiamo togliere al volume iniziale due volte la profondità di passata:

$$D_f = D_0 - 2a_p$$

Inoltre risulta comodo moltiplicare l'avanzamento f per il numero di giri del tornio al fine di esprimere la velocità di avanzamento lineare.

$$v_f = nf$$

Il tempo di lavorazione sarà pari alla lunghezza assiale da tornire sulla velocità di avanzamento.

$$T_M = \frac{L}{v_f} = \frac{\pi D_0 L}{f v_c}$$

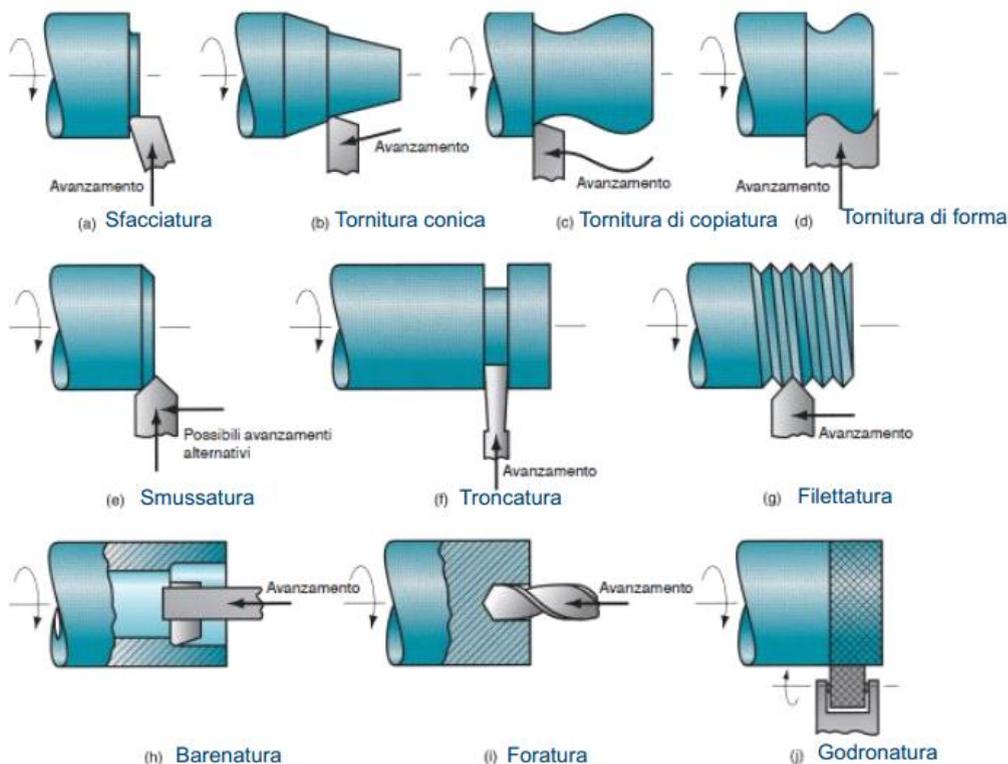
Tuttavia il pezzo viene fissato al mandrino, quindi non potrà essere tornito per tutta la lunghezza e sarà necessario fare il ripiattamento del pezzo, rischiando di introdurre delle imprecisioni dovuti a disallineamenti sull'asse del mandrino. Quindi in questa espressione teniamo conto di quello che è il tempo netto di truciolo, ovvero quello durante il quale il tornio sta effettivamente rimuovendo il materiale. In realtà non teniamo in considerazione quelli che sono i tratti in cui il mandrino e la torretta portautensili non possono muoversi alla velocità di rapido, ma si muoveranno più lentamente, per poter affondare nel pezzo senza danneggiare il pezzo stesso, l'utensile o i cuscinetti del mandrino. Nella pratica quindi il tempo di lavorazione è più lungo di quello che calcoliamo, ma poiché i tempi di extra corsa sono di uno o due ordini di grandezza inferiori al tempo di rapido, si approssima a quest'ultimo il tempo di lavorazione.

I parametri f e v_c di solito vengono dati dall'utensilerie.

Il material removal rate si calcola come:

$$Q = v_c f a_p$$

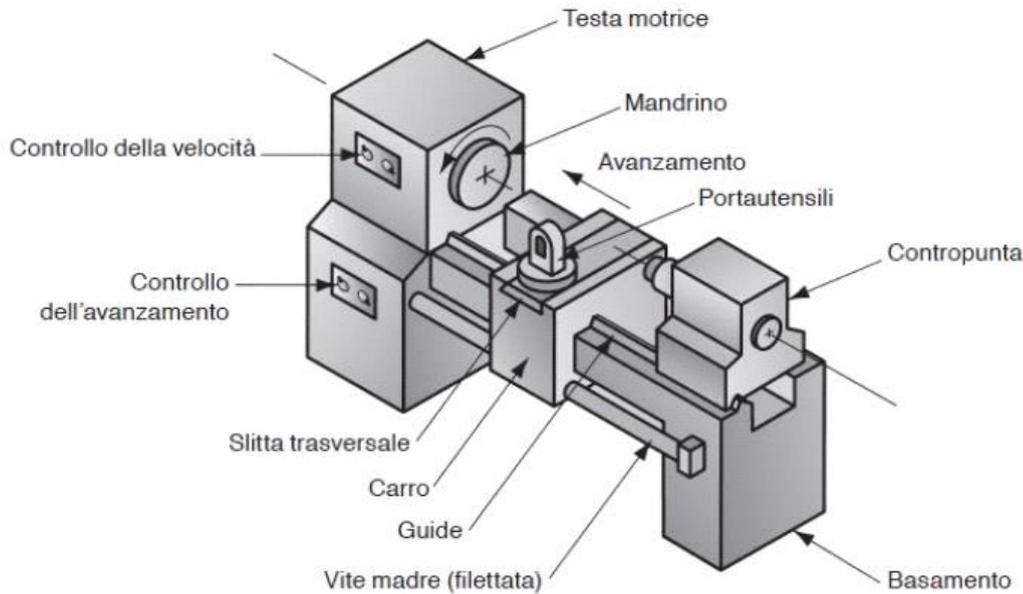
Tipi di tornitura:



- La sfaccatura è la prima operazione che si fa al tornio, serve ad ottenere anche quello che è uno zero nel sistema di riferimento del tornio.
- La troncatura serve a realizzare cave, inoltre se la cavatura arriva al centro del pezzo il pezzo viene troncato e diviso in sezione.
- L'operazione di tornitura interna a un foro è la barenatura
- Al tornio possiamo anche eseguire la foratura.
- La godronatura invece serve per aggiungere una zona rugosa sul pezzo. Iene fatta tramite un utensile speciale.

NOTABENE PER ESAME!!!!

Tornio parallelo

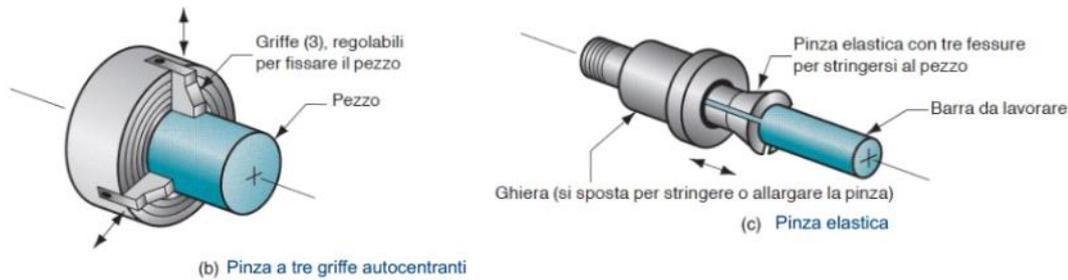


- Mandrino, organo motorizzato con velocità regolabile a intervalli solitamente discreti. Solitamente è costituito da un foro passante nel corpo della macchina, per permettere di tornire anche alberi troppo lunghi
- Carro, supporto della torretta portautensili, trasla lungo l'asse parallelo all'asse di rotazione imposto dal mandrino.
- Slitta trasversale, secondo supporto alla torretta portautensili, serve per regolare la profondità di passata.
- Basamento, solitamente in ghisa o altri materiali che assorbono le vibrazioni, non deve infatti trasmettere vibrazioni al pezzo o vibrazioni verso il pavimento.
- Contropunta, blocca il pezzo anche nella posizione opposta al mandrino, riducendo le inflessioni causate dal peso o dagli sforzi di taglio. Può essere usata anche per installare utensili per effettuare lavorazioni assiali (barenatura, foratura).

La velocità di avanzamento è definita in mm al giro perché il carro sfrutta la rotazione del mandrino per poter avanzare, attraverso dispositivi di conversione del moto appositi.

Il sistema di bloccaggio tradizionale è quello a tre griffe autocentranti, che stringendosi contemporaneamente dai 3 assi obbligano il pezzo a porsi in posizione assiale.

Il serraggio sul mandrino è essenziale, la coppia di serraggio deve essere calcolata a priori e il mandrino deve poterla sopportare. Infatti non vogliamo che il pezzo non ruoti liberamente e che il pezzo non si deformi sotto la pressione delle griffe.

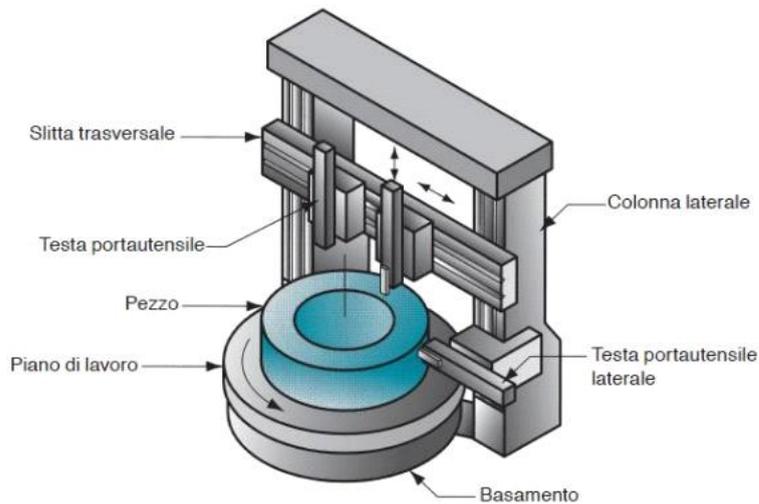


FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

Tornio verticale

Usato su pezzi in cui le forze di inflessione dovute al peso proprio del pezzo causerebbero la rottura del pezzo o il danneggiamento dei cuscinetti del mandrino.

Solitamente i pezzi lavorati con un tornio verticale hanno il diametro maggiore rispetto alla lunghezza del pezzo.



Utensili da tornitura

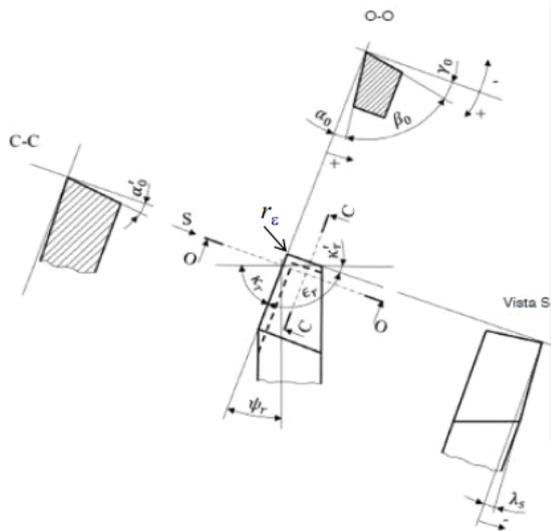
Standardizzati ISO 3002-1

Sono utensili monotagliante costituiti da:

- Stelo, che si collega alla torretta portautensili
 - o Piano di base dello stelo
- Piano di riferimento, passante per la punta dell'utensile e parallelo al piano di riferimento.
- Petto
- Fianchi
 - o Principale, in corrispondenza del tagliente principale
 - o Secondario, in corrispondenza del tagliente orizzontale

Gli angoli che definiscono l'utensile sono:

- l'angolo tra i taglienti ϵ_r : importante per la resistenza della punta
- β_0 è l'angolo del tagliente principale, si vede sezionando il tagliente su un piano in direzione ortogonale a quella di taglio. Diventano evidenti con questa operazione anche gli angoli di spoglia.



Angoli della sezione normale:

- γ_0 angolo di spoglia superiore ortog.
- α_0 angolo di spoglia inferiore ortog.
- α_0' angolo di spoglia inferiore sec.
- β_0 angolo di taglio

Angoli del profilo:

- ψ_r angolo di direzione complementare del tagliente
- ϵ_r angolo della punta dell'utensile
- λ_s angolo di inclinazione tagliente princ.

Angoli di registrazione:

- κ_r angolo di direzione del tagliente principale
- κ_r' angolo di direzione del tagliente secondario

(Nomenclatura ISO 3002-1)

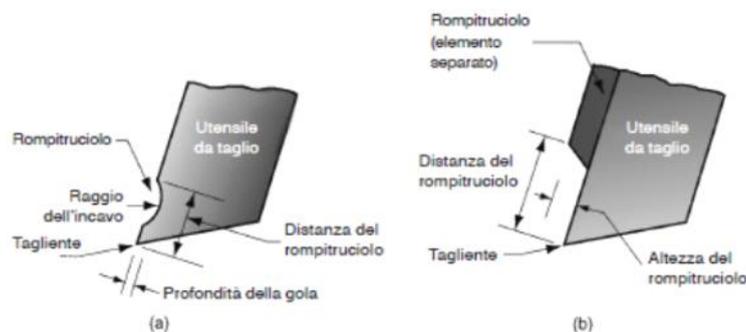
γ_0 angolo di spoglia superiore ortogonale, influisce sul meccanismo di formazione del truciolo, determinando tanto più sono maggiori:

- Minori deformazioni
- Minore pressione di taglio
- Minore forze
- Minore potenza assorbita
- Minore attrito di scorrimento
- Minor temperatura di esercizio
- Minore resistenza dello spigolo tagliente.

Slide 17-25

I tipi di utensile

Vogliamo che l'utensile non sia solo fornito dei taglienti, di cui fino ad ora abbiamo discusso, ma vogliamo anche che durante il processo, l'utensile stesso fratturi il truciolo, evitando per materiali duttili che esso si allunghi troppo, rischiando di avvolgersi attorno all'utensile stesso. Il rompitruciolo può essere ricavato sull'utensile stesso, incidendo nella sagoma dell'utensile un incavo circolare oppure aggiungendo il rompitruciolo come un elemento separato, un inserto da applicare sullo stelo dell'utensile.



Oltre al rompitruciolo, possiamo distinguere anche gli utensili in utensili solidi, in cui lo stelo dell'utensile e il tagliente sono un unico corpo fatto in metallo di tipo HSS (High Speed Steel) adatto alle lavorazioni veloci che gli utensili devono eseguire il cui vantaggio è che sicuramente il tagliente sarà meno soggetto a vibrazioni, tuttavia quando il tagliente si usura va buttato tutto.

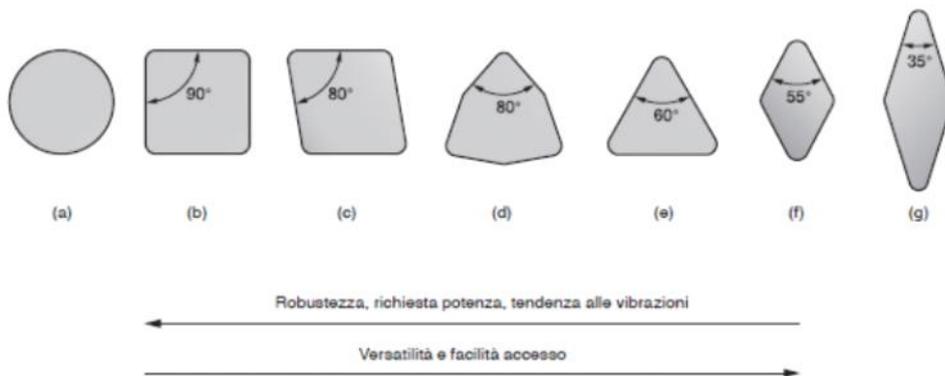
Utensili con inserto tagliente saldo-brasato, in cui l'inserto tagliente viene appunto saldato sullo stelo, l'inserto viene prodotto per sinterizzazione di un carburo, quindi garantisce maggior precisione e possibilità di forma, la saldatura permette di ridurre le vibrazioni, anche se l'inserto non è più riutilizzabile.

Infine abbiamo gli utensili composti dallo stelo porta inserti e dall'inserto coi taglienti fissato meccanicamente. Il grande vantaggio di questa soluzione è che bisogna sostituire solo l'inserto,

inserto che inoltre può essere usato fino a un massimo di 8 volte (per condizioni di taglio particolari) o quasi sicuramente quattro volte (se presenta 4 spigoli taglienti). Il grande vantaggio di questa configurazione è quindi il risparmio di denaro e la possibilità di ottenere inserti taglienti molto duri e precisi. Tuttavia il fissaggio meccanico introduce una componente di vibrazioni.



A seconda del tipo di lavorazione inoltre, dobbiamo scegliere gli inserti di forma adeguata, ad esempio è preferibile usare inserti tondi per il titanio o inserti con angoli piccoli (35°) per poter creare geometrie strette interne al pezzo. Tuttavia la geometria del tagliente influenza anche la sua resistenza meccanica.



Parti di processo: sgrossatura e finitura

In una lavorazione di tornitura, in cui abbiamo quindi una quantità nota di sovrametallo da asportare, vogliamo farlo in almeno 2 passaggi. Nel primo (o nei primi) passaggio(i) vogliamo lavorare alla massima velocità possibile, con un removal material rate alto, sfruttando al massimo la potenza fornitaci dal tornio in accordo con il tipo di materiale e lavorazione, per eseguire quella che è la sgrossatura del pezzo, ovvero la rimozione della maggior parte del sovrametallo. L'ultima passata, di solito sull'ultimo millimetro, sarà invece la finitura del pezzo, in cui il tornio non lavorerà più al massimo delle sue capacità in termini operativi, ma verrà settato con una velocità di taglio tale da ottenere sul pezzo finito le tolleranze dimensionali e di rugosità richieste dal cliente. Ovviamente nella sgrossatura vogliamo lavorare al massimo della velocità, saturando i limiti di potenza del tornio, per risparmiare tempo, mentre nella finitura vogliamo essere il più vicino possibile alle tolleranze del processo, per poter far lavorare il tornio alla massima velocità compatibile con le tolleranze, risparmiando tempo, denaro e per non fornire un pezzo di qualità superiore rispetto a quella pagata.

Parametri di processo

Diametro in lavorazione, per convenzione quello non tornito D [mm]

Numero di giri del mandrino n $\left[\frac{\text{giri}}{\text{mm}}\right]$

Velocità di taglio v_c $\left[\frac{\text{m}}{\text{min}}\right]$

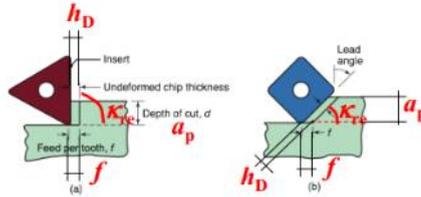
Avanzamento al giro f $\left[\frac{\text{mm}}{\text{giro}}\right]$

Profondità di passata a_p [mm]

Spessore di truciolo indeformato h_D [mm], direttamente legato all'avanzamento, infatti guardando all'immagine, l'inserto triangolare con angolo di registrazione di 90° genera un truciolo il cui spessore della sezione indeformata è uguale all'avanzamento. Quindi deduciamo che f e h_D sono

legati tra loro tramite il seno dell'angolo di registrazione.

Se l'angolo è di 90 gradi, la sezione è rettangolare; con angoli diversi abbiamo che il truciolo indeformato ha come sezione un parallelogramma



Dove la base è legata all'avanzamento per il seno dell'angolo di registrazione, mentre la sua altezza fratto il seno dell'angolo ci dà la lunghezza del lato obliquo

NOTABENE PER ESAME!!!!

La pressione di taglio

È il metodo pratico usato in azienda, da un punto di vista teorico non è una pressione, infatti rappresenta la potenza nell'unità di volume e di tempo, ovvero l'energia per unità di volume da asportare, anche se ha le dimensioni di una pressione.

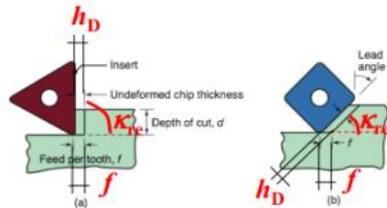
Usiamo k_c per calcolare la componente della risultante delle forze di taglio nella direzione tangenziale alla direzione di avanzamento.

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

di solito non si conoscono h_D e b ma l'avanzamento al giro f e la profondità di passata a_p :



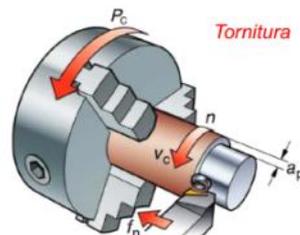
$$h_D = f \sin \kappa_{re}$$



$$k_c = \frac{k_{cs}}{h_D^x} = \frac{k_{cs}}{f^x (\sin^x \kappa_{re})} = \frac{k_{cs}}{f^x} \left(\frac{1}{\sin \kappa_{re}} \right)^x$$



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



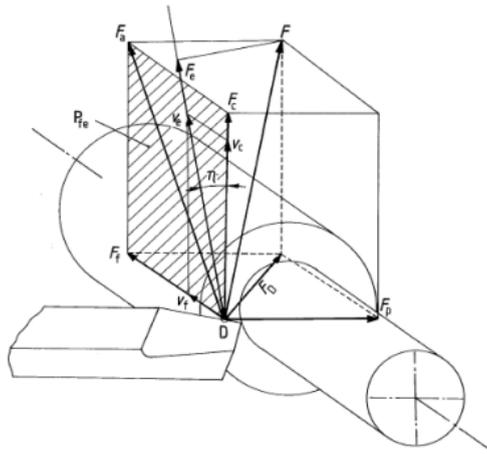
Nei cataloghi viene fornito un valore di k_c per un caso determinato, ad esempio $k_{c0,4}$ ovvero con avanzamento di 0,4mm al giro e seno dell'angolo di registrazione di 90°. Discostandosi dalle condizioni standard, bisogna applicare dei coefficienti correttivi.

FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

Componenti della forza di taglio

Le componenti della forza di taglio si ottengono scomponendo la thrust force (F_D) secondo un sistema di riferimento. Il sistema di riferimento che adottiamo è quello con gli assi diretti come: parallelamente alla direzione di avanzamento, ortogonalmente alla direzione di avanzamento e l'ultimo ortogonale a questi due assi, con origine sullo spigolo del tagliente.

Scomponendo la forza quindi otteniamo, la forza di taglio, ortogonale alla rotazione del pezzo e quindi parallela alla direzione di taglio, la forza di avanzamento, diretta come l'asse del pezzo e la forza di repulsione, diretta radialmente. Questa forza è quella che crea le vibrazioni dell'utensile, dobbiamo essere certi che la torretta portautensili sia in grado di contrastarla, per evitare che il pezzo abbia una finitura superficiale o delle tolleranze geometriche sbagliate.



Potenza di tornitura

$$P_c = F_c \cdot v_c + F_f \cdot v_f + F_t \cdot v_p$$

Poiché v_p non vogliamo esista visto che è presente solo nel caso di vibrazioni radiali, e poiché

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

Allora:

$$P_c = F_c \cdot v_c = k_c f a_p v_c = k_c Q$$

Quindi abbiamo ricavato come k_c sia l'energia per unità di volume.

Verifiche in tornitura

Durante la sgrossatura:

- Profondità di passata compatibile con l'utensile selezionato
- Avanzamento imposto ammissibile con il tornio
- Velocità di taglio, quindi numero di giri, ammissibile con il tornio
- Potenza necessaria effettivamente erogabile dal tornio

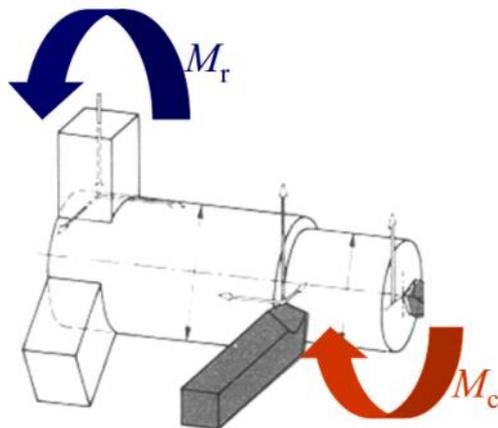
Durante la finitura

- I parametri di taglio siano compatibili con la finitura superficiale richiesta
- I parametri di taglio siano compatibili con le tolleranze geometriche imposte
- Le morse del mandrino possano esercitare una coppia sufficiente da afferrare saldamente il pezzo.

Lavoriamo a saturazione di tutti questi vincoli per ridurre al minimo il tempo di processo.

Verifica della coppia di serraggio

Devo verificare che la coppia di taglio sia minore della coppia di serraggio, per evitare che il pezzo slitti nelle griffe.



$$M_c = \frac{F_c D}{2}; \quad M_r = \frac{z \mu p A D^*}{2} = \frac{z \mu F D^*}{2}$$

con μ coefficiente di attrito statico =

$$\mu = \begin{cases} 0.15, \text{ griffe lisce in acciaio dolce} \\ 0.25 \text{ griffe con profilo ondulato} \\ 0.35 \div 0.8 \text{ griffe rigate, acciaio temprato} \end{cases}$$

z , numero di griffe
 p , pressione di contatto griffa – pezzo
 A area di contatto
 F forza applicata dalla griffa
 D diametro in corrispondenza dell'utensile
 D^* diametro in corrispondenza delle griffe

Quindi per fare questo confronto è necessario conoscere la forza applicata da ognuna griffa sul pezzo e la forza di attrito agente, che è quella che impedisce al pezzo di ruotare su sé stesso. Le griffe in acciaio dolce e lisce, $\mu = 0.15$ sono usate per pezzi già rifiniti, dove non vogliamo che la pressione delle griffe rovini la superficie del pezzo. Se il pezzo in tornitura non è stato lavorato, possiamo scegliere griffe più "aggressive" sul pezzo, con profili ondulati o rigati, che in alcuni casi, con pressioni molto elevati possono proprio creare un incastro con il pezzo in lavorazione, arrivando a coefficienti di attrito maggiori di 1.

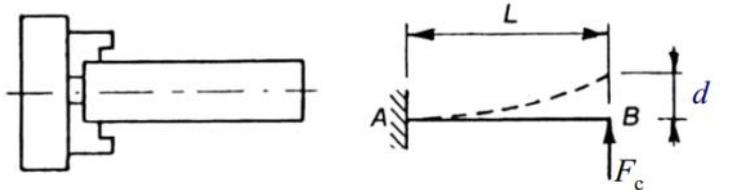
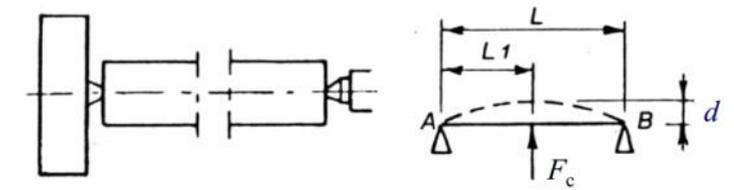
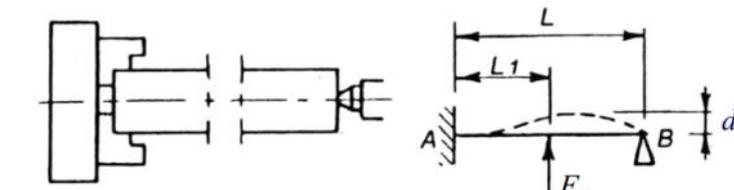
La pressione di contatto per l'area ci dà la forza applicata dalla griffa, che è direttamente conoscibile rispetto alla pressione di contatto.

I dispositivi di bloccaggio, possono essere azionati da attuatori oleodinamici, sono più stabili nel tempo, riuscendo a mantenere la forza applicata alle griffe costante anche all'aumentare del numero di giri; oppure le griffe possono essere bloccate da dispositivi meccanici, per le quali bisogna tenere un fattore di sicurezza più alto, per evitare che all'aumentare del numero di giri le griffe si allentino. Se il vincolo della coppia non è rispettato, devo trovare un modo di ridurre la forza di taglio; supponendo che la coppia di serraggio sia già la massima disponibile, devo cambiare la velocità di taglio, aumentare il numero di passate o correggere altri parametri che influenzino la forza di taglio. Affinché la lavorazione sia eseguibile, quindi:

$$M_C < M_r$$

Inflessioni del pezzo

Come abbiamo già introdotto, progettando una lavorazione per tornitura, dobbiamo considerare anche le inflessioni che il pezzo può subire, inflessioni che rovinerebbero la finitura superficiale del pezzo. Distinguiamo quindi 3 casi, due dei quali vanno assolutamente analizzati, mentre generalmente per la tornitura fatta con autocentrante e contropunta, supporremo sempre che l'inflessione sia nel range di tolleranza.

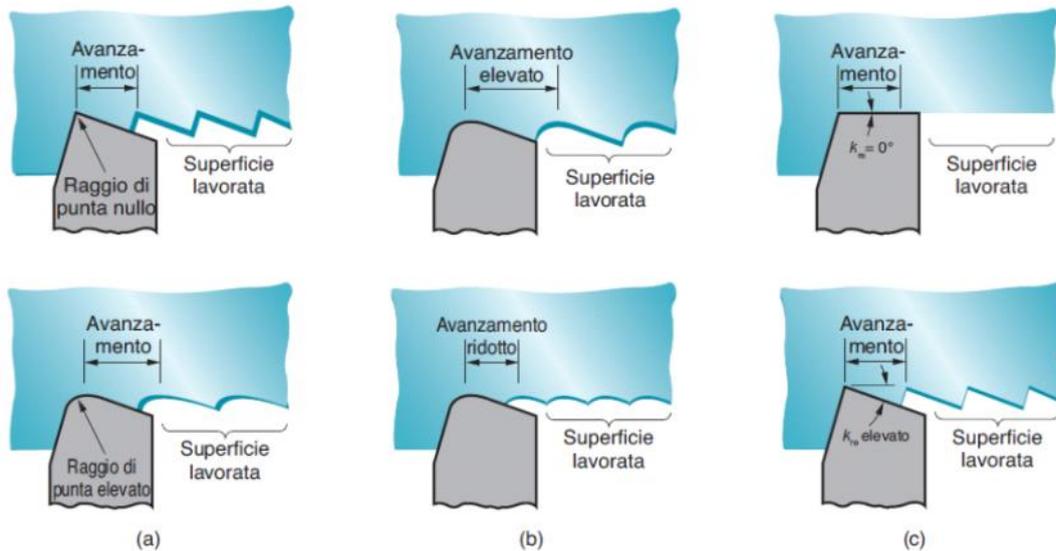
A sbalzo, con griffe autocentranti	$d = \frac{1}{3} \cdot \frac{F_c L^3}{EJ}$	
Tra le punte, punta-contropunta	$d = \frac{1}{48} \cdot \frac{F_c L^3}{EJ}$	
Autocentrante-contropunta	$d = \frac{1}{107} \cdot \frac{F_c L^3}{EJ}$	

Verifica sulla rugosità

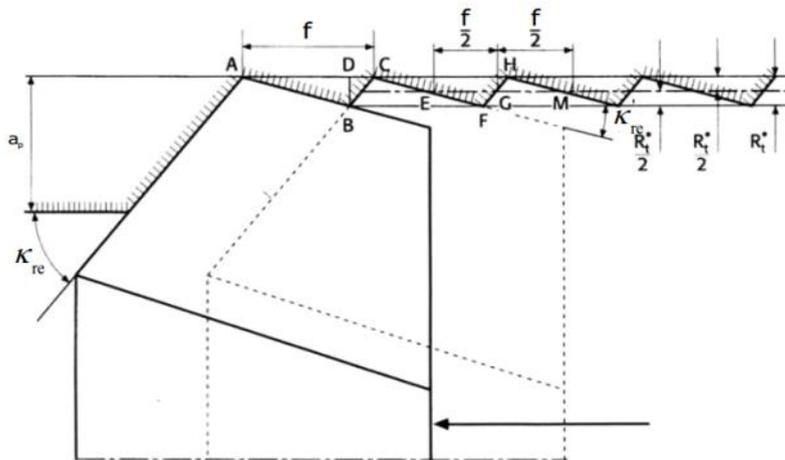
I pezzi torniti sono caratterizzati da una superficie con una rugosità che segue una spirale, quindi

possiamo notare una spirale microscopica che percorre tutto il pezzo. Questo solco viene lasciato dall'utensile e ha un passo che è pari alla velocità di avanzamento. La parte che in particolare resta incisa sulla superficie è il raggio del tagliente principale, influenzato anche dagli angoli di registrazione dell'utensile. Esistono utensili finitori, che vengono impiegati principalmente per l'operazione di finitura, in cui l'angolo di registrazione secondario è nullo, per garantire una buona finitura superficiale.

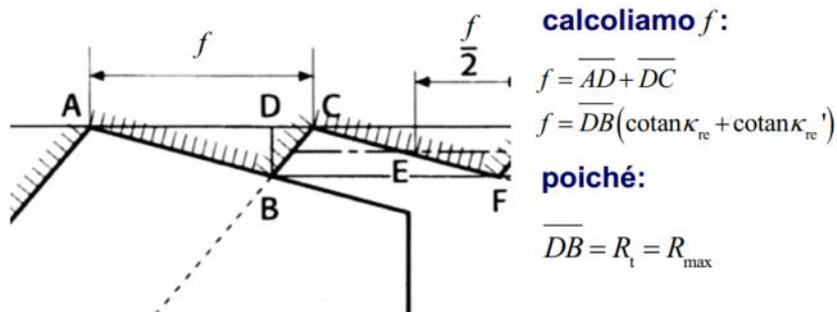
(nelle immagini vediamo il petto dell'utensile, quindi gli angoli di registrazione.)



Consideriamo ora un utensile, con raggio di punta nullo, che rifinisce un pezzo di cui sono trascurabili i ritorni elastici. Il risultato della tornitura sulla superficie è visibile in figura, in cui vediamo un profilo a dente di sega dove, la distanza tra due creste successive è pari ad f , ovvero l'avanzamento.



Rugosità Teorica: utensile con raggio di punta nullo



calcoliamo f :

$$f = \overline{AD} + \overline{DC}$$

$$f = \overline{DB}(\cotan \kappa_{re} + \cotan \kappa'_{re})$$

poiché:

$$\overline{DB} = R_t = R_{max}$$

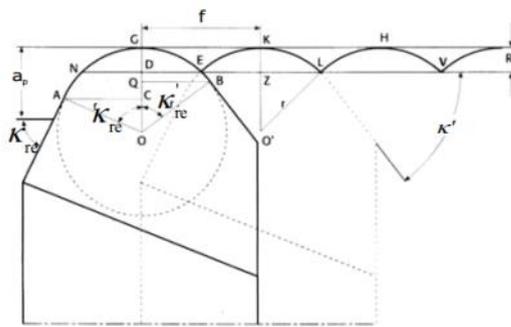
si ottiene:
$$R_{max} = \frac{f}{\cotan \kappa_{re} + \cotan \kappa'_{re}} \cdot 10^3 (\mu m) \quad R_a = \frac{R_{max}}{4}$$

Dove la rugosità aritmetica media può essere calcolata come la media delle distanze tra la linea di mezzeria delle creste, o possiamo definirla a partire dalla rugosità teorica.

Introducendo ora il raggio di punta nell'utensile:

NOTABENE PER ESAME!!!!

Rugosità Teorica: utensile con raggio di punta $r_\epsilon \neq 0$



poiché:

$$\overline{ND} \leq \overline{AC}$$

$$\overline{DE} \leq \overline{QB}$$

$$\overline{ND} = \overline{DE} = \frac{f}{2}$$

$$\Rightarrow \frac{f}{2} < r_\epsilon \cdot \text{sen} \kappa_{re}$$

$$\frac{f}{2} < r_\epsilon \cdot \text{sen} \kappa'_{re}$$

Formula approssimata di **Schmaltz**

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

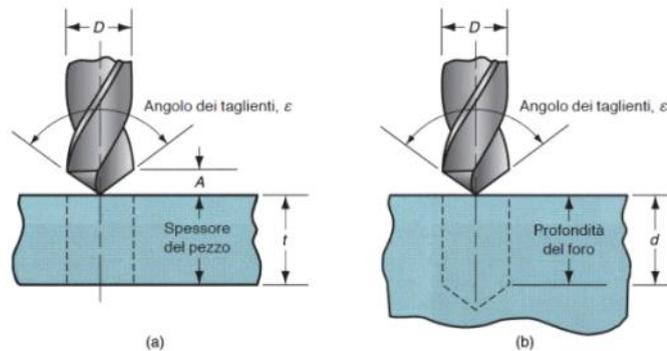
FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

Dove in ultima approssimazione troviamo la formula approssimata di Schmaltz, con cui, sapendo dai cataloghi i raggi di punta degli utensili, possiamo esprimere direttamente la rugosità teorica che avremo sul pezzo finito.

3.3 - Foratura

La foratura è un processo che si esegue attraverso un trapano sfruttando un utensile che al minimo abbia due taglienti e serve per creare in genere fori ciechi o passanti all'interno di un pezzo, sfruttando poi vari utensili per eseguire una serie di operazioni specifiche. Le particolarità di questo processo sono che, il moto di avanzamento è assiale e solitamente imposto all'utensile, inoltre la parte rotante che dà il moto di taglio è l'utensile stesso, mentre il pezzo si trova solitamente in una posizione fissa, staffato al piano di appoggio.

Condizioni di taglio in foratura



Velocità di rotazione:

$$n = \frac{v_c}{\pi D} \text{ con } \begin{cases} n \left[\frac{\text{giri}}{\text{min}} \right] \text{ velocità di taglio} \\ v_c \left[\frac{\text{m}}{\text{min}} \right] \text{ velocità di taglio} \\ D [\text{mm}] \text{ diametro della punta} \end{cases}$$

Velocità di avanzamento:

$$v_f = nf \text{ con } \begin{cases} f \left[\frac{\text{mm}}{\text{giro}} \right] \text{ avanzamento} \\ v_f \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] \text{ velocità di avanzamento} \end{cases}$$

Extra corsa in ingresso:

$$A = \frac{D}{2} \tan \left(90^\circ - \frac{\epsilon}{2} \right) \text{ con } \epsilon \text{ angolo di punta}$$

Tempo di lavorazione per foro passante:

$$T_m = \frac{t + A}{v_f} \text{ con } \begin{cases} T_m [\text{min}] \text{ tempo di lavorazione} \\ t [\text{mm}] \text{ spessore del pezzo} \\ A \text{ extracorsa in ingresso} \end{cases}$$

Tempo di lavorazione per foro cieco:

$$T_m = \frac{d + A}{v_f} \text{ con } \begin{cases} T_m [\text{min}] \text{ tempo di lavorazione} \\ d [\text{mm}] \text{ profondità del foro} \\ A \text{ extracorsa in ingresso} \end{cases}$$

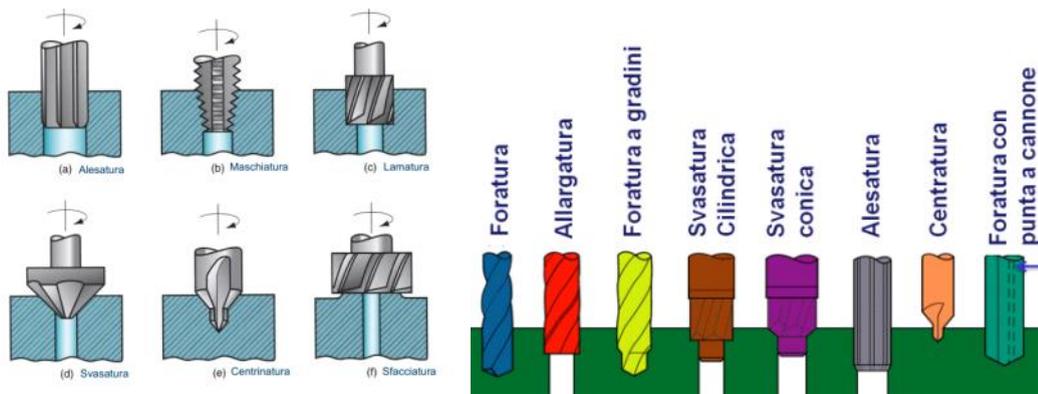
Tasso di asportazione del materiale:

$$Q = \frac{\pi D^2 v_f}{4} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right]$$

Operazioni di foratura

- Alesatura (finitura del foro): si utilizza un utensile multitagliente per allargare un foro guida precedentemente aperto e ottenere un foro che abbia una finitura superficiale di qualità maggiore.
- Maschiatura: attraverso un utensile di forma, si scavano all'interno dei fori i solchi che saranno il filetto del foro filettato
- Svasatura: attraverso punte non cilindriche, ma coniche si creano fori che appunto non hanno forma cilindrica ma a tronco di cono, in particolare si creano gli svassi per i fori.

In generale a seconda del tipo di foro che vogliamo ottenere possiamo impiegare una vasta gamma di utensili.

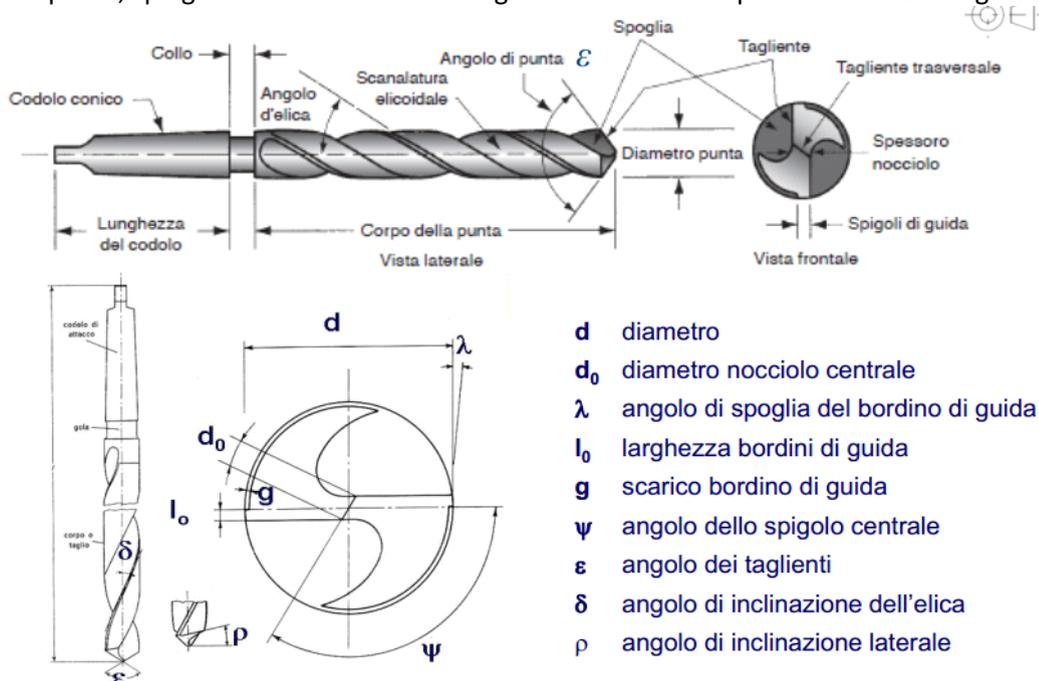


Utensili per forare

l'utensile per forare, nella sua rappresentazione più generica, ha una forma cilindrica, in cui riconosciamo il codolo, caratterizzato da una sua lunghezza, che verrà alloggiato nel mandrino e il corpo della punta. In vista laterale possiamo apprezzare la scanalature elicoidali che partono dai taglienti posti in cima alla punta e la percorrono per tutta la sua lunghezza e servono a spingere i trucioli verso l'esterno del foro. l'elica è caratterizzata da un suo angolo, costante lungo tutta l'elica e misurato a partire dall'asse della punta.

In vista frontale possiamo apprezzare la testa della punta, caratterizzata da un suo diametro, che sarà costante lungo tutto l'utensile, dai due taglienti, dai quali parte l'elica, dall'angolo tra i taglienti e dal nocciolo, sul cui spigolo troviamo il tagliente trasversale.

Al contrario della tornitura, dove il pezzo ruota, qui è la punta a ruotare, quindi sarebbe inutile avere i taglienti lungo tutto il diametro della punta, poiché la velocità di tagli al centro è nulla. Il nocciolo quindi viene progettato per ospitare il tagliente trasversale, uno spigolo vivo che congiunge i due taglienti principali e la cui funzione è deformare il materiale, sfruttando la velocità di avanzamento della punta, spingendo il materiale nella regione centrale della punta verso i due taglienti.

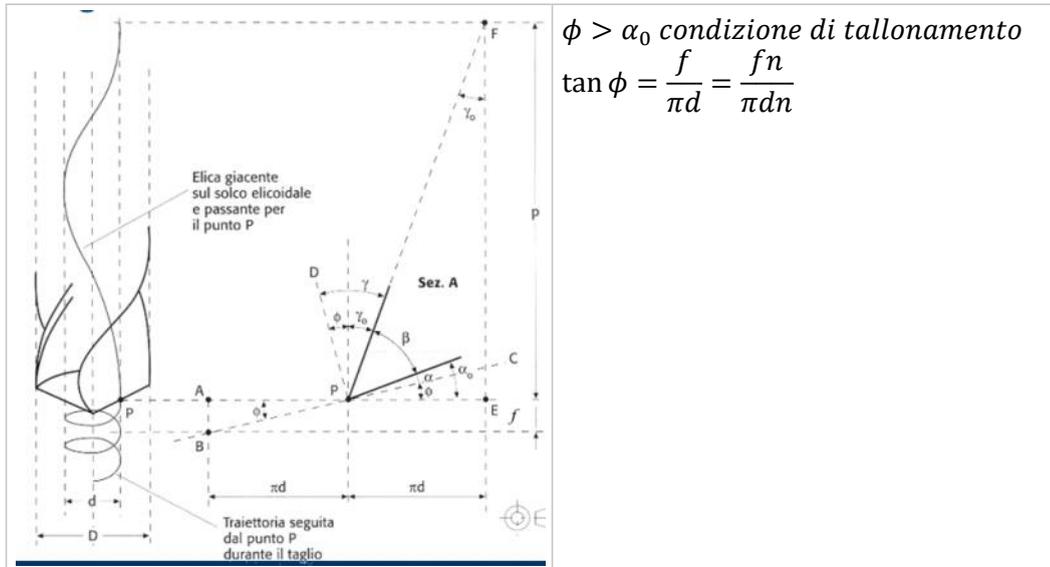


Sezionando la punta lungo un piano parallelo al suo asse in vista laterale, possiamo mettere in evidenza i due angoli di spoglia e l'angolo solido dell'utensile.

Notiamo subito che gli angoli di spoglia e l'angolo solido non dipendono dal punto lungo cui facciamo la sezione.

Tuttavia, scelto un punto p lungo cui fare la sezione, come in figura, notiamo che questo punto descriverà una traiettoria elicoidale propria, con diametro che dipende dalla sua posizione nel diametro di punta e avanzamento pari all'avanzamento imposto. Il punto compie quindi un avanzamento lungo la sua elica, avanzando in modo proporzionale al numero di giri. Dopo un mezzo giro quindi, possiamo dire che il punto di troverà ad aver percorso un tratto πd sull'orizzontale e un tratto f sulla verticale. La tangente dell'angolo del segmento che congiunge il punto iniziale con quello finale ci definisce in primo luogo la condizione di tallonamento, in secondo luogo ci fa capire come per punti molto vicini al centro della punta il tallonamento non sia evitabile in alcun modo,

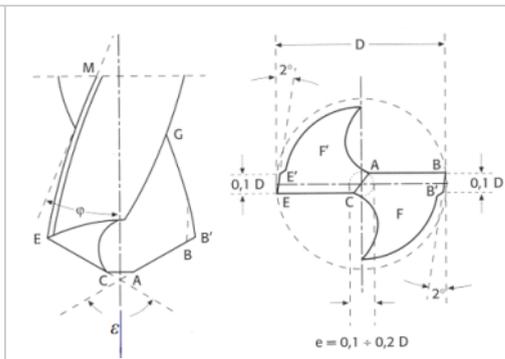
infatti, preso il centro della punta, notiamo come $\phi = 90^\circ$, quindi la sua tangente diverge a infinito, ovvero per non avere tallonamento nella zona centrale avremmo bisogno di un numero di giri infinito.



I parametri di lavorazione

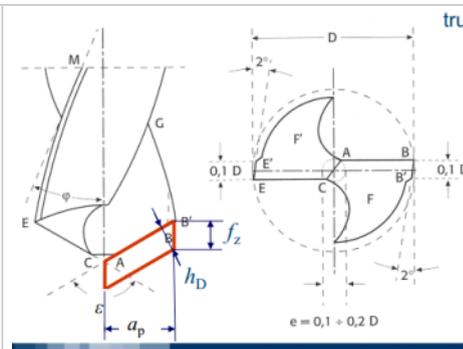
I parametri di lavorazione sono gli stessi della tornitura:

- Diametro della punta D [mm]
- Velocità di rotazione n $\left[\frac{\text{giri}}{\text{min}}\right]$
- Velocità di taglio v_c $\left[\frac{\text{m}}{\text{min}}\right]$
- Avanzamento al giro f_n $\left[\frac{\text{mm}}{\text{giro}}\right]$
- Velocità di avanzamento v_f $\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$



A cui si aggiungono:

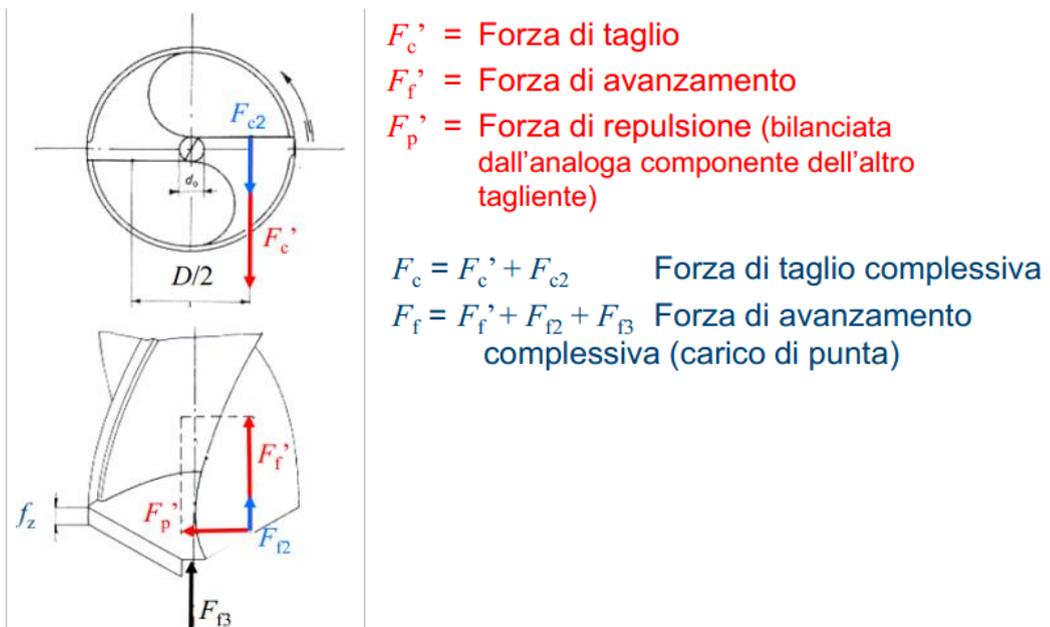
- Avanzamento al dente $f_z = \frac{f_n}{n \text{ denti}} \left[\frac{\text{mm}}{\text{giro} \cdot \text{denti}}\right]$
- Profondità di passata a_p [mm]
- Spessore di truciolo indeformato h_D [mm]
- Area della sezione di truciolo A_D [mm²]



Forze in foratura

Le forze che sono presenti nell'operazione di foratura, che rappresenteremo come esercitate dal pezzo su un solo punto del tagliente sono:

1. Componenti della forza di taglio
2. Forze dovute all'attrito dorsale, il tallonamento
3. Forze sullo spigolo centrale



Avendo però che istante per istante agisce una coppia di forze, e non solo una forza, siamo interessati alla coppia di taglio, visto che ruotando i taglienti generano forze uguali in direzioni opposte rispetto al centro della punta.

Quindi la forza di taglio sul singolo tagliente, sfruttando il metodo delle pressioni di taglio:

$$F_c = k_c A_D [N]$$

Quindi la coppia di taglio è data da:

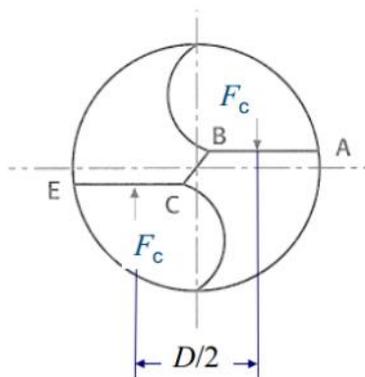
$$M_c = F_c \cdot \frac{D}{2} [Nmm] = \frac{F_c \cdot D}{2 \cdot 1000} [Nm]$$

Possiamo quindi esprimere la potenza di taglio:

$$P_c = M_c \cdot \omega = \frac{k_c A_D D n \pi}{60} [kW]$$

Possiamo esprimere il k_c con anche la formula di Cronenberg:

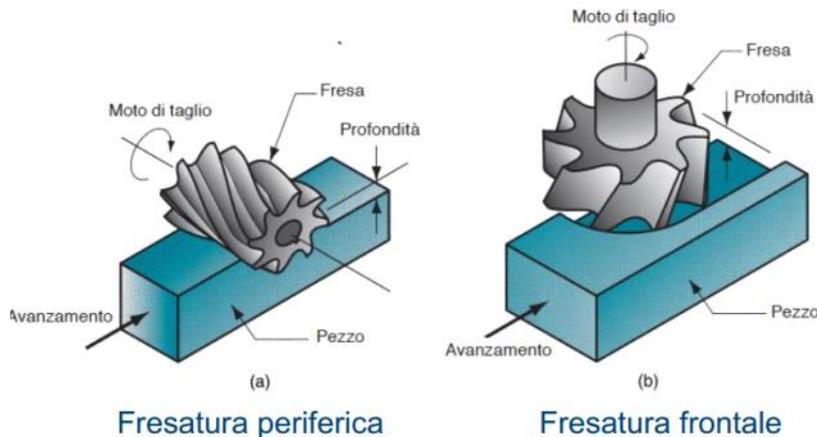
$$k_c = \frac{k_{cs}}{h_D^x} \text{ con } h_D = f_z \sin \frac{\epsilon}{2}$$



3.4 - Fresatura

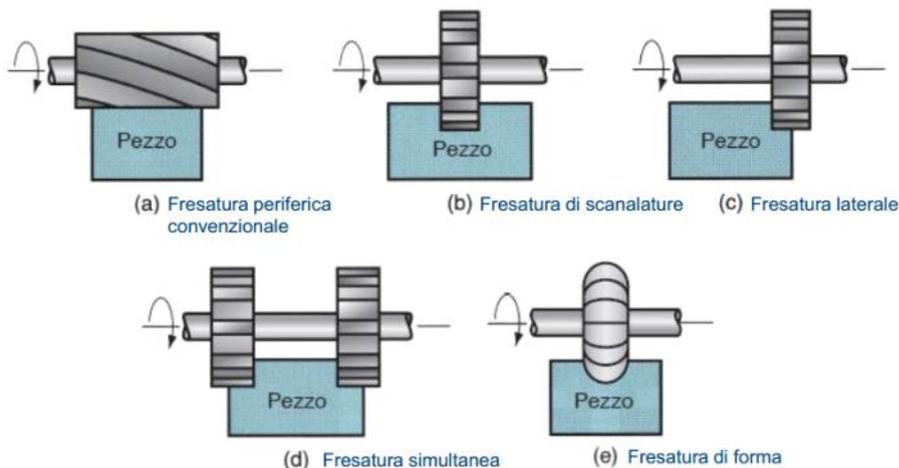
Il processo di fresatura viene fatto mediante una macchina, la fresatrice, su cui è montato un utensile, la fresa. La fresa è un utensile multitagliente, di geometria cilindrica, messo in rotazione da un mandrino. A seconda che la fresa sia progettata per fresatura periferica o frontale, disporrà dei taglienti solo sulla laterale del cilindro o anche sulla base.

In particolare distinguiamo la fresatura periferica, in cui l'asse di rotazione del mandrino è parallelo al piano di spostamento del pezzo e fresatura frontale, quando l'asse è ortogonale al piano.



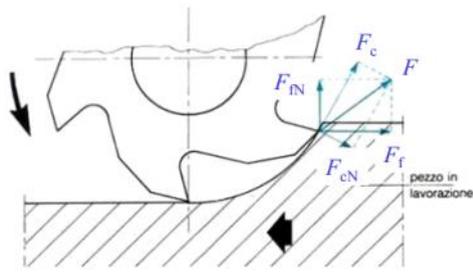
Fresatura periferica

È meno versatile rispetto a quella frontale, tuttavia risulta particolarmente efficace per lavorazioni su lastre di grandi dimensioni, per spianarle o per creare delle scanalature.. Normalmente nella fresatura periferica convenzionale abbiamo la presa di lunghezza maggiore del pezzo, mentre nella fresa di scanalatura la fresa ha la larghezza della scanalatura. Si possono fare scanalatura anche con frese di forma, per dare una forma particolare alla scanalatura.

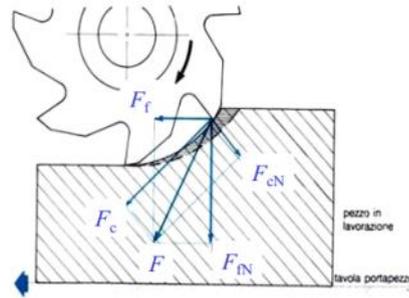


La fresatura periferica, a seconda della direzione di rotazione e di avanzamento del pezzo si può dividere a sua volta in due tipologie.

Diciamo che la fresatura è in discordanza se il moto di avanzamento del pezzo e quello della velocità della fresa sono in direzione opposte, al contrario si dice fresatura in concordanza.



Fresatura in discordanza



Fresatura in concordanza

Le due tipologie comportano notevoli differenze nella meccanica del processo e delle forze di taglio e nello spessore del truciolo.

Fresatura in discordanza

Il dente, entrando ad impegnare il materiale, troverà uno spessore di truciolo molto piccolo, quindi avremo una condizione iniziale di strisciamento, durante il quale il materiale non verrà asportato. Tuttavia lo spessore tende a crescere, mano a mano che il dente si muove lungo il pezzo, generando un aumento graduale delle forze di taglio.

I vantaggi di questa tipologia di fresatura periferica sono quindi l'aumento graduale delle forze di taglio e la stabilità della lavorazione, infatti avendo velocità opposte, il pezzo verrà spinto verso un lato del pianale, restando saldamente fermo nelle sue morse ed evitando che possa slittare. Lo svantaggio inevitabile in questa lavorazione è lo strisciamento iniziale del dente, il quale causa attriti, quindi usura, sul dorso dell'utensile; inoltre le forze di attrito spesso sono tali da rischiare il surriscaldamento dell'utensile.

Fresatura in concordanza

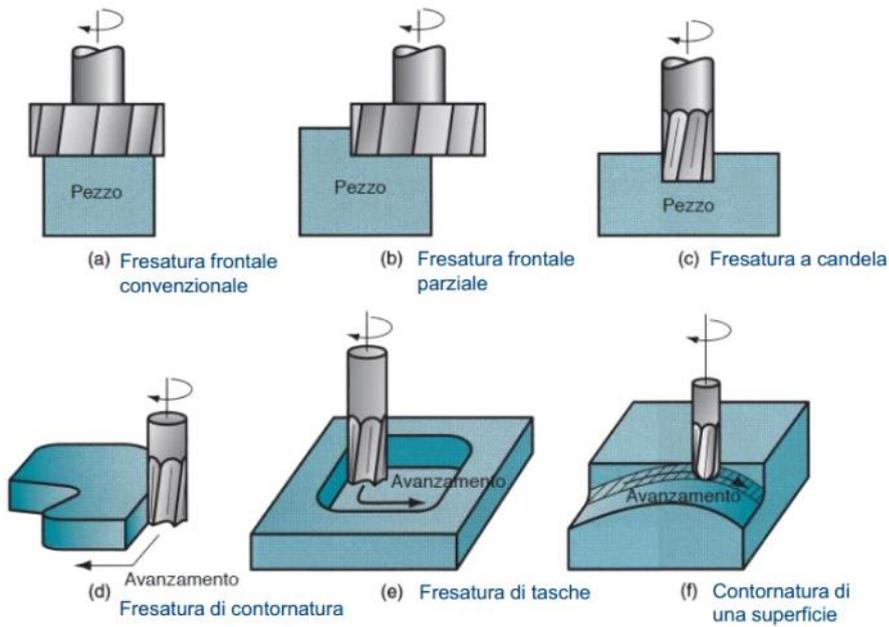
In questo caso non abbiamo strisciamento iniziale, infatti il dente impegna uno spessore abbastanza grande da poter creare un truciolo. Tuttavia il dente impegna il materiale a velocità di regime, quindi quello che si vede è un urto ad alta velocità su uno spessore elevato di truciolo. Quindi, abbiamo bisogno che un tensile progettato per fresatura in concordanza sia tenace, per evitare che il dente si spacchi. Inoltre in questo tipo di fresatura dobbiamo considerare anche l'aumento di temperatura delle punte, che sono sottoposte a numeri cicli termici.

La differenza tra fresatura e tornitura è che la fresatura è un'operazione a taglio interrotto, infatti il singolo dente della fresa è impegnato a intervalli sul materiale, avendo cicli termici brevi e numerosi, causando un maggiore stress termomeccanico sull'utensile; al contrario nella tornitura l'utensile, una volta impegnato il pezzo, si mantiene per almeno qualche secondo nel pezzo, rendendo più gradualmente e meno numerosi i cicli termici.

Fresatura frontale

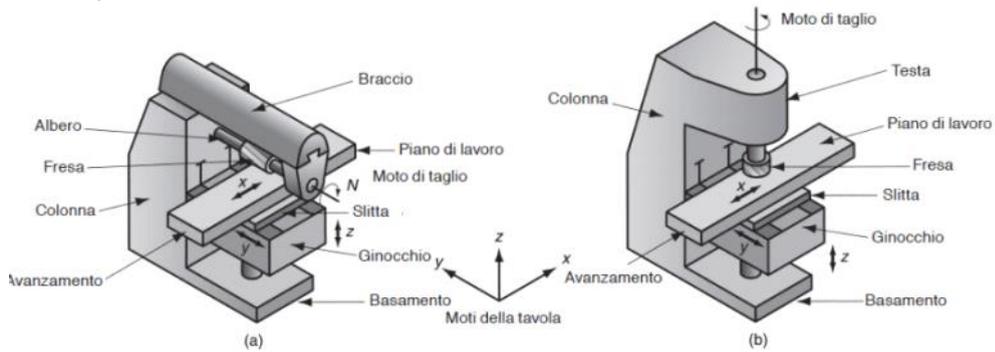
L'operazione convenzionale di fresatura frontale è quella di spianare delle superfici, dove per una ragione di stabilità vogliamo che la fresa sia più grande del pezzo. Tuttavia in operazioni tipiche di fresatura, come la fresatura di tasche o di contornatura, abbiamo bisogno di una fresa più piccola del pezzo per ricavare le geometrie richieste.

Un altro processo tipico è la contornatura di superfici, per fare il quale si usano fresatrici a 5 assi con punte non piatte ma sferiche.

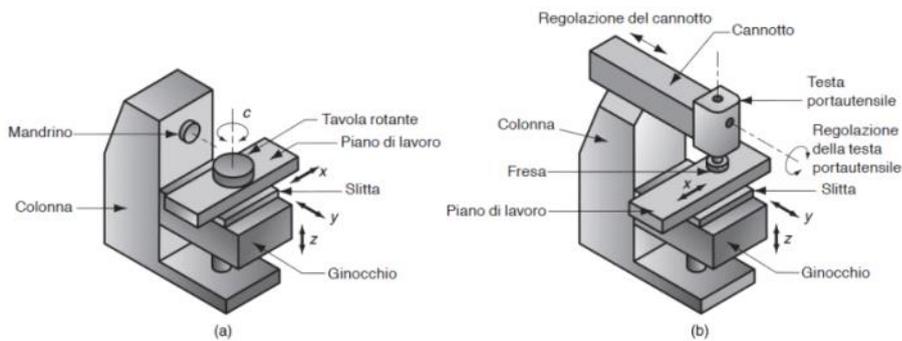


Fresatrici

Esistono varie tipologie di fresatrice, tuttavia in ogni tipologia riconosciamo due assi fissi: l'asse z, parallelo alla direzione del mandrino e l'asse x ad esso ortogonale. In generale il mandrino è fisso e a muoversi è il pezzo.

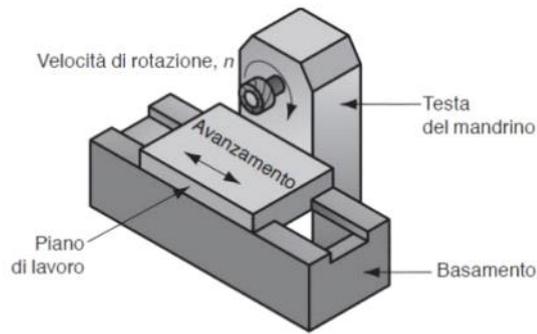


Fresatrice ginocchio e colonna orizzontale e verticale



Fresatrice universale

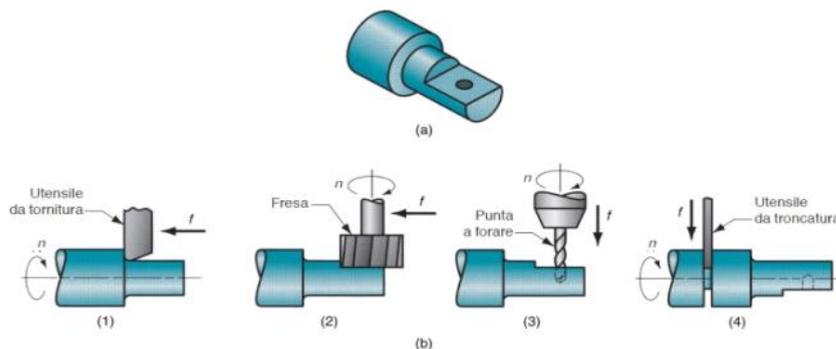
Fresatrice a cannotto



Fresatrice a banco fisso simplex con mandrino orizzontale

Centri di tornitura-fresatura

Attualmente esistono macchine a 5 assi in grado di poter eseguire le operazioni di tornitura, foratura e fresatura, senza dover spostare il pezzo dalla macchina. In queste macchine, il pezzo viene fissato a un mandrino per poterlo tornire o ruotare in posizione, il mandrino della fresa invece è posto su un supporto mobile triassiale che gli permette di spostarsi lungo il pezzo.

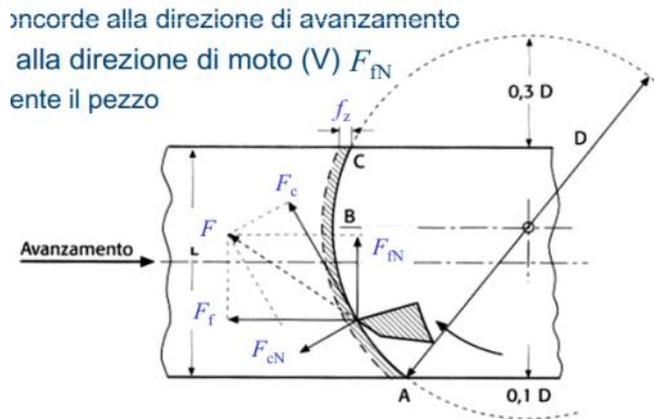


Scomposizione delle forze

Analizzando la forza che un singolo dente esercita sul pezzo, possiamo scomporla nella direzione di avanzamento e in quella ortogonale ad essa. La forza normale alla direzione di avanzamento tende a far spostare il pezzo sempre nella direzione, quindi supponendo di osservare pezzo e utensile dall'alto e che la testa della fresa stia girando in senso orario, allora avremo che la risultante normale della forza tende a spingere il pezzo sempre verso l'alto, qualunque sia il tratto di arco che il dente sta impegnando nel materiale.

La componente tangenziale invece si comporta diversamente a seconda che il dente sia sopra o sotto all'asse di mezzeria della fresa. In particolare sull'asse di mezzeria avremo che il dente esercita una forza nulla nella direzione di avanzamento, mentre al di sotto di essa, in quello che chiamiamo arco in ingresso, la componente di avanzamento tende a spingere il pezzo contro i bloccaggi in fondo alla direzione di avanzamento, comportamento che si inverte nell'arco di uscita.

Quando è possibile infatti cercheremo di avere lunghezze diverse per i due archi, per evitare che il numero di denti impegnati in presa sui due tratti sia lo stesso e che quindi la risultante delle forze in direzione di avanzamento si annulli, rischiando che la testa della fresa si incastri nel pezzo, danneggiando sé stessa e il mandrino



Parametri di taglio

$$n = \frac{v_c}{\pi D}$$

n velocità di rotazione (giri/min)
 v_c velocità di taglio (m/min)
 D diametro della fresa (mm)

L'avanzamento al dente f_z (mm/(giro*dente)) può essere convertito in velocità di avanzamento v_f (mm/min) tenendo conto della velocità del mandrino e del numero di taglienti della fresa Z

$$v_f = n Z f_z$$

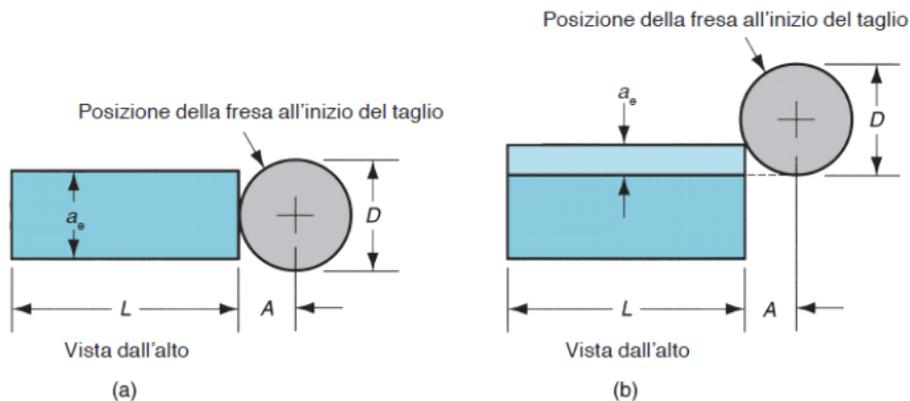
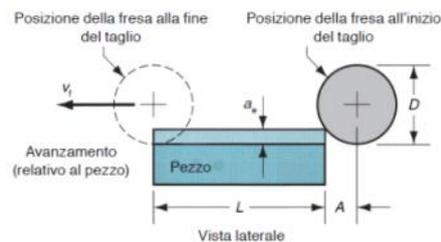
Q tasso di asportazione del materiale (mm³/min)
 a_p profondità di passata assiale
 a_c profondità di passata radiale

$$Q = a_p a_c v_f$$

T_m tempo di lavorazione (min)
 L lunghezza del pezzo (mm)
 A extracorsa in ingresso

$$T_m = \frac{L + A}{v_f}$$

$$A = \sqrt{a_c (D - a_c)}$$



$$A = 0,5 \left(D - \sqrt{D^2 - a_c^2} \right)$$

$$A = \sqrt{a_c (D - a_c)}$$

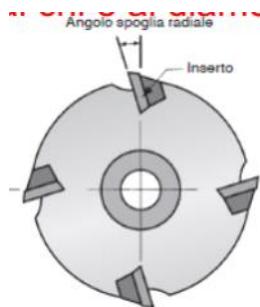
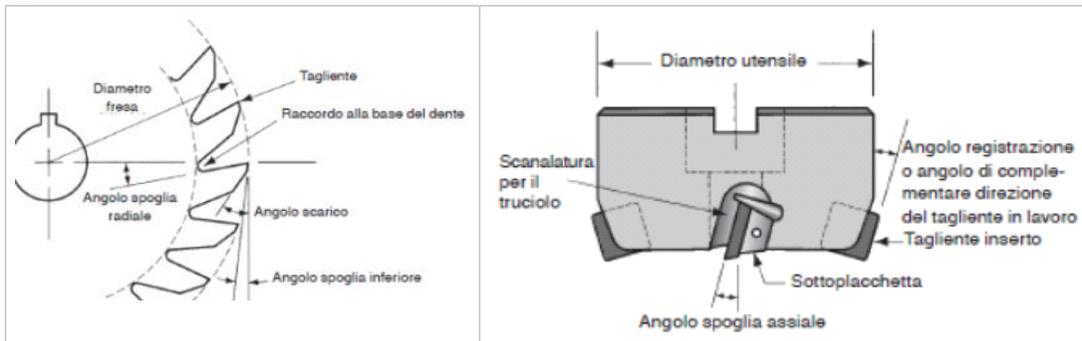
Geometrie fondamentali

Negli utensili di taglio, andremo sempre a definire gli angoli che caratterizzano il tagliente e la sua posizione spaziale. Come nel caso della foratura, per la particolare geometria della testa della fresa e del tagliente, non conviene individuare un piano di sezione lungo il tagliente, invece è più conveniente analizzare la testa da una sezione ortogonale al suo asse e una parallela ad esso, potendo così individuare gli angoli di spoglia e gli angoli di registrazione.

In particolare individuiamo:

- Il tagliente: ovvero lo spigolo vivo esterno al singolo dente della fresa
- Il raccordo alla base del dente
- l'angolo di spoglia radiale: ovvero l'angolo compreso tra il raggio, che congiunge centro e tagliente e il petto dell'utensile

- l'angolo di spoglia inferiore, ovvero l'angolo compreso tra la retta ortogonale al raggio centro-tagliente e tangente al tagliente stesso e il dorso dell'utensile
- l'angolo di scarico, ovvero quanto è inclinato il tratto successivo al dorso dell'utensile
- l'angolo di registrazione, che ci dice quanto il tagliente è inclinato verso l'interno della fresa stessa o verso l'esterno
- l'angolo di spoglia assiale, che ci indica quanto il tagliente è inclinato sul suo asse, sempre guardando la fresa in vista laterale.



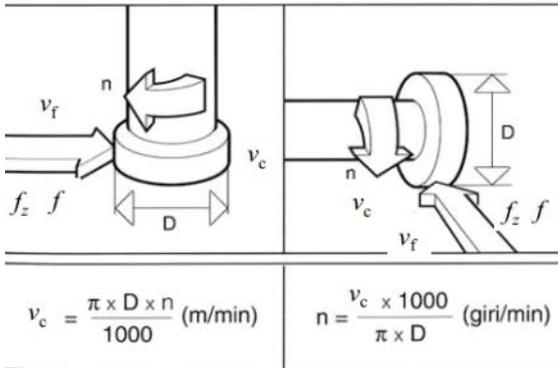
Le geometrie con cui possiamo disporre i taglienti sono:

- Doppio negativa, in cui l'angolo di spoglia assiale e radiale sono negativi, indicata con macchine ad elevata potenza e stabilità, per materiali e condizioni che richiedono notevoli sollecitazioni, ad esempio con acciai e ghise ad elevata durezza.
- Doppio positiva, in cui angolo di spoglia assiale e radiale hanno inclinazione positiva, indicata su macchine poco potenti o poco stabili che devono lavorare su materiali dolci in condizioni di basso stress meccanico, come per allumini e acciai duttili.
- Positivo/negativa, situazione intermedia tra le due precedenti, dove l'inclinazione positiva dell'angolo di spoglia assiale favorisce l'evacuazione del truciolo, mentre l'inclinazione negativa di quello radiale favorisce l'avanzamento e la profondità di taglio.



Parametri di lavorazione

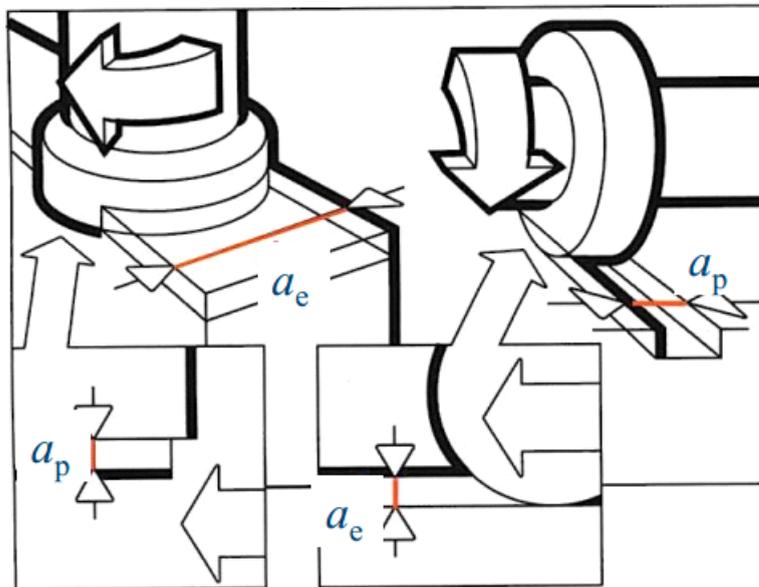
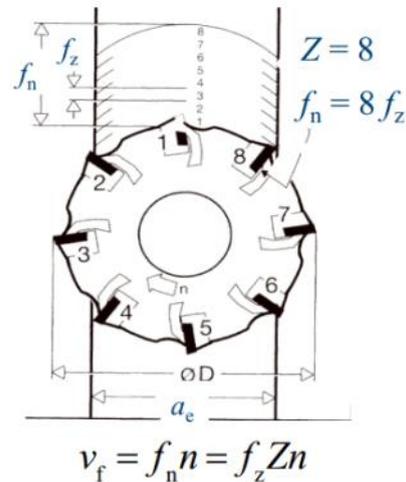
- D [mm] diametro della fresa
- n [giri/min] velocità di rotazione
- v_c [m/min] velocità di taglio
- f_n [mm/giro] avanzamento al giro
- v_f [mm/min] velocità di avanzamento
- f_z [mm/(giro*dente)] avanzamento al dente
- h_D [mm] spessore di truciolo indeformato
- A_D [mm²] area della sezione di truciolo



$$v_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \text{ (m/min)}$$

$$n = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times D} \text{ (giri/min)}$$

Nomenclatura: ISO 3002/1-1982



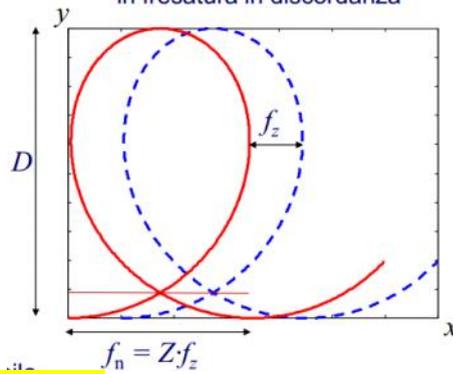
Rispetto ai processi di asportazione di truciolo visti fino ad ora, dobbiamo aggiungere due parametri che indicano, come in figura, la profondità di passata in direzione assiale (a_p) e in direzione radiale (a_e) rispetto alla fresa stessa.

Moti nella fresatura periferica

Il moto di un singolo punto p appartenente alla fresa è composto dal moto traslatorio lungo l'asse x , ovvero nella direzione di spostamento e da quello rotatorio rispetto all'asse della fresa. La combinazione di questi due moti in fresatura discorde produce una traiettoria che è un cicloide e questa traiettoria resta impressa, come per la tornitura, sulla superficie del pezzo lavorato. In particolare analizzando il pezzo possiamo trovare l'avanzamento per dente f_z

NOTABENE PER ESAME!!!!

Traiettoria del dente
in fresatura in discordanza



FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

Spessore di truciolo, fresatura periferica

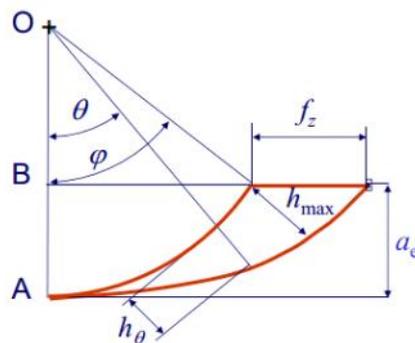
Nella fresatura, per effetto della rotazione del dente e dell'avanzamento del pezzo, abbiamo che anche lo spessore di truciolo è variabile. In generale possiamo definire lo spessore istantaneo di truciolo, che dipende unicamente dalla posizione del dente lungo il truciolo. In generale possiamo identificare una coordinata angolare θ che varia da 0, inizio dell'arco a ϕ .

Conoscendo anche l'avanzamento e conoscendo la base del triangolo che così si crea, possiamo definire sia lo spessore del truciolo che la sua area.

$$h_\theta \cong f_z \sin \theta$$

$$A_\theta = h_\theta \cdot b$$

$$\chi_{re} = 90^\circ \rightarrow b = a_p$$

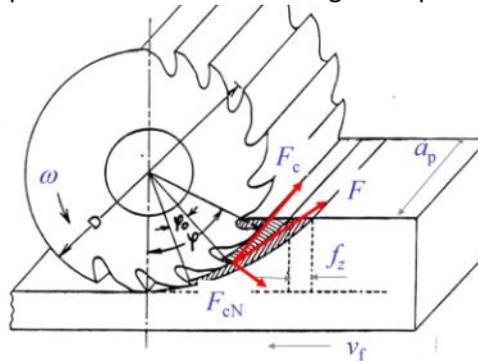


Considerando l'i-esimo tagliente, possiamo definire come segue l'espressione della potenza di taglio

Considerando l'i-esimo tagliente in presa:

$$F_{c,i} = k_{c,i} \cdot A_{\theta_i} = k_{c,i} \cdot h_{\theta_i} \cdot a_p$$

con: $k_{c,i} = k_{cs} \cdot h_{\theta_i}^{-x}$



$$\rightarrow F_{c,i} = k_{cs} \cdot h_{\theta_i}^{-x} \cdot h_{\theta_i} \cdot a_p = k_{cs} \cdot h_{\theta_i}^{1-x} \cdot a_p \cong k_{cs} \cdot (f_z \cdot \text{sen} \theta_i)^{1-x} \cdot a_p$$

$$M_{c,i} = F_{c,i} \cdot \frac{D}{2} \rightarrow M_c = \sum_i M_{c,i} = \sum_i \left(F_{c,i} \cdot \frac{D}{2} \right) \rightarrow P_c = \frac{M_c \cdot \omega}{\eta}$$

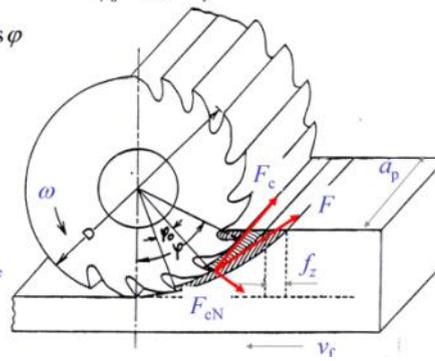
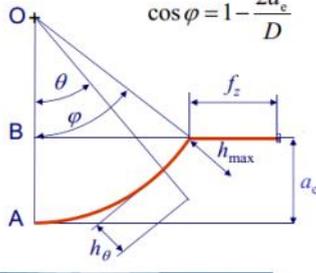
Tuttavia notiamo che essa varia in funzione del tempo, quindi, quando i denti in presa simultanea sul materiale sono 3 o più, possiamo calcolare la potenza di taglio avvalendoci della definizione di spessore medio di truciolo.

z : numero medio di taglienti in presa

$$z = \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{Z}{2\pi} \varphi$$

$$OB = \frac{D}{2} - a_e = \frac{D}{2} \cos \varphi$$

$$\cos \varphi = 1 - \frac{2a_e}{D}$$



Lo spessore medio (h_m) del truciolo vale:

$$h_m = \frac{1}{\varphi} \int_0^{\varphi} h_{\theta} \cdot d\theta = \frac{1}{\varphi} \int_0^{\varphi} f_z \cdot \sin \theta d\theta = \frac{f_z}{\varphi} (1 - \cos \varphi)$$

Dato che $OB = \frac{D}{2} - a_e = \frac{D}{2} \cos \varphi$ si ha $\cos \varphi = 1 - \frac{2a_e}{D}$

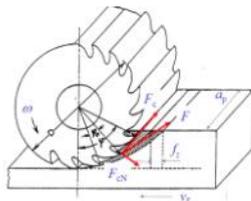
Spessore di truciolo medio

$$h_m = \frac{2f_z a_e}{\varphi D}$$

NB:
 • h_m NON dipende dal tempo
 • φ in radianti

Sezione di truciolo media

$$A_m = h_m \cdot a_p = \frac{2f_z a_e a_p}{\varphi D}$$



$$\kappa_{rc} = 90^\circ \rightarrow b = a_p$$

$$h_m = \frac{2f_z a_e}{\varphi D} \quad A_m = h_m \cdot b = \frac{2f_z a_e a_p}{\varphi D}$$

$$z = \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{Z}{2\pi} \varphi \quad \omega = \frac{2\pi n}{60}$$

Considerando la forza media esercitata da un tagliente:

$$F_{c,m} = k_{c,m} \cdot A_m = k_{c,m} \cdot h_m \cdot a_p \quad \text{con:} \quad k_{c,m} = k_{c,s} \cdot h_m^{-x}$$

$$\rightarrow M_{c,m} = F_{c,m} \cdot \frac{D}{2} \rightarrow M_c \cong z \cdot M_{c,m} \rightarrow P_c = \frac{M_c \cdot \omega}{\eta}$$

$$\rightarrow P_c = \frac{z \cdot M_{c,m} \cdot 2\pi n}{\eta \cdot 60} = \frac{z \cdot F_{c,m} \cdot D \cdot 2\pi n}{2 \cdot \eta \cdot 60} = \frac{z \cdot k_{c,m} \cdot h_m \cdot a_p \cdot D \cdot 2\pi n}{2 \cdot \eta \cdot 60}$$

$$\rightarrow P_c = \frac{Z}{2\pi} \varphi \cdot \frac{k_{c,m} \cdot a_p \cdot D}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{2f_z a_e}{\varphi D} \cdot \frac{2\pi n}{60} \rightarrow P_c = \frac{k_{c,m} \cdot Z \cdot f_z \cdot n \cdot a_p \cdot a_e}{60 \cdot \eta}$$

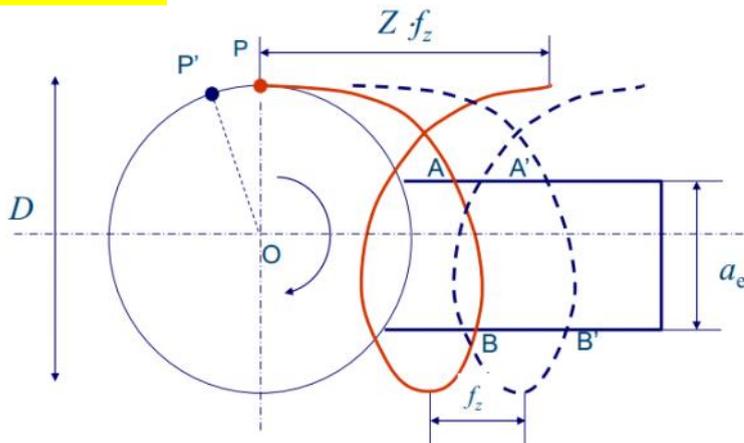
$$P_c = \frac{k_{c,m} \cdot v_f \cdot a_p \cdot a_e}{60 \cdot 1000 \cdot \eta} \quad \text{NB: } P_c \text{ NON dipende dal tempo}$$

Moti nella fresatura frontale

Ipotizziamo che il diametro della fresa sia maggiore di a_e e quindi a_e è la dimensione della barra che stiamo spianando.

Anche in questo caso la ogni punto della fresa descrive una traiettoria a cicloide.

NOTABENE PER ESAME!!!!



FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

Quindi avremo dei solchi lasciati dalla fresa sul materiale che avranno la forma del cicloide, sia sul lato di andata, quando il materiale esporta effettivamente materiale, sia sulla parte di ritorno. Questo avviene quando l'asse della fresa è perfettamente perpendicolare al pezzo. Queste traiettorie possono essere approssimate ad archi di circonferenza, se e soltanto se vale la nostra approssimazione iniziale, fresa più larga del pezzo.

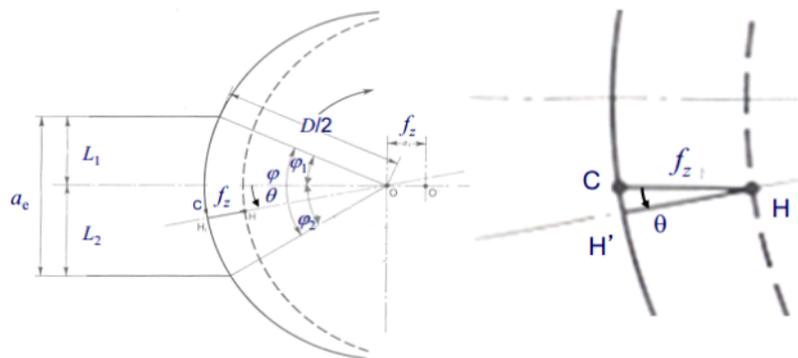
Spessore di truciolo

Anche in questo caso dobbiamo esprimere la posizione angolare del singolo dente in funzione dell'angolo istantaneo θ_i che indica la posizione dell'i-esimo dente. Diciamo che teta è nullo sull'asse di avanzamento.

L'arco di contatto dipenderà ancora dell'numero di denti, dall'affondamento a_e e dal diametro della fresa stessa.

Per fare i conti, conviene spezzare l'arco che la fresa descrive muovendosi sul materiale in due archi, lungo l'asse di mezzeria della fresa stessa, notando che per le condizioni imposte, avremo un arco più corto e uno più lungo.

$$h_\theta = HH' \cong f_z \cdot \cos \theta$$



$$\kappa_{re} = 90^\circ \rightarrow b = a_p$$

$$\theta = \omega \cdot t$$

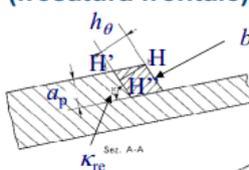
Per il calcolo dello spessore di truciolo istantaneo, ci rifacciamo esattamente a quanto visto nel caso di fresatura periferica, mentre per l'approccio allo spessore medio di truciolo abbiamo:

$$h_m = \frac{1}{\varphi} \int_{-\varphi_2}^{\varphi_1} h_\theta \cdot d\theta = \frac{1}{\varphi} \int_{-\varphi_2}^{\varphi_1} f_z \cdot \cos \theta d\theta = \frac{f_z}{\varphi} [\text{sen } \varphi_1 - \text{sen}(-\varphi_2)] = \frac{f_z}{\varphi} (\text{sen } \varphi_1 + \text{sen } \varphi_2)$$

ma: $a_e = \frac{D}{2} (\text{sen } \varphi_1 + \text{sen } \varphi_2) \rightarrow h_m = \frac{f_z}{\varphi} \cdot \frac{2a_e}{D} = \frac{2f_z a_e}{\varphi D}$

Quindi, possiamo esprimere in funzione dello spessore medio la forza media esercitata da un tagliente:

(fresatura frontale)



$$\kappa_{re} \neq 90^\circ \rightarrow b = \frac{a_p}{\text{sen } \kappa_{re}}$$

$$h_\theta = HH'' = HH' \cdot \text{sen } \kappa_{re} \cong f_z \cdot \cos \theta \cdot \text{sen } \kappa_{re}$$

$$h_m = \frac{2f_z a_e}{\varphi D} \cdot \text{sen } \kappa_{re} \quad \text{NB: } h_m \text{ CAMBIA con } \kappa_{re}$$

$$h_{ex} = f_z \cdot \text{sen } \kappa_{re} \quad \text{Spessore massimo di truciolo}$$

$$A_m = h_m \cdot b = \frac{2f_z a_e}{\varphi D} \cdot \text{sen } \kappa_{re} \cdot \frac{a_p}{\text{sen } \kappa_{re}} = \frac{2f_z a_e a_p}{\varphi D}$$

$$\text{NB: } A_m \text{ NON cambia con } \kappa_{re}$$

Considerando la forza media esercitata da un tagliente:

$$F_{c,m} = k_{c,m} \cdot A_m = k_{c,m} \cdot h_m \cdot b \quad \text{con: } k_{c,m} = k_{cs} \cdot h_m^{-x}$$

Rugosità superficiale

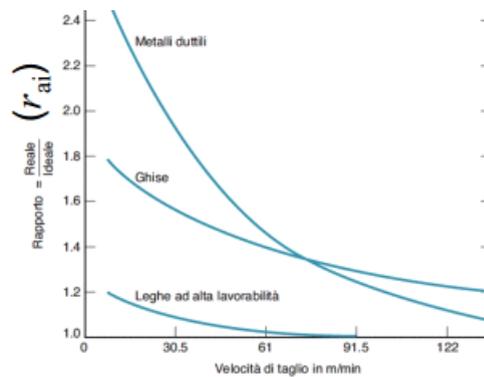
In fresatura periferica la rugosità dipende dall'avanzamento del singolo dente e dalla dimensione dell'utensile.

Le differenze che si riscontrano tra la rugosità teorica e quella reale sono dovute a vari fattori non prevedibili:

- Tagliante di riporto, ovvero quando un pezzo di truciolo si attacca sopra al tagliante dell'utensile, diventando esso stesso l'effettivo tagliante del processo, con una geometria non definita e quindi che intacca la finitura superficiale. Al distacco inoltre, il tagliante di riporto usura anche l'inserto tagliante del nostro utensile.
- Impatto del truciolo contro il pezzo
- Strappamento del truciolo in metalli duttili
- Cricche superficiali per i metalli fragili
- Strisciamento del dorso sulla parte lavorata
- Vibrazioni autoeccitate, ovvero quando le vibrazioni create dalle forze di taglio, sono tali da essere vicini alla vibrazione propria del nostro sistema, causando l'effetto di risonanza e rendendo la lavorazione instabile.

$$R_i = \frac{f^2}{32r_e} \quad R_a = r_{ai} R_i$$

Rapporto tra la rugosità superficiale reale e ideale per diverse classi di materiali (R_a è il valore stimato della rugosità reale, r_{ai} è il rapporto tra rugosità reale e ideale (v. grafico) e R_i è valore della rugosità ideale)



Design for machining

In questo paragrafo verranno trattati gli accorgimenti che il progettista deve prendere quando progetta un pezzo.

- Quando è possibile, il progetto deve essere fatto in modo tale da evitare le lavorazioni per asportazioni di truciolo, quindi con processi net shape o near net shape.
- Usare l'asportazione di truciolo per ottenere buone tolleranze e finiture o feature particolari
- Progettare le tolleranze in modo tale che siano realmente necessarie ai fini progettuali. Ottenere una determinata tolleranza costa, più questa sarà stringente e più verrà a costare in termini di tempi e di processi da impiegare
- Evitare angoli acuti e spigoli vivi
- Evitare fori profondi
- Partire da grezzi standard, per evitare di dover rifare i modelli di fonderia ad esempio e gli stampi
- Evitare pezzi lunghi e sottili, per garantire buone proprietà meccaniche
- Evitare di i sottosquadri non necessari che impongono necessariamente step di lavorazioni successive
- Scegliere materiali a elevata lavorabilità, su cui quindi possiamo usare velocità di taglio elevate
- Ridurre il numero di piazzamenti, inserendo le feature su un solo lato ad esempio
- Progettare utilizzando il più possibile utensili standard e meno utensili speciali o di forma
- Usare meno utensili possibili.

3.5 - Lavorazioni a moto di taglio rettilineo

Principali lavorazioni

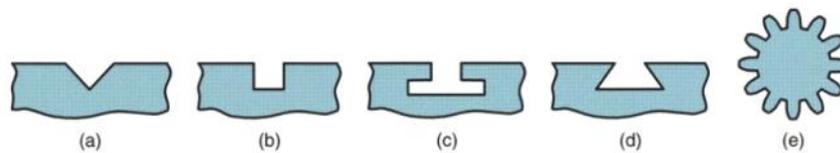
Le principali lavorazioni con moto di taglio rettilineo sono:

- La limatura, eseguita dalla limatrice
- La piallatura, eseguita dalla piallatrice
- La strozzatura, eseguita dalla strozzatrice
- La brocciatura, eseguita dalla brocciatrice
- La segatura, eseguita dalla segatrice

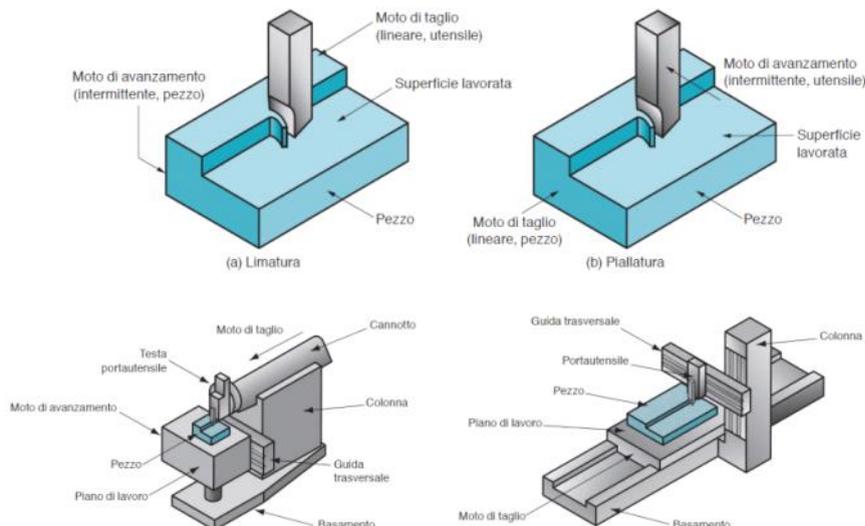
Ciò che accumuna tutti questi processi è che impiegano un moto di taglio rettilineo, solitamente infatti si muovono su di un solo asse o in rari casi su due assi interpolati.

Limatura e piallatura

Caratteristica principale di questi due processi è che hanno sezione di taglio costante. Vengono usate per creare feature geometriche, anche complesse, lungo tutta la lunghezza del pezzo e con una sezione costante. Ad esempio scanalature o profili particolari sui perimetri degli alberi. Permettono di ottenere una buona tolleranza dimensionale e una buona finitura della superficie lavorata.

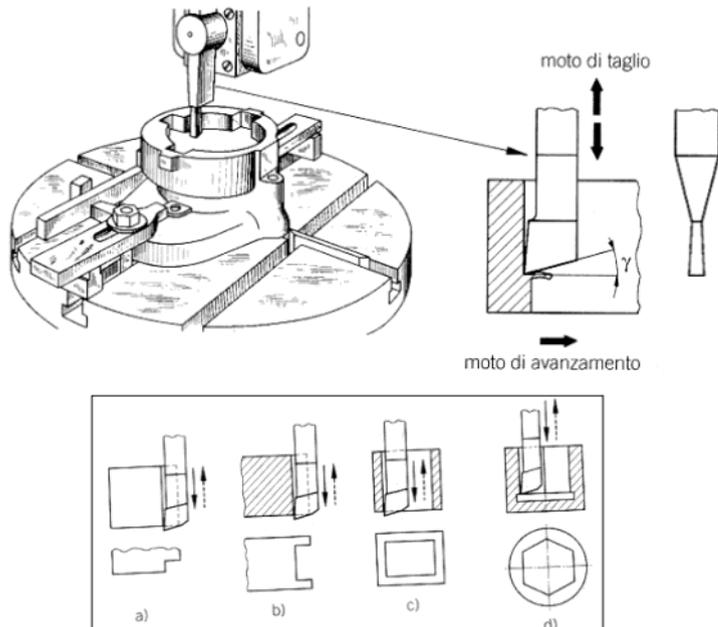


La lavorazione con questo tipo di utensili è caratterizzata da una corsa di andata, lungo la quale effettivamente rimuovono il materiale e una di ritorno in cui non lavorano la superficie e quindi può essere fatta a velocità più elevate rispetto a quella di andata. Il moto può essere conferito o al pezzo o all'utensile ed è di tipo alternativo (valido per tutte le lavorazioni tranne per la brocciatura).

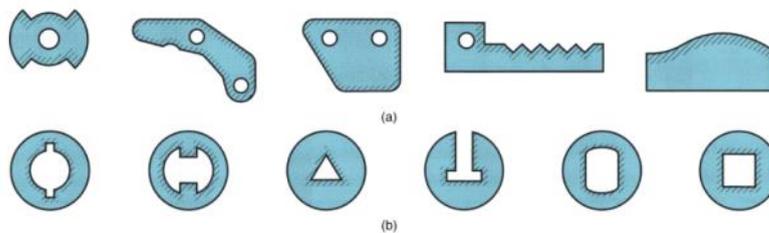


Strozzatura

Serve a realizzare superfici interne ad un pezzo con spigoli vivi, come fori poligonali; cave per l'alloggiamento di chiavette e linguette o profili scanalati in genere.



Brocciatura



Può essere eseguita su geometrie prismatiche o assialsimmetriche. Si usa quando abbiamo elevate profondità di passata complessive da rimuovere, quindi si usano utensili traslanti multitagliente, ottenendo un lavoro sequenziale da parte degli n taglienti. La lunghezza di questi utensili è molto maggiore rispetto alla lunghezza del pezzo stesso.

Le broccie sono utensili speciali, ovvero specialmente progettati per quella lavorazione, quindi utensili di forma, di grandi dimensioni e quindi molto costosi.

Ciascun dente della broccia si fa carico di asportare una porzione i della profondità di passata complessiva da asportare.

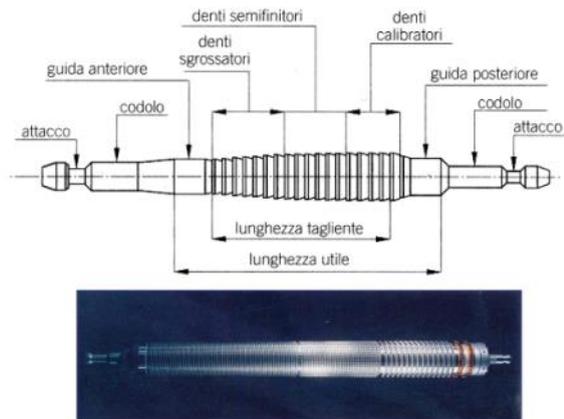
Il tipo di brocciatura più comune è quella interna, quindi usata per ampliare, sagomare e modificare le cavità interne dei pezzi, tuttavia viene anche usata con le medesime finalità su superfici esterne.

Nella progettazione della broccia, vanno definiti il numero di denti, la loro profondità, il passo dei denti, il valore dell'affondamento per dente. Quindi noti il perimetro del dente, la dimensione di i e il passo, si può calcolare il volume contenuto nel dente, che deve essere molto più grande della quantità di truciolo che asporta il singolo dente, infatti non abbiamo un metodo per espellere il truciolo prima che il dente abbia finito di asportare la quantità i di materiale.

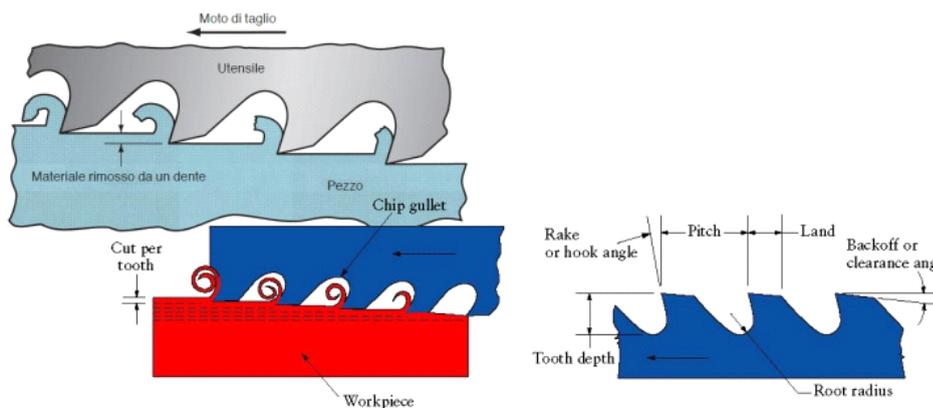
L'utensile è formato da 3 zone:

- I primi denti che ingaggiano il pezzo sono i denti sgrossatori,
- La zona centrale è quella di semifinitura
- Gli ultimi sono i denti che fanno la finitura (o calibratura) vera e propria della geometria

L'utensile è un utensile integrale con due codoli, che si attaccano nella macchina che esegue la lavorazione.



Parametri di taglio



Parametri:

v_c Velocità di taglio

i Incremento radiale per dente

p Passo

b perimetro del tagliente

t altezza del dente

l lunghezza del foro

Elementi di progettazione - esempio di brocciatura di un foro

Supponiamo di voler allargare un foro passante da un diametro di 94mm a uno di 100mm. La lunghezza del foro passante è di 200mm. Per progettare la nostra broccia dobbiamo fissare un parametro da cui poi calcolare gli altri, quindi supponiamo che $i = 0.08 \frac{mm}{dente}$ e che sia costante.

La quantità di materiale da asportare sul raggio vale:

$$d = \frac{\Delta D}{2} = 3mm$$

Quindi il numero di denti della broccia è:

$$Z = \frac{d}{i} = \frac{3}{0.08} = 37.5 \cong 38$$

Poiché abbiamo dovuto arrotondare il numero di denti, dobbiamo ricalcolare il valore di i :

$$i = \frac{d}{Z} = \frac{3}{38} = 0.079 \left[\frac{mm}{dente} \right]$$

Determiniamo ora quale sarà il passo della nostra broccia, sapendo che $V_{vano} \geq kV_{truciolo}$ e che da progetto abbiamo preso $k = 13$ e che valgono le seguenti relazioni:

$$V_{vano} = \frac{ptb}{2}$$

$$V_{truciolo} = ilb$$

$$m = \frac{p}{t} \in [2,3]$$

Il rapporto di forma m è verificato per via sperimentale che è efficace quando è compreso nell'intervallo $[2,3]$. Quindi il passo vale:

$$p \geq \sqrt{2mkil} \rightarrow p \geq \sqrt{2 \cdot 3 \cdot 13 \cdot 0.079 \cdot 200} = 35mm$$

Calcoliamo quindi il numero di denti in presa sapendo che anche esso dovrà appartenere a un intervallo ben definito:

$$z = \frac{l}{p} = \frac{200}{35} \cong 6 \in [3,9]$$

Quindi definiamo la lunghezza della parte dentata e la lunghezza totale dell'utensile

$$L_{dent} = Zp = 38 \cdot 35 = 1330mm \rightarrow L_{tot} = 1500mm$$

E calcoliamo infine la potenza di lavoro e il tempo alla velocità di lavoro. Velocità che deve essere nota deterministicamente.

$$k_c = 0.025 \frac{kW}{cm^3/min}; \quad v_c = 3 \frac{m}{min}$$

$$P_m = \frac{z \cdot k_c \cdot i_b \cdot v_c}{\eta}$$

$$t_m = \frac{L_{tot} + e + l}{v_c}$$

Macchine da brocciatura

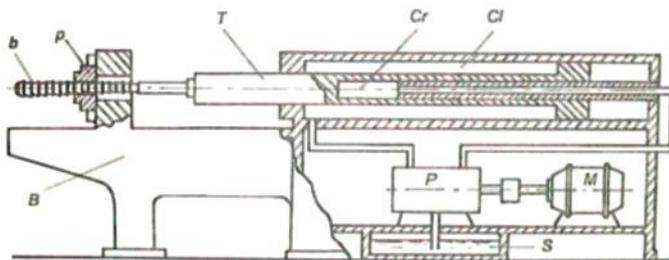


Fig. 15.8 - Schema di una brocciatrice e relativo azionamento idraulico.

<i>p</i> = pezzo,	<i>Cl</i> = cilindro comando lavoro,
<i>b</i> = broccia,	<i>P</i> = pompa,
<i>B</i> = banco,	<i>M</i> = motore,
<i>T</i> = mandrino di trazione,	<i>S</i> = serbatoio,
<i>Cr</i> = cilindro comando ritorno,	



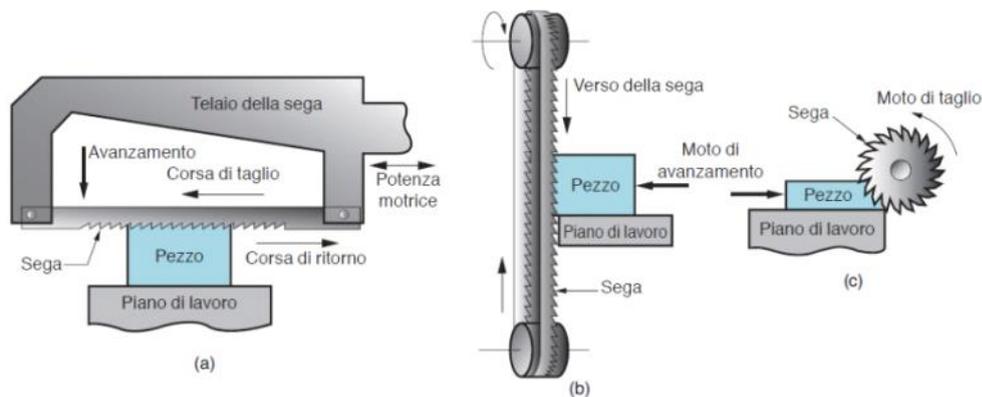
Schema di brocciatrice orizzontale

Brocciatrice verticale

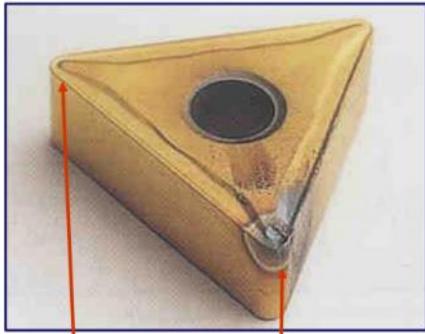
Segatura

Esistono tre tipi principali di segatura a seconda della configurazione che sfruttano:

- Segatura alternata, in cui l'utensile avanza sia nella profondità del pezzo che compie il moto alternato di taglio.
- A nastro verticale, in cui l'utensile è costituito da un nastro dentato che ruota e il pezzo avanza verso i denti dell'utensile
- Circolare, in cui l'utensile ha forma, ruota sul suo asse e il pezzo avanza verso l'utensile.



3.6 - Usura dell'utensile



Tagliente nuovo **Zona usurata**



Come si può vedere dalla foto, l'usura che un utensile subisce durante la lavorazione è evidente e viene maggiormente evidenziata dal fatto che l'utensile viene placcato con un materiale di colore diverso da quello che costituisce la placca.

In particolare possiamo subito riconoscere dai segni dell'usura il petto dell'utensile stesso, infatti su di esso si è formato un avvallamento dovuto allo strisciamento del truciolo. Notiamo poi che abbiamo un labbro di usura, che si va a formare sul fianco dell'utensile stesso, infine si può vedere come lo spigolo del tagliente sia rimasto deformato plasticamente.

L'usura dell'utensile

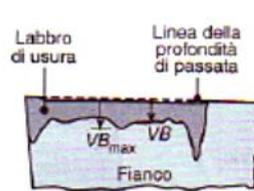
Un utensile può danneggiarsi a causa di fratture o di scheggiature della stessa placchetta, per la deformazione plastica, quando viene sottoposto a sforzi che superano il carico di snervamento del materiale oppure può subire un'usura graduale.

L'usura dell'utensile avviene per:

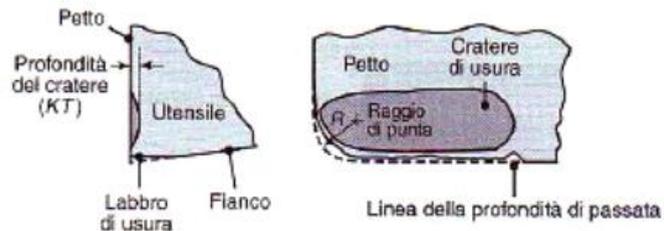
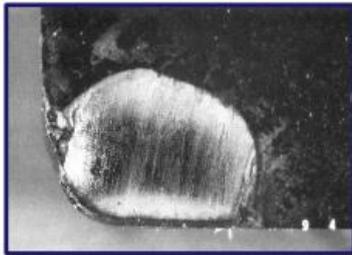
- Abrasione: dovuta a particelle di elevata durezza
- Diffusione: quando le elevate temperature generate dagli sforzi di taglio spingono gli atomi a migrare dal materiale all'utensile e viceversa
- Ossidazione: formazione di ossidi sul tagliente, che solitamente sono più fragili e quindi si staccano dal tagliente
- Adesione: ovvero il fenomeno che causa la formazione del tagliente di riporto, che staccandosi dal tagliente, ne porta via anche un pezzo usurando la placca stessa
- Deformazione plastica, dovuta alle sollecitazioni termo-meccaniche
- Fatica: dovuta a cicli meccanici e termici

Le principali forme di usura visibili sull'utensile sono:

Usura sul fianco, che genera il labbro di usura ed è l'usura che si riflette maggiormente sulla qualità della lavorazione, infatti questa influenza sensibilmente sia la precisione dimensionale che la finitura superficiale. La misuriamo con due grandezze, una che indica il massimo picco delle creste formate dall'usura, VB_{max} e l'altra che ne indica il valore medio VB_{medio}



Usura sul petto, che genera il cratere di usura e che influenza l'indebolimento dell'utensile stesso. Le grandezze caratteristiche del cratere sono la sua profondità (KT) e il punto medio del cratere, misurato dallo spigolo originario del tagliente (KM)

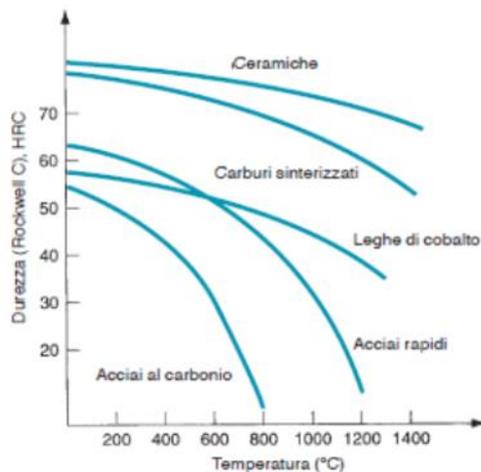


Queste forme di usura possono svilupparsi più o meno rapidamente, infatti l'usura viene influenzata da vari fattori, tra cui:

- Le caratteristiche dell'utensile
- La temperatura nella zona di lavorazione, quindi la velocità di taglio
- I parametri di taglio
- La refrigerazione della zona di lavorazione
- La presenza di cicli termici
- La lubrificazione nella zona di lavorazione
- Le affinità chimiche tra utensile e materiale
- Etc.

Effetto della temperatura sull'usura

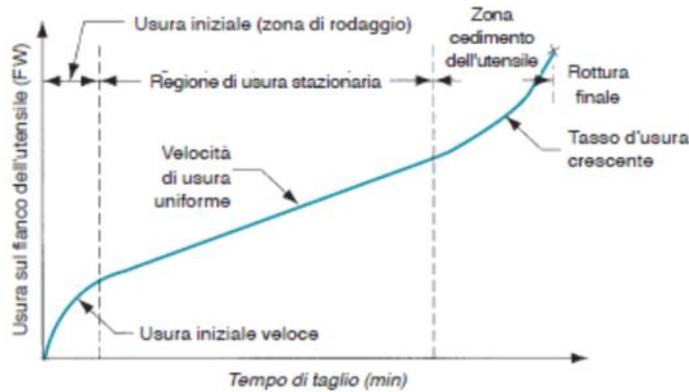
È il fattore che influenza maggiormente l'usura di un utensile, infatti con l'aumento della temperatura dello stesso, i materiali hanno sempre un calo della loro durezza meccanica.



Usura dell'utensile in funzione del tempo di taglio

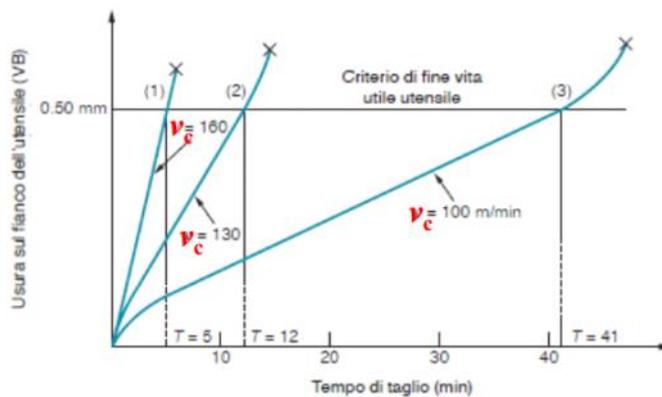
All'aumentare del tempo di taglio possiamo riconoscere 3 zone di usura sul fianco dell'utensile, nella prima zona abbiamo l'usura iniziale, corrispondente alla zona di rodaggio dell'utensile, molto pendente e avviene perché il tagliente si smussa. Nella seconda regione temporale, vediamo che la velocità di usura dell'utensile diventa costante, sempre crescente ma come retta, quindi diciamo che questa regione è di usura stazionaria. La terza zona è quella di cedimento dell'utensile, in cui la velocità di usura torna ad aumentare con un tasso crescente fino ad arrivare al punto di rottura dell'utensile stesso.

Al fine pratico, vogliamo impedire che l'utensile entri nella terza regione, che rovinerebbe la finitura superficiale del pezzo o danneggerebbe sia il pezzo stesso che la testa porta utensili a causa della rottura dell'utensile.



Effetto della velocità di taglio sull'usura

Si può notare facilmente che, fissato il criterio di fine usura dell'utensile basato sull'usura del fianco dell'utensile (VB), velocità di taglio più elevate aumentano la pendenza della curva che ci rappresenta temporalmente l'andamento dell'usura. Tuttavia dobbiamo sempre tenere conto che a basse velocità di taglio, si verrebbe a creare il tagliente di riporto, quindi la relazione lineare rappresentata nel grafico non sarebbe più valida.



Relazione di vita dell'utensile, Relazione di Taylor

Mediante questa relazione esponenziale, possiamo correlare il prodotto tra la velocità di taglio, la durata dell'utensile elevata ad un esponente che dipende dai materiali sia dell'utensile che del pezzo con una costante che dipende dalle condizioni di lavorazione.

$$v_c \cdot T^n = C$$

$$v_c T^n = C \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} \log v_c + n \log T &= \log C \\ n \log T &= -\log v_c + \log C \\ \log T &= (-\log v_c + \log C) / n \end{aligned}$$

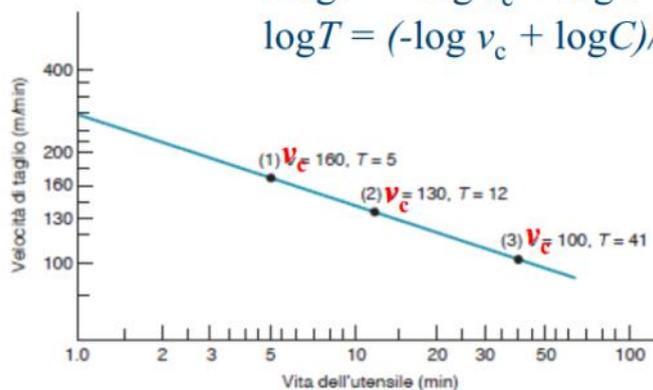


Grafico della velocità di taglio in relazione alla vita dell'utensile in coordinate logaritmiche (naturale)

La relazione di Taylor può essere riscritta anche nella versione generalizzata, semplificata, in cui consideriamo anche l'avanzamento durante il taglio

$$v_c T^n f^m = K^*$$

Oppure nella sua forma generalizzata, in cui entrano in gioco anche la profondità di passata e la durezza (HB)

$$v_c T^n f^m a_p^p HB^q = K$$

Questa relazione è utile per indicare le dipendenze tra le variabili, tuttavia risulta imprecisa per un calcolo accurato sulla vita dell'utensile.

Inoltre notiamo che i coefficienti m e p, determinati sperimentalmente, hanno sempre un valore minore di uno, sottolineando l'importanza della velocità di taglio sulla durata.

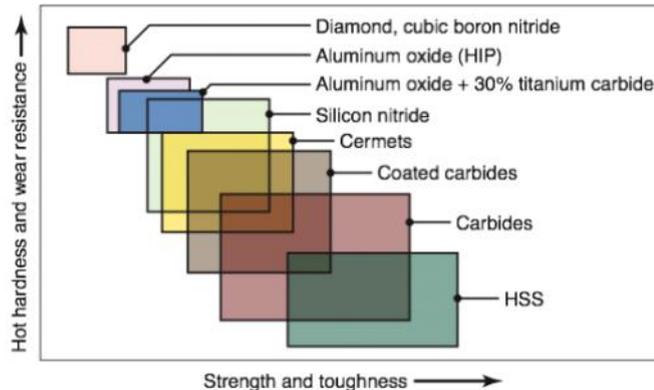
3.7 - Materiali per utensili

Nella progettazione di un utensile, bisogna valutare le sue principali caratteristiche tecnologiche affinché siano sufficienti allo scopo, in particolare noi vogliamo valutare:

- La durezza a freddo
- La durezza a caldo
- La tenacità
- La resistenza all'usura
- La conducibilità termica
- Il coefficiente di attrito
- Il costo

Durezza e tenacità

I materiali più in basso nel grafico, gli acciai ad alta resistenza, sono quelli più costosi.



Materiali per utensili, velocità di taglio e usura

- **Acciai rapidi (High Speed Steel, HSS)**
 - **Leghe fuse (stelliti)**
 - leghe di cobalto (50%), cromo (30%) e tungsteno (20%)
 - **Carburi metallici sinterizzati**
 - WC, eventualmente rivestiti
 - **Ceramici**
 - Al_2O_3
 - **Cermet (ceramic metal)**
 - **CBN: nitruro cubico di boro**
 - **Diamante: naturale, artificiale**
- + v_c
(a parità di usura)

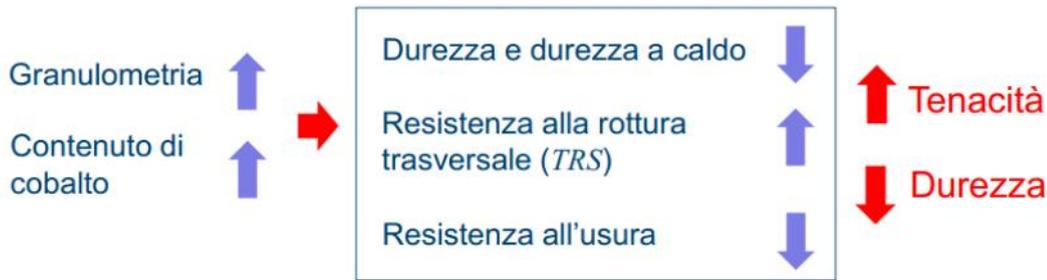
Acciai rapidi, High Speed Steel

Sono particolarmente indicati per la realizzazione di geometrie complesse, quali le frese, i barili e le brocche, inoltre possono essere rivestiti in carburo di titanio, spesso le punte a forare, per aumentarne le prestazioni ulteriormente.

Carburi metallici sinterizzati

Sono caratterizzati da un'alta resistenza alla compressione e un'elevata durezza, sebbene sia inferiore di quella dell'acciaio rapido. Mantengono anche a caldo una buona durezza e sono caratterizzati da un'elevata conducibilità termica e un'elevato coefficiente elastico. Il contro di questo materiale è la resistenza alla trazione che va da bassa a moderata.

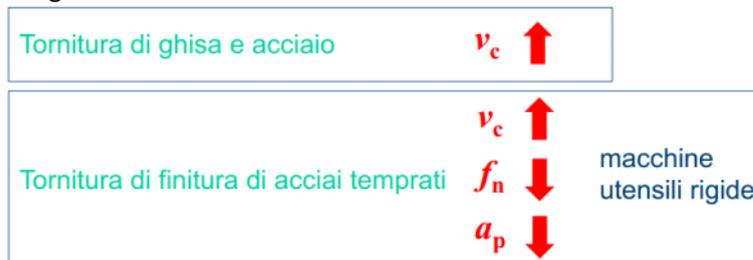
Poiché questi materiali sono sinterizzati, abbiamo che i carburi metallici che li uniscono hanno una loro granulometria. Inoltre tipicamente contengono cobalto. Questi due fattori sono di nostro interesse perché la combinazione giusta di contenuto di cobalto e dimensione dei grani ci può dare le giuste proprietà meccaniche:



I vantaggi di questo materiale per utensili sono l'elevata durezza e la buona tenacità. Inoltre possiamo anche decidere di applicare un rivestimento per aumentare la durezza, soprattutto sul petto dell'utensile, dove si formerebbe il cratere di usura, per evitare che il pezzo si rompa, infatti la tenacità viene data dal substrato.

Materiali ceramici

Adatti soprattutto a lavorazioni di tornitura, infatti la loro scarsa tenacità li rende poco utili nelle operazioni di taglio interrotto



Cermet

Sebbene i carburi sinterizzati siano tecnicamente dei compositi cermet, il termine cermet di solito si usa solo per le combinazioni di TiC, TiN e carbonitruro di titanio (TiCN), con nichel e/o molibdeno come leganti

CBN

Il nitrato di boro cubico è il materiale più duro, secondo solo al diamante. Tipicamente utilizzato come materiale di rivestimento per i carburi sinterizzati è indicato per la lavorazione di leghe ferrose e contenenti nichel, infatti non reagisce chimicamente con gli acciai e le leghe a base di nichel.

Diamanti sintetici, SPD (sintered polycrystalline diamond)

Viene fabbricato sinterizzando piccoli cristalli di diamante a temperature e pressioni elevate nella forma desiderata, senza o quasi l'aggiunta di altri leganti. I cristalli compressi hanno quindi un orientamento casuale, che ne migliora la resistenza rispetto ai diamanti a cristallo singolo.

Tipicamente uno strato sottile di SPD viene depositato sulla superficie di un carburo sinterizzato, tuttavia se l'utensile da produrre è sufficientemente piccolo, possiamo farlo interamente in SPD.

3.8 - Ottimizzazione delle condizioni di taglio

Lo scopo di ottimizzare un processo è quello di massimizzare variabili quali il profitto o la qualità, e al tempo stesso minimizzare i costi e i tempi del processo stesso.

Nella nostra analisi abbiamo:

- Il sistema, composto a sua volta da:
 - o Variabili decisionali X , ovvero quelle variabili del processo che vogliamo ottimizzare.
 - o Costanti, che influenzano il comportamento della variabile e che non possono essere modificate durante l'ottimizzazione (pressione di taglio, coefficiente di usura...)
 - o Relazioni, che legano le nostre variabili decisionali con le altre e con le varie costanti (relazione di Taylor, calcolo della forza di taglio...)
 - o Dei vincoli, imposti dalle richieste del cliente, dagli strumenti a disposizione, dalla progettazione del processo e da altri fattori.

L'ottimizzazione di questo sistema viene fatta per vie analitiche, numeriche o empiriche, a seconda dell'onere computazionale che le stesse procedure richiedono e lo scopo è trovare il valore ottimale X_0 di una funzione obbiettivo.

Le funzioni obbiettivo che analizzeremo saranno il tempo di produzione, il costo di produzione e il profitto derivante dalla produzione stessa, e le analizzeremo in funzione della sola velocità di taglio (una variabile decisionale), supponendo le altre come delle costanti e non imponendo vincoli di alcun tipo alla nostra analisi.

Tempo di produzione

$$\text{A) TEMPO DI PRODUZIONE} \quad t_p = t_0 + \frac{V}{Q} + \frac{V}{Q \cdot T} t_{cu} = t_0 + \frac{V}{Q} \left(1 + \frac{t_{cu}}{T} \right)$$

$$Q = A_D \cdot v_c = a_p \cdot f \cdot v_c \cdot 1000 \quad \text{se } v_c \text{ espressa in [m / min]}$$

t_0 : tempi fissi (indipendenti dai parametri di processo) [min]

T : durata dell'utensile [min]

t_{cu} : tempo cambio utensile [min]

V : volume di materiale da asportare [mm³]

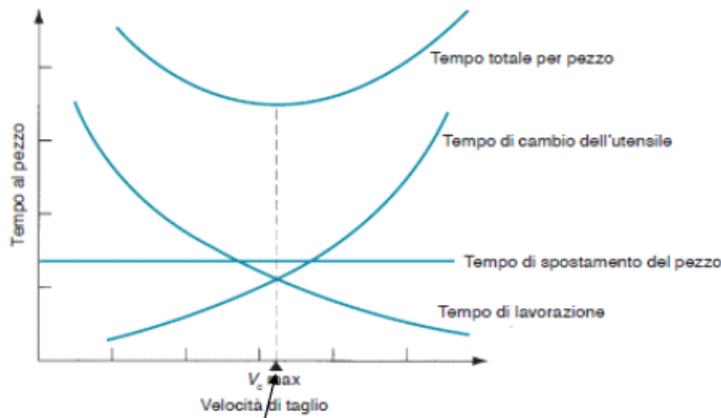
$Q = MRR$: tasso di asportazione del materiale [mm³ / min]

Il tempo di produzione rappresenta il tempo necessario per completare la produzione di un singolo pezzo. È influenzato dai tempi di setup della macchina, che sono fissi e quindi li indicheremo con la costante t_0 , il tempo di lavorazione, espresso come il rapporto del volume di materiale da rimuovere e del MRR e infine il tempo medio che serve per cambiare l'utensile, che è influenzato dall'usura stessa dell'utensile. Sia il MRR che l'usura dell'utensile sono funzioni della velocità di taglio, quindi la nostra variabile decisionale influenza direttamente questi fattori.

In particolare:

- $\frac{V}{Q}$, fissato il volume di sovrametallo da rimuovere, diminuisce con l'aumentare della velocità di taglio, infatti il MRR è linearmente dipendente dalla velocità, ma trovandosi al denominatore riduce la grandezza del rapporto
- T invece diminuisce con legge esponenziale, quindi per nel rapporto $\frac{V}{QT}$ decresce più rapidamente del material removal rate e porta il rapporto a crescere. Rapporto che in particolare ci indica quante volte dovremmo sostituire il nostro utensile durante la lavorazione.

Come vediamo quindi, i singoli termini rappresentati su un grafico ci assicurano l'esistenza di un minimo funzionale, che coinciderà con la velocità di taglio ottimale per ridurre i tempi di lavorazione.



Costo di produzione

Anche il costo di produzione è somma di tre contributi, uno fisso, legato all'attivazione della macchina stessa, un costo orario della macchina, in cui sono raccolti tutti i costi dovuti all'impiego della macchina e del tecnico che la deve seguire e infine l'ultimo costo legato ai taglienti che la macchina deve impiegare. Il primo costo non può essere ottimizzato, infatti è una costante ed è specifico della macchina a disposizione dell'azienda.

Il costo orario della macchina, viene moltiplicato per il tempo di produzione calcolato sopra, infatti più ci metto a produrre e più il processo mi viene a costare, quindi supponendo che i costi orari della macchina siano già ottimizzati, per ottimizzare ulteriormente questo costo deve essere ottimizzato anche il tempo di produzione. Infine nel costo del tagliente, dobbiamo prendere in considerazione quanti taglienti della singola placca potranno essere utilizzati, dividere quindi il costo della placchetta per il numero di taglienti utilizzabili nel nostro processo e moltiplicarlo per il termine che ci indica quante volte dovremo girare il tagliente.

$$C_p = C_0 + C_m \cdot t_p + C_{ut} \frac{V}{Q \cdot T} = C_0 + C_m \cdot \left[t_0 + \frac{V}{Q} \left(1 + \frac{t_{cu}}{T} \right) \right] + C_{ut} \frac{V}{Q \cdot T}$$

$$C_p = C_0' + C_m \frac{V}{Q} \left[1 + \left(t_{cu} + \frac{C_{ut}}{C_m} \right) \frac{1}{T} \right]$$

C_0 : costi fissi [€]

C_m : costo orario macchina utensile [€/min]

C_{ut} : costo medio del tagliente [€/tagliente]

Il passaggio intermedio delle relazioni scritte sopra è il seguente:

$$c_p = (C_0 + C_m t_0) + \frac{C_m V}{Q} + \frac{C_m V}{Q} t_{cu} \frac{1}{T} + \frac{c_m v C_{ut}}{Q c_m T} \frac{1}{T}$$

Cui vogliamo isolare quelli che sono le costanti e isolare un rapporto fisso che è: $C_m \frac{V}{Q}$

Tasso di profitto

C) TASSO DI PROFITTO P_r
$$P_r = \frac{R - C_p}{t_p}$$

$R =$ Ricavo

$$t_p = t_0 + \frac{V}{Q} \left(1 + \frac{t_{cu}}{T} \right)$$

$$C_p = C'_0 + C_m \frac{V}{Q} \left[1 + \left(t_{cu} + \frac{C_{ut}}{C_m} \right) \frac{1}{T} \right]$$

Supponendo di conoscere il ricavo che possiamo avere dal pezzo e che esso sia costante, il tasso di profitto lo calcoliamo sottraendo al ricavo totale il costo di produzione del pezzo, per vedere quale sia l'utile prodotto e dividendolo per il tempo di produzione, per sapere appunto a quanto ammonti il profitto rispetto al tempo che impiego per produrre.

I vincoli di ottimizzazione

Anche se nella nostra trattazione non considereremo l'imposizione di dei vincoli, spesso questi vengono naturalmente imposti dalle condizioni di lavoro che abbiamo, infatti abbiamo la macchina che è vincolata dalla massima potenza che viene a generare, l'utensile che influenza i parametri del processo con le sue proprietà meccaniche e i vincoli sulle tolleranze dimensionali e sulla finitura che ci richiede il progettista.

Spesso imponendo dei vincoli alle nostre funzioni, abbiamo che il minimo funzionale viene escluso proprio dall'imposizione dei vincoli, quindi dobbiamo scegliere, anzi che il minimo funzionale, prendiamo come valore di lavoro il vincolo stesso.

Potenza massima
$$\frac{F_c \cdot v_c}{E} \leq K_1$$

Deformazione massima pezzo
$$I_{pezzo}(F_c, \text{geometria, materiale}) \leq \varepsilon_p$$

Deformazione massima utensile
$$I_{utensile}(F_t, \text{geometria, materiale}) \leq \varepsilon_{ut}$$

Avanzamento e velocità
$$f_{\min} \leq f \leq f_{MAX}$$

$$v_{c\min} \leq v_c \leq v_{cMAX}$$

Rugosità
$$K \frac{f^2}{r} \leq R_a$$

Le relazioni utili al calcolo dei vincoli sono:

• Relazioni di vita utensile
$$v_c \cdot T^n = C$$

• Relazioni per il calcolo delle forze
$$F_c = k_c A_D$$

Ottimizzazione non vincolata a un parametro

Tempo e costo di produzione

NOTABENE PER ESAME!!!! SOLO DISEGNO DEI GRAFICI

Vogliamo dimostrare per via analitica l'esistenza di un minimo di queste due funzioni. Per farlo prima vogliamo ricondurre le stesse a una funzione che sia analiticamente uguale, in cui poi dovremmo sostituire adeguatamente dei parametri per ricondurci alla funzione di nostro interesse.

Le nostre funzioni obiettivo quindi sono:

$$t_p = t_0 + \frac{V}{Q} \left(1 + \frac{t_{cu}}{T} \right) \rightarrow \begin{cases} t_p = F \\ t_0 = F_0 \\ V = \alpha \\ t_{cu} = \varphi \end{cases} \rightarrow F = F_0 + \frac{\alpha}{Q} \left(1 + \frac{\varphi}{T} \right)$$

$$C_p = C'_0 + \frac{C_m V}{Q} \left[1 + \left(t_{cu} + \frac{C_{ut}}{C_m} \right) \frac{1}{T} \right] \rightarrow \begin{cases} C_p = F \\ C'_0 = F_0 \\ C_m V = \alpha \\ t_{cu} + \frac{C_{ut}}{C_m} = \varphi \end{cases} \rightarrow F = F_0 + \frac{\alpha}{Q} \left(1 + \frac{\varphi}{T} \right)$$

Quindi abbiamo costruito due funzioni F identiche, sostituendo i parametri che nella funzione tempo e in quella costo hanno lo stesso carattere.

Visto che abbiamo detto che la nostra variabile decisionale è la velocità di taglio, vogliamo esplicitarla all'interno della nostra funzione obiettivo:

$$\begin{cases} T = T(v_c) \\ Q = A_D v_c \end{cases} \rightarrow F = F_0 + \frac{\alpha'}{v_c} \left(1 + \frac{\varphi}{T(v_c)} \right) \text{ con } \alpha' = \frac{\alpha}{A_D}$$

Dove $T(v_c)$ è la relazione di Taylor per l'usura.

Calcoliamo quindi la derivata e cerchiamo il minimo imponendo che la stessa sia uguale a zero:

$$\frac{dF}{dv_c} = 0$$

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

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

$$1 + \frac{\varphi}{T} + \frac{\varphi}{T} \left(\frac{v_c}{T} \frac{dT}{dv_c} \right) = 0$$

↓

$$\frac{d(\ln T)}{d(\ln v_c)}$$

$$1 + \frac{\varphi}{T} \left(1 + \frac{d(\ln T)}{d(\ln v_c)} \right) = 0$$

Poiché la relazione di Taylor è essa stessa una funzione, andrà derivata anch'essa.

Quindi usando la relazione di Taylor

Relazione di Taylor $T^n = \frac{C}{v_c}$ $n \ln T = \ln C - \ln v_c$ $\ln T = \frac{1}{n} \ln C - \frac{1}{n} \ln v_c$

$$\frac{d \ln T}{d \ln v_c} = -\frac{1}{n} \quad 1 + \frac{\varphi}{T} \left(1 - \frac{1}{n} \right) = 0$$

$$T_{opt} = \varphi \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{n}} \right) \quad v_{c, opt} = \frac{C}{T_{opt}^n}$$

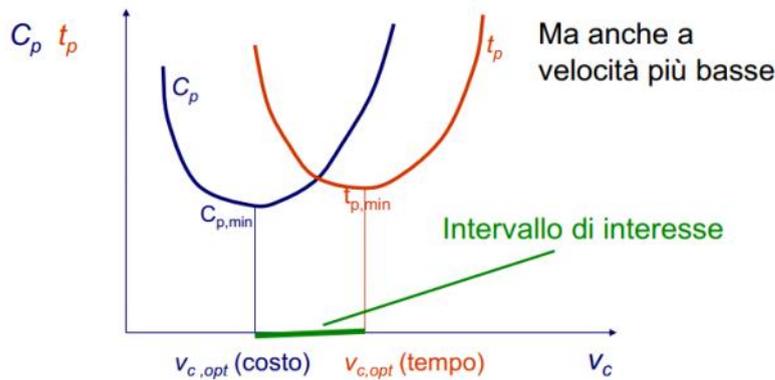
$n \ln T = \ln C - \ln v_c$
 $\ln T = \frac{1}{n} \ln C - \frac{1}{n} \ln v_c$

Relazione di Taylor $T^n = \frac{C}{v_c^n}$

$$\frac{d \ln T}{d \ln v_c} = -\frac{1}{n} \quad 1 + \frac{\varphi}{T} \left(1 - \frac{1}{n} \right) = 0$$

$$T_{opt} = \varphi \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \quad v_{c,opt} = \frac{C}{T_{opt}^n}$$

Gabbiamo quindi dimostrato che esiste un valore di ottimo delle nostre variabili, tuttavia si nota subito che i due valori non coincidono, ovvero la velocità ottimale per ridurre i costi è minore rispetto alla velocità ottimale per ridurre i tempi, quindi si parla di una zona a massima efficienza.

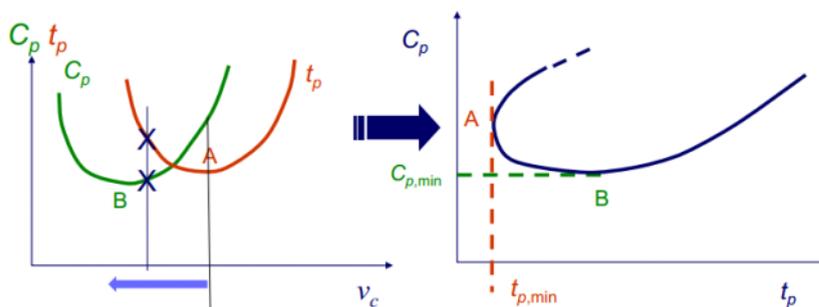


Tasso di profitto

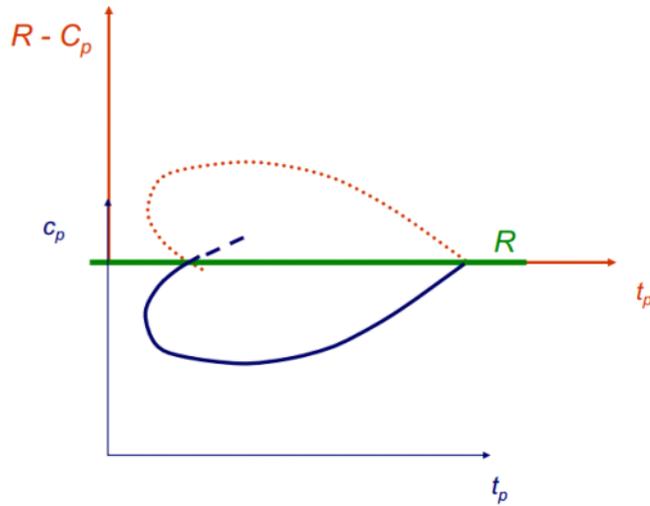
Vogliamo dimostrare graficamente che esiste un dominio per cui il tasso di profitto è massimizzato.

In primo luogo vogliamo creare l'andamento del grafico, quindi prendendo le funzioni punto per punto del tempo di produzione e del costo, andiamo a ricreare la curva che rappresenta l'andamento dei profitti:

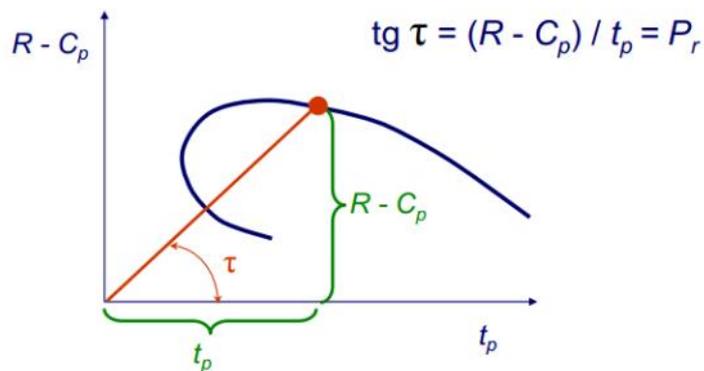
Il primo passo è quello di esprimere il costo di produzione in funzione del tempo di produzione:



Successivamente, poiché supponiamo che il ricavo sia costante, andiamo a calcolare graficamente la curva $R - C_p$

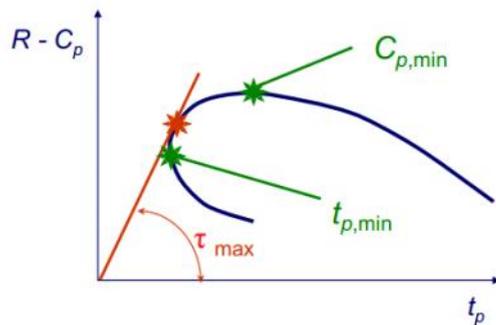


Infine, sapendo che il rapporto di due variabili dà come risultato la tangente, possiamo mettere in evidenza che:



Quindi il problema della massimizzazione dei profitti, diventa analiticamente la massimizzazione della tangente alla curva, che come si può notare è contenuta nell'intervallo compresa tra i costi di produzione ottimali e i tempi di produzione ottimali, come ci si poteva attendere dal fatto che esista la regione a massima efficienza.

Il profitto massimo è il punto di massima efficacia tra quelli di massima efficienza.



FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

3.9 - Rettifica

La rettifica è un'operazione di finitura che viene realizzata attraverso un utensile multitagliente dalla geometria non definita, detto mola.

È bene notare che il fatto che questo sia un processo di finitura non implichi che debba essere compiuto in una sola passata, nel processo potremmo comunque avere una passata di rettifica di sgrossatura e una seconda passata di finitura.

Le principali caratteristiche dei processi di rettifica sono:

- La vasta gamma di materiali lavorabili;
- Le tolleranze dimensionali molto strette;
- La finitura superficiale molto spinta.

Ad esempio infatti abbiamo tolleranze dimensionali del centesimo di millimetro e rugosità dell'ordine di $0,5\mu m$

La mola

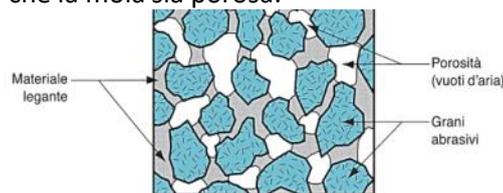
La mola è costituita da grani di materiali abrasivo tenuti insieme da un legante. Il grano abrasivo ha il compito di asportare il truciolo, quindi sono gli spigoli del grano stesso a costituire il tagliente, mentre il legante ha il compito di tenere insieme i grani abrasivi ed è il costituente della mola che conferisce all'utensile le necessarie caratteristiche di resistenza e di rigidità, inoltre consente il distacco dei grani usurati. Il legante infatti deve rompersi mano a mano che i grani si usurano, così facendo può portare in superficie dei grani vergini.

La mola viene caratterizzata da:

- Il tipo di abrasivo;
- La grana dell'abrasivo;
- Il tipo di legante;
- La durezza;
- La porosità.

L'ultima caratteristica sottolinea come tra il legante e i pori si formino dei vuoti d'aria, che possono costituire dal 20% al 30% del volume totale della mola.

Si evidenzia il fatto che la mola sia porosa:



$$V_{TOT} = V_{ABRASIVO} + V_{LEGANTE} + V_{POROSITA'}$$

(30-40%) (30-40%) (20-30%)

Condizioni di taglio in rettifica

Nella mola ogni grano si comporta come se fosse un tagliente, quindi abbiamo che su una mola ci sono molteplici taglienti con orientazione casuale e angoli di spoglia casuali. Gli angoli di spoglia in rettifica è importante notare che sono sempre negativi.

Una particolarità delle mole è che sono utensili auto-affilanti, infatti i grani usurandosi, non solo si smussano, ma spesso a causa delle elevate velocità di taglio si fratturano o si staccano completamente dalla mola, lasciando il posto a nuovi spigoli vivi o a grani vergini, che non hanno ancora mai asportato dei trucioli.

Tipologia di abrasivi

I grani di materiale abrasivo si distinguono a seconda della tipologia di materiale che li rende più indicati per determinati tipi di materiali.

- Ossido di alluminio, materiale abrasivo più comune, utilizzato per la rettifica degli acciai e di leghe di ferro ad alta resistenza.
- Carburo di silicio, più duro del precedente ma non altrettanto tenace. Indicato per la rettifica di metalli duttili quali alluminio, ottone, acciaio inossidabile e materiali fragili come le ghise e i materiali ceramici. Non può essere utilizzato per la rettifica degli acciai per l'affinità chimica tra il carbonio e il ferro.
- Nitrato di boro cubico, indicato sulle leghe aerospaziali e sui materiali duri come gli acciai per utensili trattati termicamente.

- Diamanti, indicati su materiali duri e abrasivi come quelli ceramici, i carburi cementati e il vetro.

Tipologia di leganti

Sistema di codifica

Le mole sono contraddistinte da un codice alfanumerico di sette elementi, in cui il primo è opzionale e rappresenta il simbolo del produttore dell'abrasivo.

Tradizionali:

30	A	46	H	6	V	XX
						<p>Simbolo del produttore della mola (opzionale).</p> <p>Tipo di legante: B = in resinoide, BF = in resina rinforzata, E = in gommalacca, R = in gomma, RF = in gomma rinforzata, S = silicato, V = vetrificato.</p> <p>Struttura: La scala varia da 1 a 15: 1 = struttura molto chiusa, 15 = struttura molto aperta.</p> <p>Grado: La scala va da A a Z: A = molto morbida, M = media M, Z = dura.</p> <p>Dimensione dei grani: Grossa = grani da 8 a 24, Media = grani da 30 a 60, Fine = grani da 70 a 180, Molto fine = grani da 220 a 600.</p> <p>Tipo di abrasivo: A = ossido di alluminio, C = carburo di silicio.</p> <p>Prefisso: Simbolo del costruttore per l'abrasivo (opzionale).</p>

CBN e diamantate:

30	A	46	H	6	V	XX
						<p>Profondità abrasiva = profondità della regione abrasiva in mm, come mostrato in Figura 16.2 (c).</p> <p>Modifica di legante = notazione del costruttore sul tipo di legante speciale o sua modifica.</p> <p>Tipo di legante: B = resinoide, M = metallo, V = vetrificato.</p> <p>Concentrazione: Notazione del costruttore. Può essere un numero o un simbolo.</p> <p>Grado: La scala va da A a Z: A = morbida, M = media M, Z = dura.</p> <p>Dimensione dei grani: Grossa = grani da 8 a 24, Media = grani da 30 a 60, Fine = grani da 70 a 180, Molto fine = grani da 220 a 600.</p> <p>Tipo di abrasivo: D = diamante, B = nitruro di boro cubico.</p> <p>Prefisso: Simbolo del costruttore per l'abrasivo (opzionale).</p>

Indicazioni tecnologiche

Variando le proprietà della mola, possiamo notare la variazione delle proprietà meccaniche dell'utensile.:

- La grana dell'abrasivo: all'aumento della dimensione del grano di abrasivo si nota un aumento di duttilità dello stesso, di contro abbiamo una perdita in termini di finitura superficiale.
- Legante: se si passa da un legante vetrificato a uno elastico, vediamo un miglioramento nella resistenza agli urti e della finitura superficiale, inoltre possiamo usare velocità di taglio più elevate.
- Durezza dell'impasto, resistenza: all'aumentare della durezza dell'impasto abbiamo una riduzione della durezza del materiale lavorato, una riduzione della superficie di contatto, ma possiamo avere una velocità relativa pezzo/mola molto elevata.
- Struttura della mola, porosità: all'aumento della porosità della mola, possiamo permetterci di lavorare materiali più duttili, con maggiori superfici di contatto e con un buon grado di finitura superficiale.

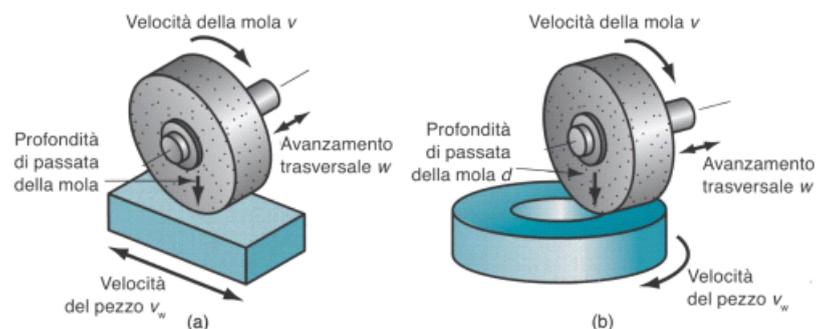
In generale, per scegliere una buona mola:

Problema applicativo e obiettivo	Linee guida e raccomandazioni
Rettifica di acciaio e ghise	Usare l'ossido di alluminio come abrasivo
Rettifica di metalli non ferrosi	Usare il carburo di silicio come abrasivo
Rettifica di acciaio per utensili induriti e alcune leghe aerospaziali	Usare il nitruro di boro cubico come abrasivo
Rettifica di materiali duri abrasivi come ceramiche, carburi cementati e vetro	Usare il diamante come abrasivo
Rettifica di materiali morbidi	Usare dei grani di dimensione più grossa e un grado della mola più duro
Rettifica di materiali duri	Usare dei grani di dimensione più piccola e un grado della mola più morbido
Ottimizzazione della finitura superficiale	Usare dei grani di dimensione più piccola e una struttura della mola più chiusa, delle velocità della mola (v) maggiori e delle velocità del pezzo (v_w) minori
Massimizzazione della velocità di rimozione del materiale	Usare dei grani di dimensione più grossa, una struttura della mola più aperta e un legante vetrificato
Minimizzazione delle problematiche legate alle alte temperature, delle cricche e della deformazione della superficie del pezzo	Mantenere la mola affilata e ravvivarla frequentemente, utilizzare delle profondità di taglio (d) più piccole, delle velocità della mola (v) più basse e delle velocità dei pezzi (v_w) più alte
Se la mola si impasta e si brucia	Usare una mola con un grado più morbido e una struttura più aperta
Se la mola si frattura troppo rapidamente	Usare una mola con un grado più duro e una struttura più chiusa

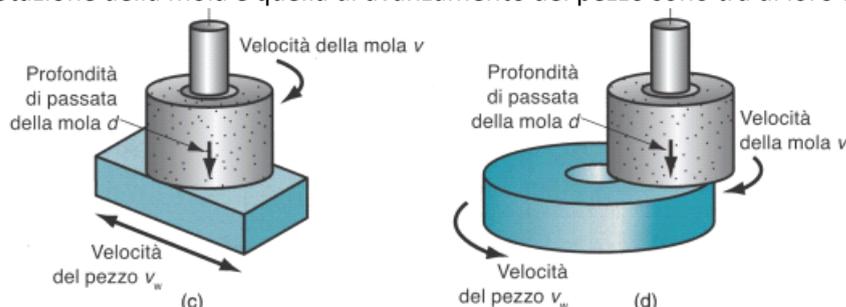
Lavorazioni: rettifica di piani

Come per la fresatura possiamo avere un'operazione di rettifica sia in tangenziale (simile alla fresatura periferica) che frontale.

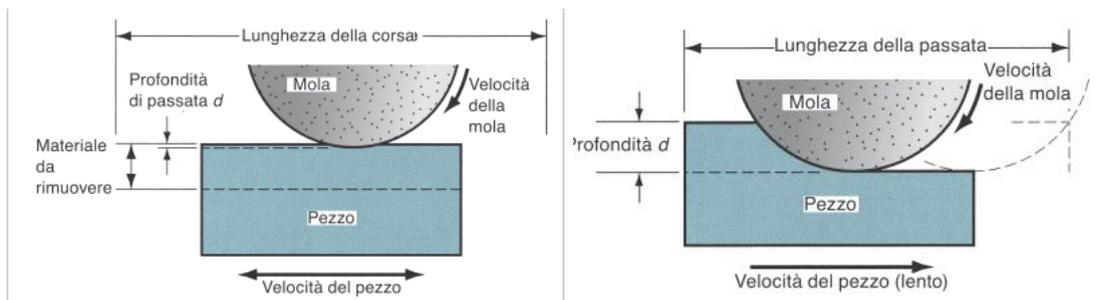
Nella rettifica tangenziale abbiamo che il pezzo viene messo in moto relativo piano rispetto alla mola, quindi mentre la mola ruota sul suo asse e può muoversi lungo lo stesso per regolare la posizione dell'utensile, il pezzo si muove in una direzione ortogonale all'asse di rotazione. Quindi la velocità di rotazione e quella di avanzamento del pezzo hanno la stessa direzione.



Nel caso di rettifica frontale abbiamo che l'asse di rotazione è entrante nel pezzo stesso, quindi la velocità di rotazione della mola e quella di avanzamento del pezzo sono tra di loro ortogonali.

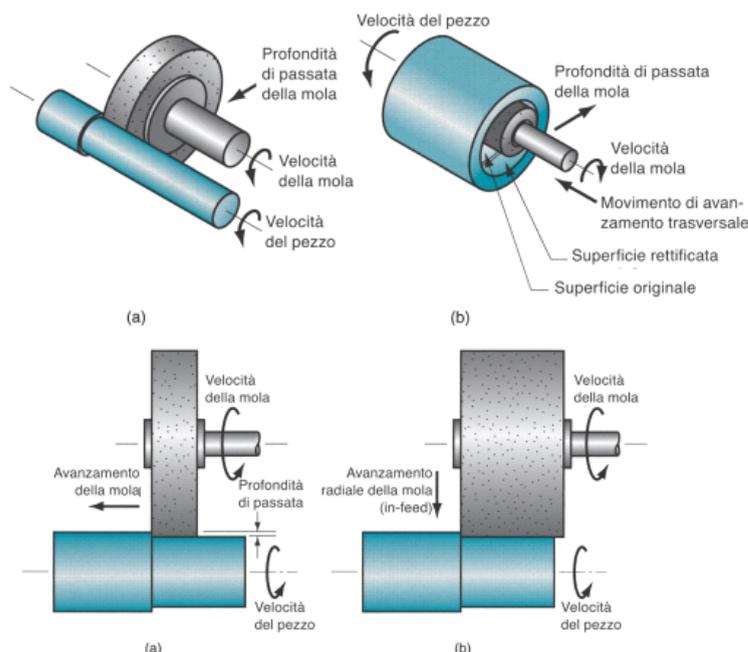


La profondità di passata e la velocità di avanzamento sono tipicamente inversamente proporzionali, infatti nella rettifica tradizionale abbiamo alte velocità di avanzamento del pezzo e piccole profondità di passata, quindi il materiale viene rimosso poco per volta; tuttavia si può utilizzare la strategia di avanzamento lento o profondo, in cui il sovrmetalto asportato è maggiore ma la velocità di avanzamento deve essere minore.

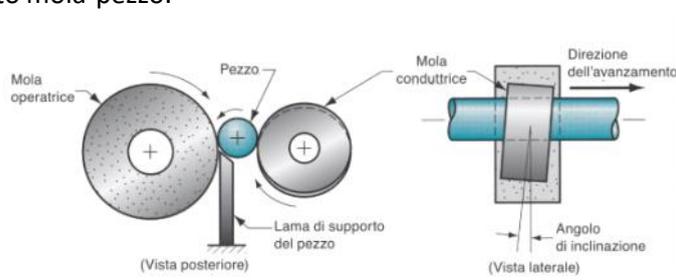


Lavorazioni: rettificazione cilindrica esterna e interna

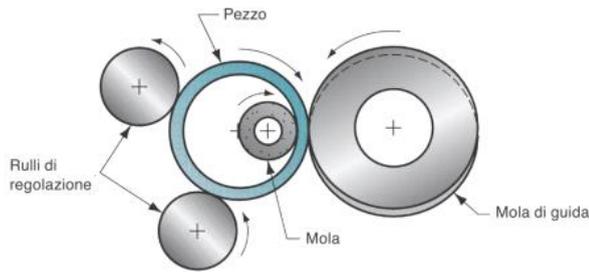
Lavorazione eseguita su pezzi a geometria cilindrica per ottenere una migliore finitura superficiale, possono essere eseguite sia sull'esterno del pezzo, in cui il pezzo e la mola hanno lo stesso verso di rotazione imposto da due mandrini. Nella rettificazione interna invece la mola viene fatta entrare nel pezzo e il pezzo e la mola sono controrotanti.



Queste operazioni possono essere eseguite anche senza centri, ovvero il pezzo non viene messo in rotazione da un mandrino ma dall'attrito tra il pezzo e la mola. Usato per pezzi di dimensioni considerevoli, si possono utilizzare due tipi di macchine diverse. Una che sfrutta una mola operatrice (quella che esegue la vera e propria operazione di rettificazione) una lama di supporto, per evitare che il pezzo cada e una seconda mola detta conduttrice, inclinata rispetto alla mola operatrice per far sì che l'attrito tra questa e il pezzo spinga anche avanti il pezzo spesso, creando il moto relativo di avanzamento mola-pezzo.



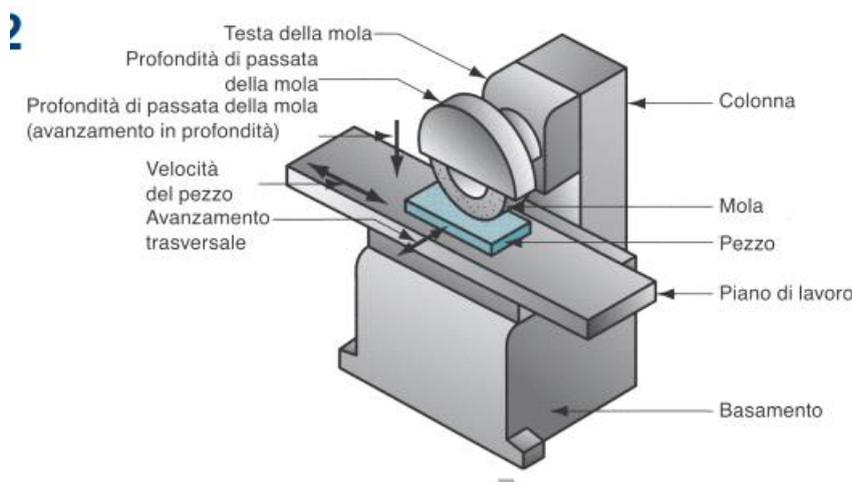
Per la rettificazione di fori invece, la mola operatrice si trova all'interno del pezzo, che si trova a muoversi tra una mola di guida esterna (anch'essa inclinata come sopra) e due rulli di regolazione, che tengono il pezzo in posizione.



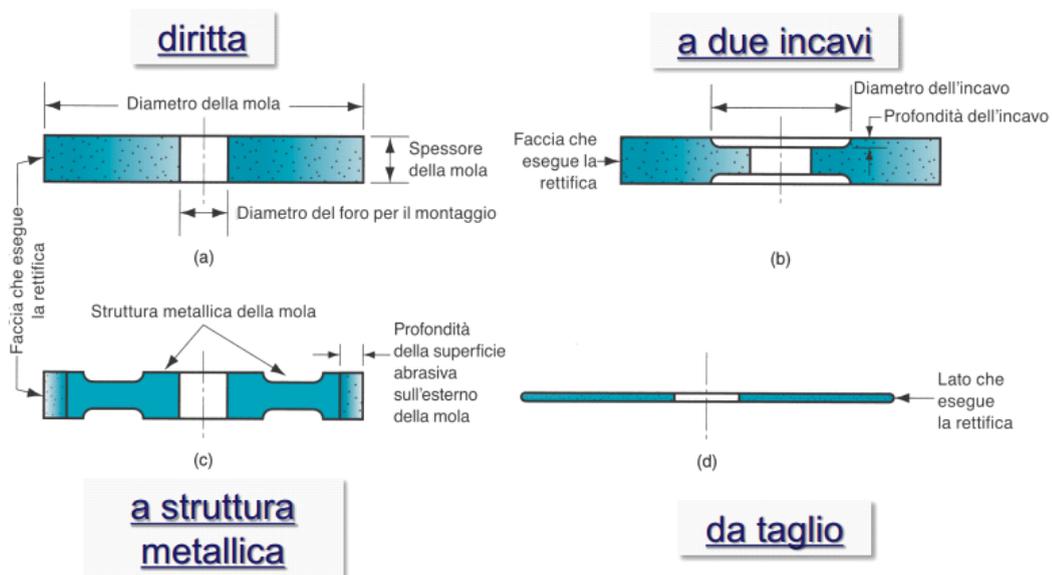
Lavorazioni: rettifica con mole profilate

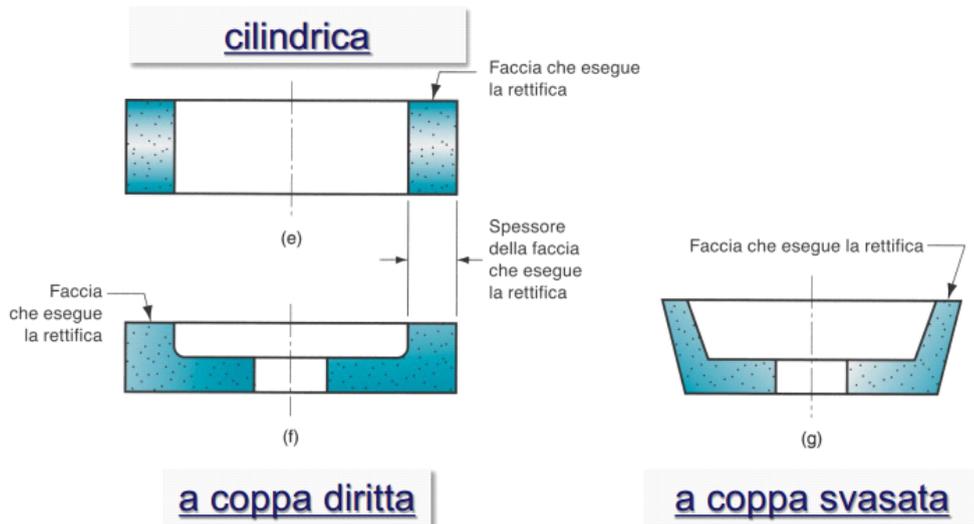
Infine anche nel caso della rettifica è possibile impiegare delle mole profilate, ovvero degli utensili di forma. Queste hanno, come per tutti gli utensili di forma, un costo maggiore, poiché non hanno profili standard e richiedono lavorazioni successive da parte del produttore. Infatti la mola di forma viene profilata sfruttando delle lame diamantate con un processo di tornitura, ottenendo così la geometri desiderata. Mole profilate servono per la rettifica di perni, gole di scarico e di spallamenti.

La rettificatrice



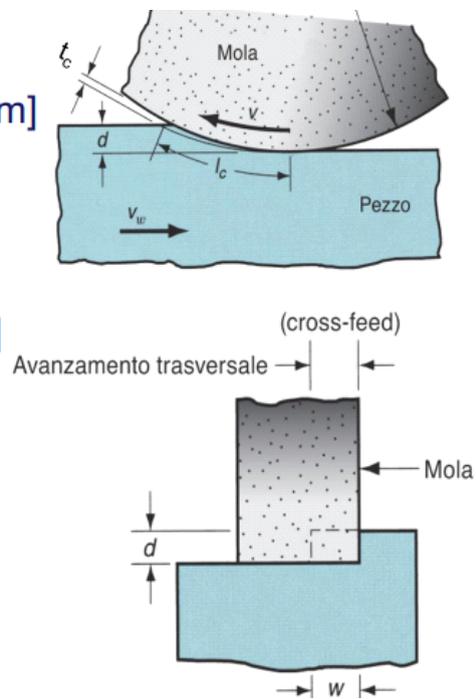
Geometria delle mole per rettifica esterna





Parametri di lavoro

- D = diametro della mola [mm]
- d = profondità di passata/taglio [mm]
- v_w = velocità del pezzo [mm/min]
- v = velocità della mola [m/min]
- n = numero di giri mandrino [rpm]
- w = avanzamento trasversale [mm]



w' = larghezza del truciolo [mm]

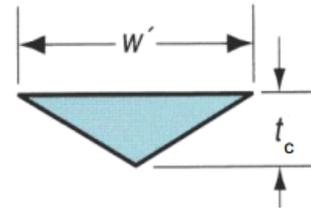
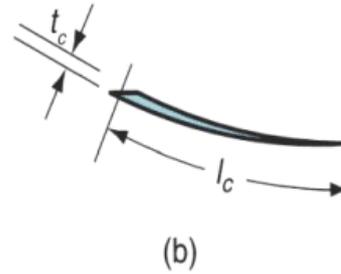
t_c = spessore del truciolo [mm]

r_g = rapporto di forma del truciolo

$$r_g = \frac{w'}{t_c}$$

l_c = lunghezza arco di contatto e lunghezza media del truciolo [mm]

$$l_c = \sqrt{Dd}$$



velocità periferica della mola:

$$v = \pi \cdot D \cdot n$$

- tipo di operazione;
- materiale in lavorazione.
- velocità angolare massima indicata sulla mola dal costruttore.

tasso di rimozione del materiale:

- da massimizzare produttività

$$R_{MR} = v_w w d$$

n_c = numero di trucioli generati nell'unità di tempo (grani/min)

$$n_c = 1000 \cdot v \cdot w \cdot C_g$$

C_g = numero di grani per unità di superficie sulla mola [grani/mm²]

N = numero di grani mola in presa totali

$$N = C_g \cdot l_c \cdot w$$

- F'_c = forza di taglio singolo grano [N/grano]

$$F'_c = K_1 \left(\frac{r_g v_w}{v C_g} \right)^{0.5} \left(\frac{d}{D} \right)^{0.25}$$

- F_c = forza di taglio totale [N]

$$F_c = N \cdot F'_c$$

- U_v = energia specifica [J/mm³]

$$U_v = \frac{F_c v}{v_w w d}$$

L'energia specifica come vediamo anche in questo caso ha una forma simile a quella delle altre operazioni di asportazione di truciolo, in cui vengono messe in relazione la forza di taglio, la velocità con la velocità di avanzamento del pezzo, il suo avanzamento effettivo e la profondità di passata.

NOTABENE PER ESAME!!!!

$$U_v = \frac{F_c v}{v_w w d}$$

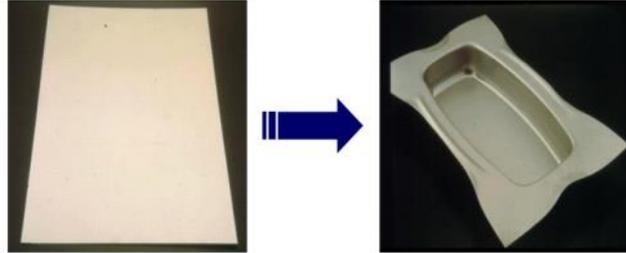
FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

4.1 - Deformazione plastica

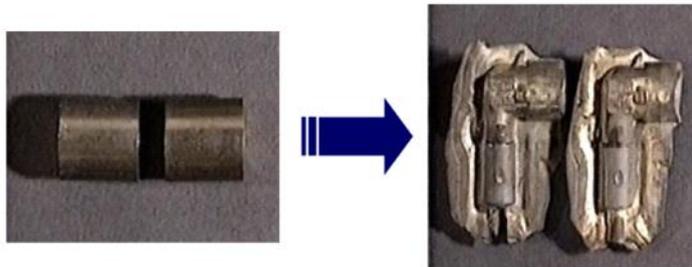
Si creano semilavorati applicando forze al materiale per forzarlo all'interno di uno stampo. È importante sottolineare come in questo tipo di processi il volume del materiale rimane costante, quindi sono processi in cui non viene aggiunto del materiale né viene rimosso.

Si possono distinguere in due classi, deformazione plastica per lavorazione massiva e di lavorazione delle lamiere.

Un esempio di lavorazione di lamiera:



Quelle di lavorazioni massive, sono ad esempio le lavorazioni di forgiatura in cui il grezzo non ha una dimensione trascurabile rispetto alle altre.



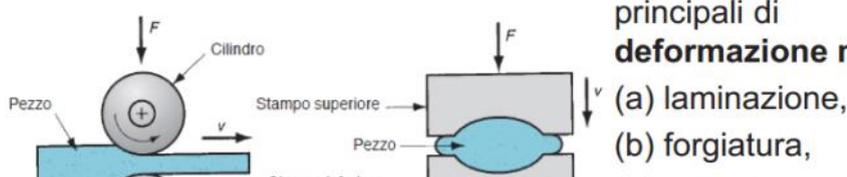
La distinzione nelle classi si rende necessario perché abbiamo uno stato di sforzo medio diverso. Le lamiere vengono deformate quindi con uno sforzo medio di trazione, la risultante degli stati di sforzo è positiva; mentre nelle lavorazioni massive, la risultante dello stato di sforzo è negativa, quindi la deformazione avviene principalmente per compressione.

In ogni caso lo stato di sforzo e la geometria del pezzo cambia istante per istante, quindi sono trasformazioni dinamiche.

Deformazione massiva

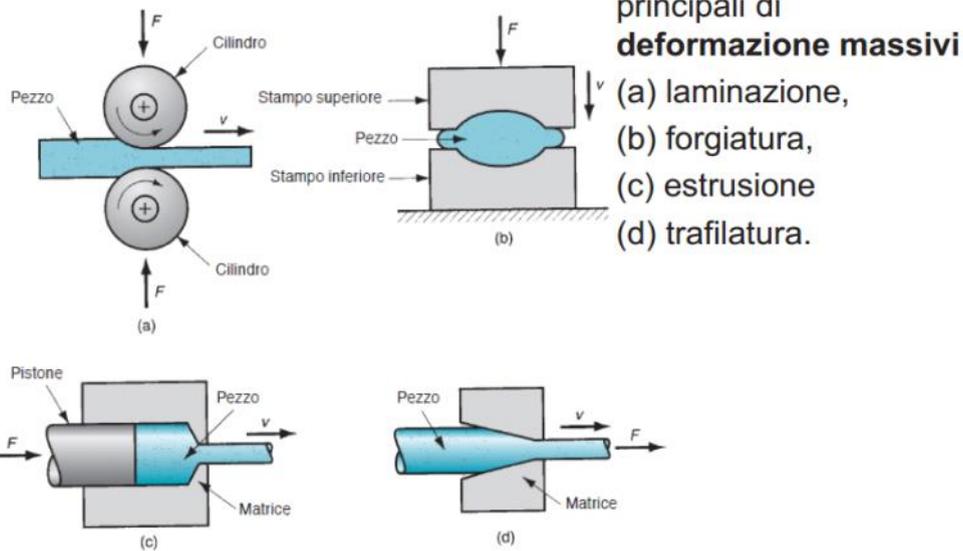
I principali processi di deformazione massiva sono 4:

- Laminazione piana: prendiamo un laminato molto spesso di cui vogliamo ridurre lo spessore. Questo processo è utilizzato su semilavorati che hanno uno spessore considerevole e vogliamo ottenere delle lamiere, quindi utilizziamo un laminatoio, ovvero una macchina con due cilindri controrotanti che per attrito trascinano nella gabbia di lavorazione il laminato grezzo, per assottigliarlo. Alla fine del processo, poiché il volume si conserva, il prodotto dopo la lavorazione sarà più sottile e più lungo.
- La seconda tipologia di trasformazioni è la forgiatura (o stampaggio o fucinatura). Anche in questo caso abbiamo due utensili, che hanno un moto relativo traslatorio. Uno dei due stampi è fisso, l'altro (solitamente quello superiore) è mobile e il materiale posto tra i due stampi verrà schiacciato e sarà costretto a prendere la forma dello stampo. Abbiamo del materiale che fuoriesce dal piano di giunzione degli stampi e forma la bava, come per i processi di fonderia.
- Estrusione, può essere fatta con varie forme, in questo caso vediamo un esempio di estrusione cilindrica, in cui la matrice ha forma circolare. In questo processo un pistone trasla orizzontalmente verso l'oro della matrice, comprimendo il materiale e costringendolo nella luce di passaggio.
- La trafilatura infine, è simile all'estrusione, infatti serve sempre a ridurre lo spessore di un cilindro, ma in trafilatura abbiamo che il materiale in uscita, la trafilatura, viene posto in trazione.



principali di
deformazione massivi

(a) laminazione,
(b) forgiatura,

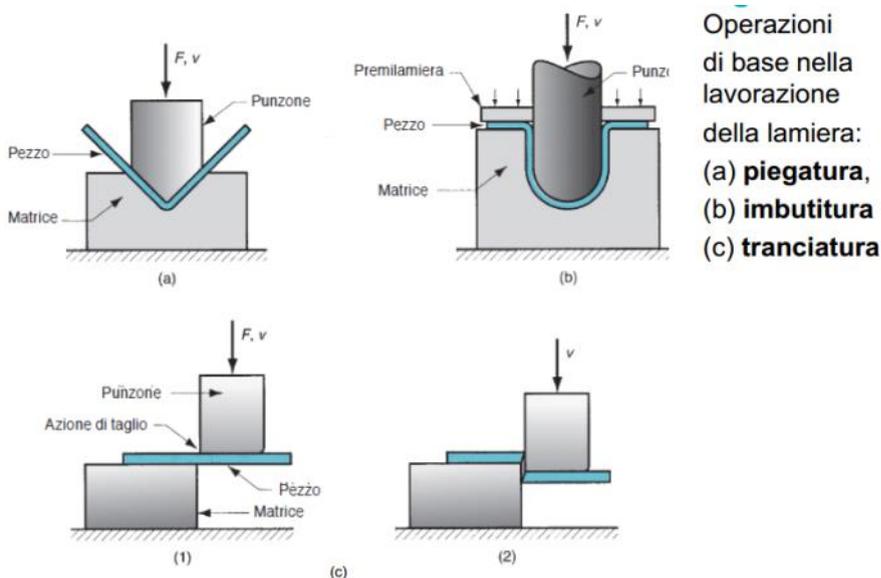


Abbiamo distinzioni non solo per gli stati di sforzo ma anche per le temperature a cui vengono eseguite. Tipicamente ad esempio l'estrusione viene eseguita a caldo, per ridurre le forze necessarie per estrudere e deformare il materiale, mentre in trafilatura l'operazione viene eseguita a temperatura ambiente. In trafilatura abbiamo che il materiale infatti incrudisce, quindi viene usata per produrre fili e cavi.

Lavorazione della lamiera

Sono 3 i processi più tipici:

- Piegatura
- Imbutitura
- Tranciatura



Questi processi sono accumulati dalla matrice, che è uno stampo fisso e uno mobile che è il punzone. Le presse sono tutte presse verticali. Non è insolito trovare però combinazioni diverse, punzone sotto alla matrice, matrice mobile e punzone fisso...

Tensione e deformazione reali, campo elastico, meccanica della deformazione plastica, sforzo di flusso medio, effetto della temperatura, velocità di deformazione, lavoro di deformazione plastica, attrito

~vedere 1.2-prova di trazione~

4.2 - Processi di deformazione plastica massiva

Nei processi industriali di deformazione massiva, i componenti realizzati hanno un rapporto limitato tra superficie e volume.

I principali processi industriali sono:

- Forgiatura
- Laminazione
- Estrusione
- Trafilatura

I processi inoltre si caratterizzano a seconda della temperatura di lavoro T espressa in gradi Kelvin, rapportata con la temperatura di fusione, ci dice se un processo si definisce:

- A freddo: $T \leq 0.3T_f$
- A tiepido $0.3T_f < T < 0.5T_f$
- A caldo $0.5T_f \leq T \leq 0.75T_f$

Inoltre possiamo classificare le lavorazioni come:

- Primarie, quando permettono di ottenere dei semilavorati sbozzati in varie forme;
- Secondarie, che permettono di ottenere un prodotto finito o semifinito a partire dai pezzi prodotti dalle lavorazioni primarie.

Forgiatura o fucinatura

Processo di deformazione plastica che avviene chiudendo il pezzo tra due stampi, piani o chiusi, che può avvenire a freddo, nel caso di elevata duttilità del materiale, garantendo una maggiore precisione dimensionale. Infatti nella forgiatura a caldo il ritiro del materiale lavorato causa imprecisioni sia nella finitura che nelle tolleranze dimensionali del pezzo.

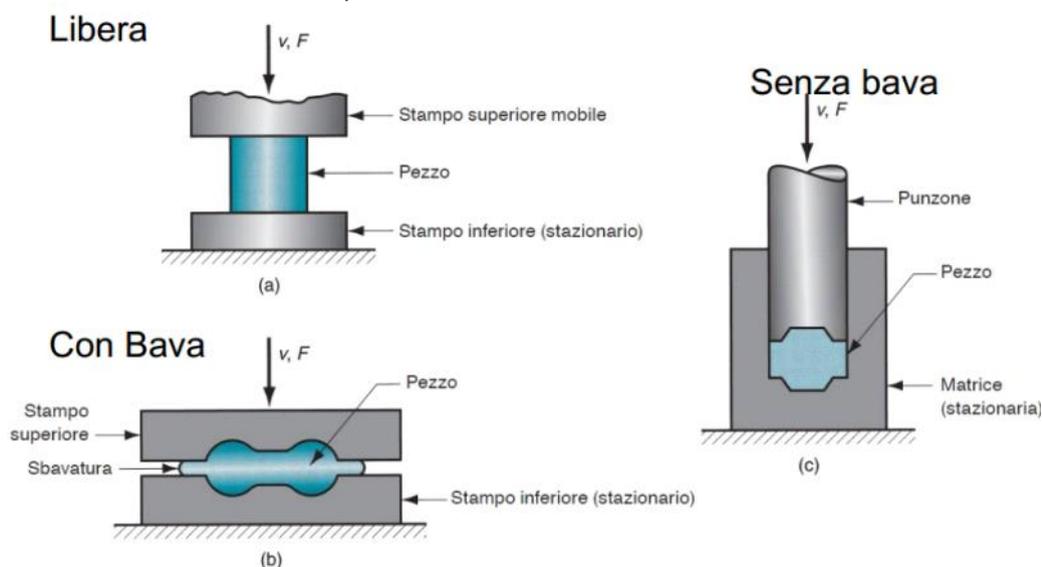
La compressione può essere realizzata a impatto utilizzando dei magli; in questo caso abbiamo un effetto di attrito ridotto, tuttavia non è sempre realizzabile, ad esempio se il materiale da lavorare è fragile.

Nel caso di compressione quasi-statica, si utilizzano presse, idrauliche o meccaniche, in cui nelle prime possiamo controllare con maggior precisione la pressione di contatto, mentre nelle seconde possiamo controllare più precisamente l'avanzamento relativo degli stampi in termini di distanza tra i due.

Quindi a seconda che il processo avviene con stampi piani e aperti o piani e chiusi, il flusso di metallo può essere libero o completamente vincolato dalla geometria degli stampi.

Quando lo stampaggio è chiuso, quindi la geometria è vincolata completamente dagli stampi, possiamo avere la forgiatura caratterizzata dalla presenza di bava, mentre per pezzi più piccoli, possiamo ottenere forgiatura senza bava, ovvero una forgiatura near net shape.

Forgiatura a freddo e senza bava spesso si cerca di attuarle insieme.

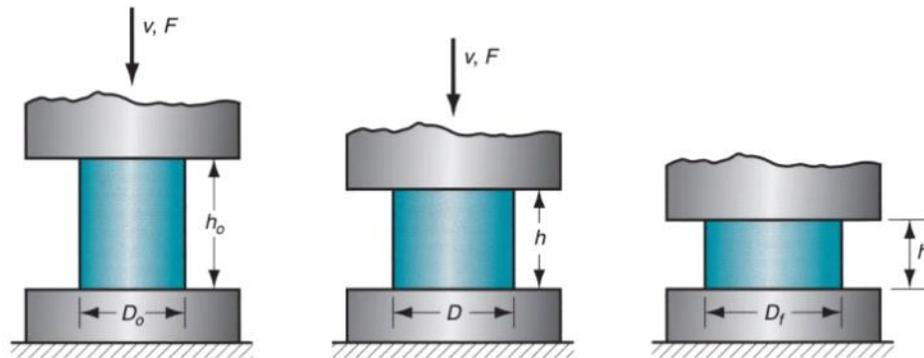


Forgiatura in stampi aperti. La forza

Mettiamoci in un caso ideale, quindi in cui non ci sia attrito e di voler deformare un provino cilindrico di altezza iniziale h_0 , diametro D_0 , pressa che si muove con velocità v_0 e forza F , fino ad

arrivare ad un'altezza finale h_f , e D_f .

Questa condizione corrisponde a uno stato di sforzo uniaassiale di compressione.



$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h} = 2 \ln \frac{D}{D_0} \quad (1) \quad (2) \quad (3) \quad F = Y_f A = \pi Y_f \frac{D^2}{4}$$

$$k_{p1} = p_z = \frac{F}{A} = Y_f$$

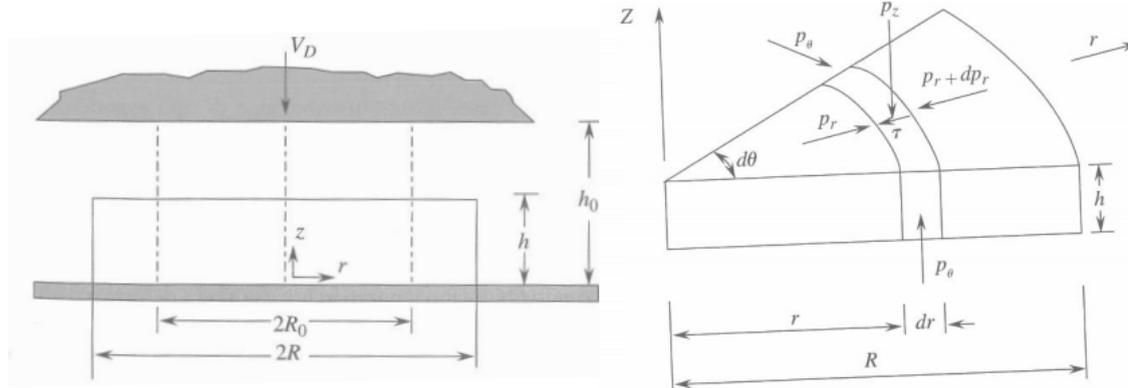
NOTABENE PER ESAME!!!!

Modello approssimato della deformazione con attrito

Tuttavia gli effetti dell'attrito nel caso reale non sono trascurabili, infatti causano delle zone a sforzo più alto e altre a sforzo nullo (zone morte).

Quindi ipotizziamo di prendere un provino di materiale rigido-plastico isotropo, sottoposto a un carico di compressione quasi-statico, con deformazione omogenea (quindi senza distorsione) e in presenza di attrito coulombiano.

Per analizzare questa condizione utilizziamo il metodo del conico.



Come prima cosa si noti che P_θ e P_g non sono in perfetto equilibrio, quindi generano uno sforzo radiale tridimensionale.

Imponiamo ora l'equilibrio in direzione radiale:

$$p_r h r d\theta - (p_r + dp_r) h (r + dr) d\theta + 2 p_\theta h dr \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) - 2 \tau r d\theta dr = 0$$

$$-p_r h dr - h r dp_r + p_\theta h dr - 2 \tau r dr = 0$$

Considerando la simmetria assiale, le direzioni principali sono: r , z e θ , quindi geometricamente possiamo dire che: $d\varepsilon_r = d\varepsilon_\theta$

Applicando l'equazione di Mises otteniamo: $p_r = p_\theta$, quindi sostituendo nell'equazione di equilibrio radiale:

$$h r dp_r + 2 \tau r dr = 0 \rightarrow \frac{dp_r}{dr} + 2 \frac{\tau}{h} = 0$$

La condizione di von Mises assume quindi la forma: $p_r - p_z = \pm Y_f$

Notiamo che le condizioni al contorno del nostro sistema sono che p_r si annulla sul bordo esterno, p_z è positiva e quindi la condizione di von Mises diventa $p_r - p_z = \pm Y_f$ che può essere integrata come:

$$dp_r = dp_z$$

Tenendo poi conto della definizione di attrito secondo coulomb, $\tau = \mu p_z$ otteniamo quindi:

$$\frac{dp_r}{dr} + 2\mu \frac{p_z}{h} = 0$$

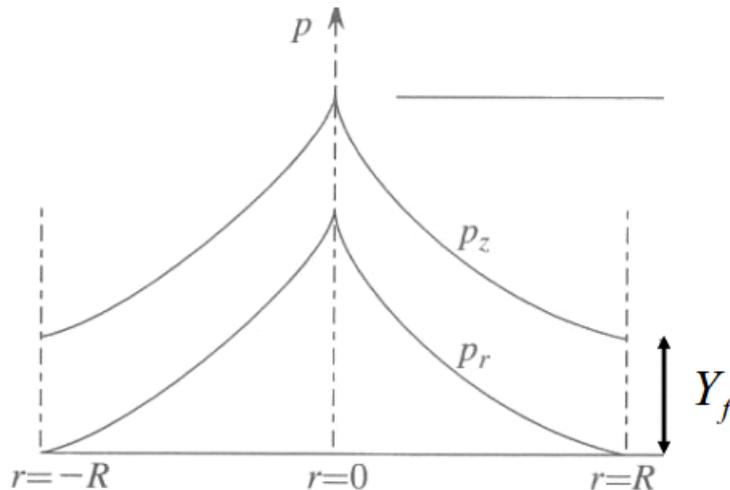
Che può essere integrato:

$$\int_{Y_f}^{p_z} \frac{dp_z}{p_z} = \int_R^r -2\frac{\mu}{h} dr$$

Da cui otteniamo:

$$p_z = Y_f e^{2\frac{\mu}{h}(R-r)}$$

Quindi più R aumenta più scendiamo dalla collina degli attriti perché dobbiamo arrivare a zero.



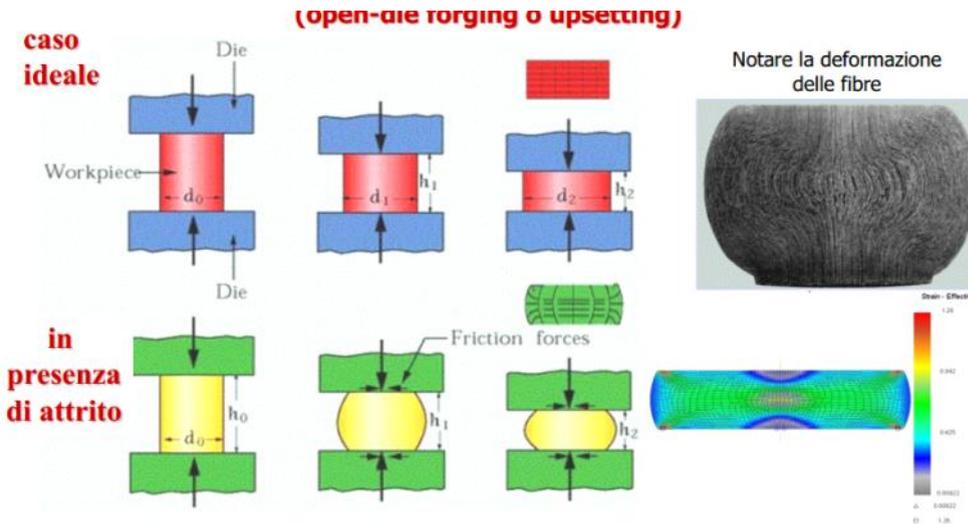
FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

Potremmo quindi integrare sull'area la relazione appena ricavata per ottenere la forza di contatto necessaria per portare il provino a una determinata altezza h e quindi ricavare anche la pressione media da applicare.

$$F = \int_0^{2\pi} \int_0^R p_z dr d\theta = \frac{\pi Y_f}{2\mu^2} h \left[h \left(e^{2\mu \frac{R_0 \sqrt{h_0}}{h \sqrt{h}}} - 1 \right) - 2\mu R_0 \sqrt{\frac{h_0}{h}} \right]$$

$$k_p = \frac{\frac{\pi Y_f}{2\mu^2} h \left[h \left(e^{2\mu \frac{R_0 \sqrt{h_0}}{h \sqrt{h}}} - 1 \right) - 2\mu R_0 \sqrt{\frac{h_0}{h}} \right]}{\pi R^2} = \frac{Y_f h^2}{2\mu^2 R_0^2 h_0} \left[h \left(e^{2\mu \frac{R_0 \sqrt{h_0}}{h \sqrt{h}}} - 1 \right) - 2\mu R_0 \sqrt{\frac{h_0}{h}} \right]$$

In conclusione, in merito allo stampaggio con stampi aperti, abbiamo che il provino per effetto degli attriti si deforma incurvando verso gli esterni i suoi bordi, inoltre abbiamo che, sempre per la presenza di attriti, abbiamo delle zone in cui non abbiamo delle deformazioni. Queste zone vengono dette zone morte.



Nel caso reale, quindi, per tenere conto della distorsione si aumenta la pressione di contatto per un fattore di sicurezza proporzionale al fattore di forma del provino. Quindi supponendo la costanza del volume (vero solo per il caso ideale):

$$A = \pi \frac{D^2}{4}$$

$$D^2 h = D_0^2 h_0$$

$$k_p = 1 + 0.4\mu \frac{D}{h}$$

$$F = k_p Y_f A$$

Forgiatura a impatto: modello di calcolo

In questo processo si utilizzano i magli per comprimere con un'elevata forza istantanea il materiale da lavorare. In questo processo è proprio la forza liberata in modo impulsivo la caratteristica principale, infatti grazie all'impulso con cui viene liberata rende trascurabili la reazione di attrito interna del materiale, inoltre la velocità del processo fa sì che il pezzo scambi poco calore con lo stampo superiore. La velocità del processo ha un altro fattore positivo, infatti il materiale aumenta particolarmente le sue proprietà meccaniche.

Tipicamente gli stampi usati in questo tipo di processo sono stampi aperti, anche se raramente si può decidere di utilizzare stampi chiusi e ancor più raramente si utilizzano stampi chiusi senza bava.

La fisica completamente diversa rispetto a quella usata nella forgiatura quasi-statica impone che non possiamo calcolare gli sforzi come abbiamo visto precedentemente, infatti questi non si distribuiranno in maniera simmetrica. Il pezzo subisce un'onda d'urto che genera stati di sforzo e tensionali che non sono semplicemente approssimabili con il metodo del conico, ma per il loro calcolo bisogna ricorrere a software ai volumi finiti.

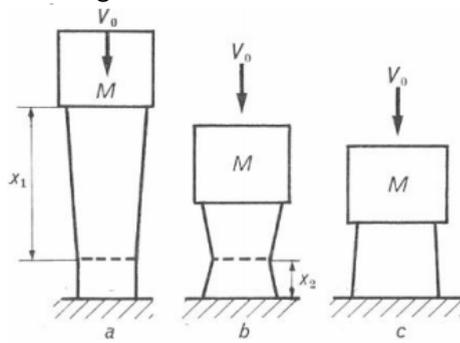
Quindi gli effetti dinamici rendono la meccanica della fucinatura diversa dalla deformazione quasi-statica.

Osservando l'operazione, negli istanti temporali successivi all'inizio dell'impatto, possiamo notare come la deformazione interessi inizialmente solo la porzione di volume superiore del materiale, quella che sta subendo l'impatto.



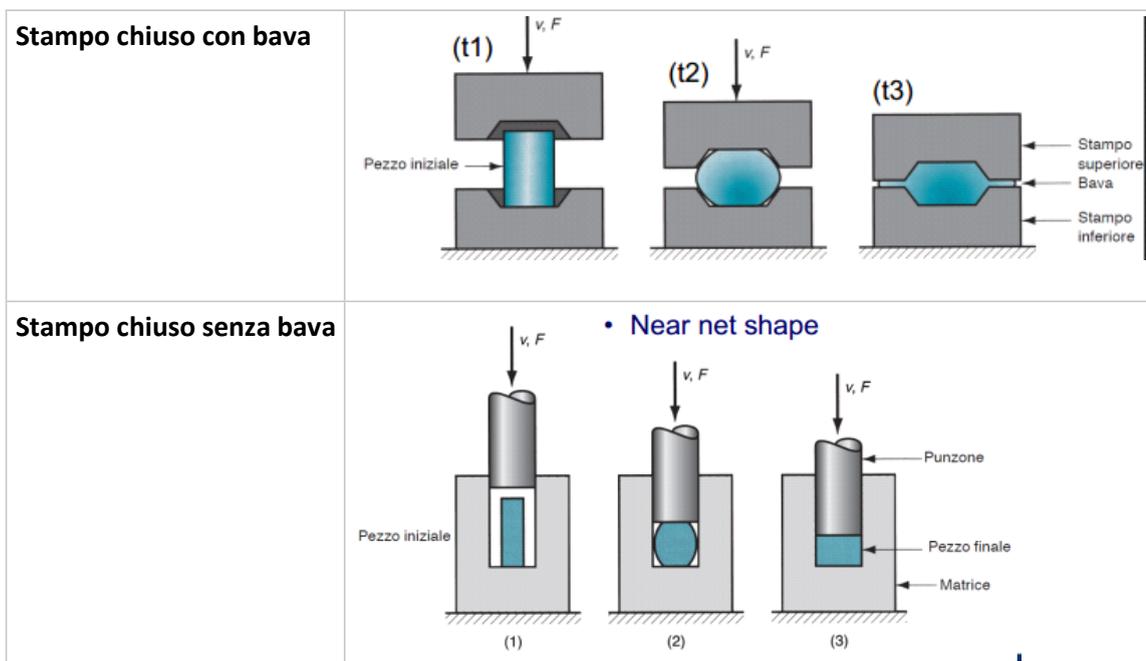
Negli istanti successivi la deformazione si espande al resto del provino, che quindi si deforma, ma

contrariamente al caso di compressione lenta, il provino al posto di deformarsi con una curvatura esterna, si deforma creando una geometria a clessidra.



Sempre per la fisica del processo, abbiamo che spesso si rende necessario eseguire un processo in più battute su coppie di stampi successivi, che creano delle forme intermedie. Questo tipo di processo si rende necessario poiché gli sforzi potrebbero causare tensioni residue di snervamento o essere troppo elevati e portare il materiale oltre al limite di sforzo in rottura, rompendo il pezzo mentre lo si sta forgiando.

Come abbiamo detto la fucinatura può essere anche eseguita in stampi chiusi e senza bava, questo tipo di processo avviene sempre a freddo e su pezzi piccoli, poiché, come detto, nei processi a freddo serve più forza per deformare il materiale, quindi non possiamo deformare un volume di materiale troppo alto per via dei limiti tecnologici. Per ottenere un pezzo preciso e senza bava, in questo tipo di fucinatura dobbiamo inserire la massa esatta di materiale che poi avrà il pezzo lavorato, al fine di riempire perfettamente lo stampo una volta che il punzone arriverà al punto di fine corsa.



Andamento qualitativo delle forze nello stampaggio



Dal grafico possiamo notare come la forza in stampaggio è crescente, inoltre subisce un considerevole aumento di pendenza nel momento in cui inizia formarsi la bava. Questo si spiega fisicamente considerando che all'aumentare della deformazione aumenta anche la superficie di contatto tra il punzone e il pezzo, quindi aumenta anche la forza necessaria a deformare il pezzo stesso. Inoltre l'aumento di pendenza già al formarsi della bava e anche al riempimento completo della forma, ci fa capire come la forza della pressa e la resistenza dello stampo debbano essere commisurate anche a questi fattori.

Calcoli approssimati

$$F_{\max} = k_p Y_f A \quad k_p = \begin{cases} \text{con bava con forma} \begin{cases} \text{semplice} \rightarrow 6 \\ \text{media} \rightarrow 8 \\ \text{complessa} \rightarrow 10 \end{cases} \\ \text{senza bava} \begin{cases} \text{Coniatura} \rightarrow 6 \\ \text{Forma complessa} \rightarrow 8 \end{cases} \end{cases}$$

$$E = c \lambda F_{\max} \quad \text{con } \lambda = 0.15 - 0.25 \text{ e } c = \text{corsa della pressa}$$

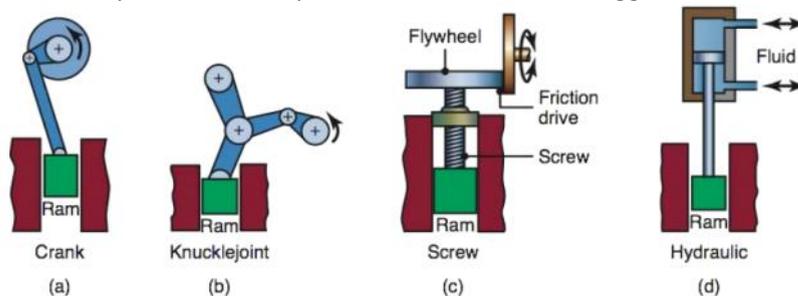
La complessità di una forma è generata dalle pareti sottili presenti sul pezzo da forgiare.

Macchine per la forgiatura

Le macchine per la forgiatura si distinguono per la velocità con cui gli stampi si chiudono, e le suddividiamo in presse e magli.

Le presse a loro volta le distinguiamo in:

- Presse idrauliche, dove il movimento della slitta è imposto attraverso un attuatore oleodinamico, sono le più lente e permettono di controllare con maggior precisione la pressione di contatto
- Presse meccaniche, il movimento della slitta è imposto con un meccanismo biella-manovella, con velocità intermedia, permettono di imporre con precisione il punto di fine corsa della pressa
- Presse a vite, il movimento della slitta è ottenuto con il cinematismo vite-madrevite, sono le più veloci tra le presse e sono quelle che si avvicinano maggiormente ai magli



- | | |
|-----------------------------------|--|
| a) Pressa meccanica ad eccentrico | • Macchine ad energia delimitata |
| b) Pressa meccanica a ginocchiera | • Magli, Presse a vite |
| c) Pressa meccanica a vite | • Macchine a corsa delimitata |
| d) Pressa idraulica | • Presse meccaniche a eccentrico o a ginocchiera |
| | • Macchine meccaniche a forza delimitata |
| | • Presse oleodinamiche |

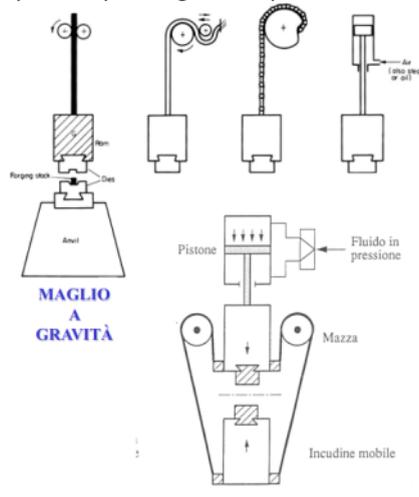
I magli a loro volta si distinguono per la velocità con cui operano e quindi per il meccanismo che li aziona:

- Magli a effetto semplice, quindi il maglio viene fatto cadere sul pezzo da forgiare per il solo effetto della gravità
- Magli a doppio effetto, quindi oltre all'attrazione gravitazionale il maglio viene spinto da un sistema oleodinamico pressurizzato
- Magli a contraccolpo, dove l'incudine è collegata al maglio tramite un sistema di carrucole, quando questo inizia a cadere l'incudine con il pezzo da forgiare posto sopra viene tirato verso il maglio stesso, avendo come effetto benefico il fatto che la deformazione inizia contemporaneamente da ambo i lati del pezzo, rendendo la deformazione a clessidra più

simmetrica e migliorando la distribuzione delle forze all'interno del pezzo. Il grosso svantaggio del sistema a contraccolpo è il costo degli stampi, infatti questo sistema fa subire sia all'incudine che al maglio un forte impatto, quindi gli stampi devono essere più resistenti.

Tipologie di 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

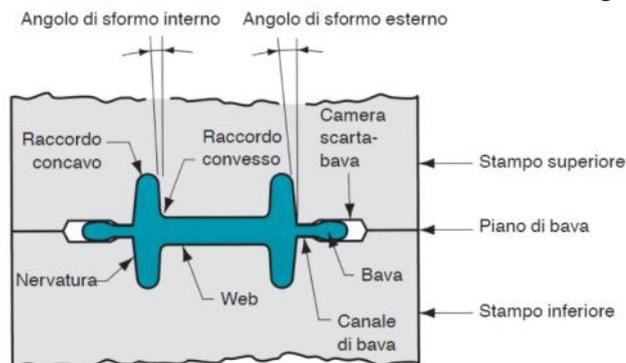


Stampi per la forgiatura

Come per la fonderia, anche nei processi di forgiatura il tecnologo deve rivedere il progetto del pezzo. In questo caso però il progetto andrà adeguato per creare uno stampo con un processo di fresatura e non un modello attorno al quale creare la forma.

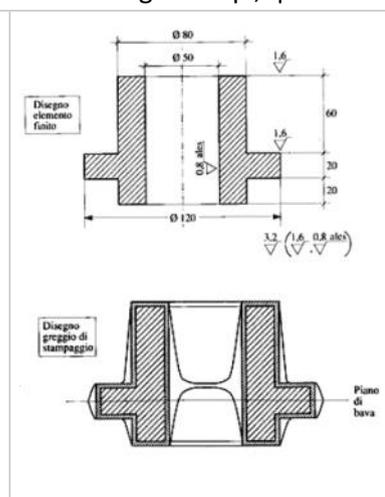
Per passare dal progetto del pezzo al progetto dello stampo, dobbiamo raccordare gli spigoli vivi o aumentare i raggi di raccordo per ridurre e meglio distribuire gli sforzi e le tensioni, vanno inseriti gli angoli di sforno per poter estrarre il pezzo senza rovinarlo e senza erodere lo stampo, vanno considerati i ritiri del metallo, infatti il processo di forgiatura scalda il materiale, quindi andrà comunque considerato un coefficiente di ritiro (che sarà minore di quello in fonderia). Inoltre bisogna anche rifare le quote del modello per inserire i sovrametalli necessari.

Inoltre nel progetto degli stampi va anche aggiunto il canale di bava e la camera scarta-bava, infatti come abbiamo visto la formazione della bava influenza le forze in forgiatura.



Quindi dobbiamo modificare il progetto per decidere la forma finale degli stampi, quindi:

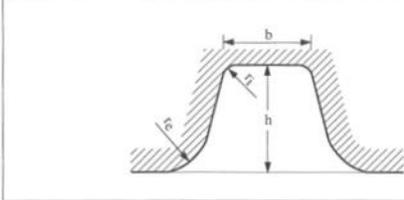
- Dobbiamo considerare il sovrametallo da aggiungere per compensare il ritiro
- Posizionare gli angoli di raccordo
- Collocare il piano di bava
- Dimensionare il canale di bava
- Dimensionare stampo e camera scappa bava



Come vediamo in forgiatura spesso non fanno fori passanti, ma si punta ad assottigliare il più possibile il metallo che poi andrà rimosso per creare il foro.

Se non è possibile aggiungere degli angoli di sformo, perché ad esempio stiamo facendo un processo che è near net shape, dobbiamo prevedere la presenza di estrattori nello stampo stesso.

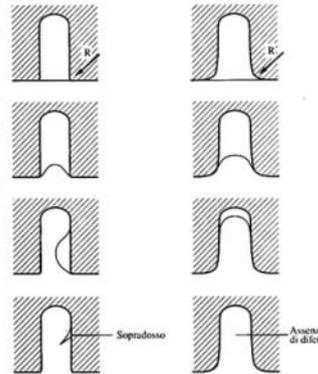
Tabella 5.2 Valori minimi di raggi di raccordo interni ed esterni delle incisioni degli stampi.



h/b	r _i (mm)	r _e (mm)
≤ 2	0,06h + 0,5	2,5r _i + 0,75
2 + 4	0,07h + 0,6	3r _i + 0,75
> 4	0,08h + 0,75	3,5r _i + 0,75

Raggi di raccordo:

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



Angoli di sformo:

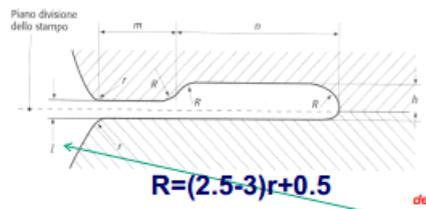
- 7-8° per pezzi normali, 10-12° per pezzi alti
- Facilitare il riempimento.
- Evitare usura durante l'estrazione.

I raccordi e gli angoli di sformo fanno anche sì che la forma venga correttamente riempita e che non si concentrino tensioni. Infatti il pezzo potrebbe rompersi per l'accumulo di tensioni residue oppure il metallo che viene forzato all'interno di una feature potrebbe non riempire completamente la cavità, oppure potrebbe ripiegarsi su sé stesso.

Scelta del piano di bava e canale scarta-bava

Il piano di bava deve essere scelto con criteri tecnici ed economici, infatti come abbiamo visto la bava fa aumentare la forza di contatto necessaria per continuare a deformare il pezzo, inoltre la bava andrà rimossa in lavorazioni successive, quindi deve essere facilmente accessibile alle macchine che faranno la finitura del pezzo stesso.

Inoltre va anche scelta adeguatamente la dimensione del canale scarta bava e del suo spessore per poter decidere anche quanto deve essere lunga la e alta la camera scarta-bava.

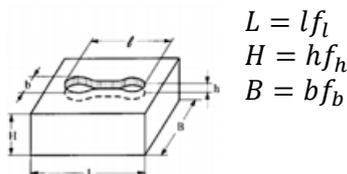


La lunghezza del canale scarta-bava viene determinata a partire da regole empiriche basata sulla sua sezione, che è la sezione del pezzo misurata sul piano di bava e del perimetro del piano di bava stesso (p)

$$l = 0.07 \frac{S}{p} \quad \text{oppure} \quad l = 0.0175 \sqrt{S}$$

Dimensioni dello stampo

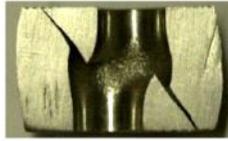
Le problematiche legate al dimensionamento dello stampo, non della cavità, sono quelle di creare uno stampo sufficientemente resistente da evitare che ci siano rotture dello stesso dovute alla forza di stampaggio. Tuttavia lo stampo deve essere sufficientemente piccolo da poter essere installato sulle macchine a disposizione. In generale si utilizzano dei coefficienti maggiorazione che moltiplicano le dimensioni della cavità.



Difetti di forgiatura



Formazione di fratture duttili



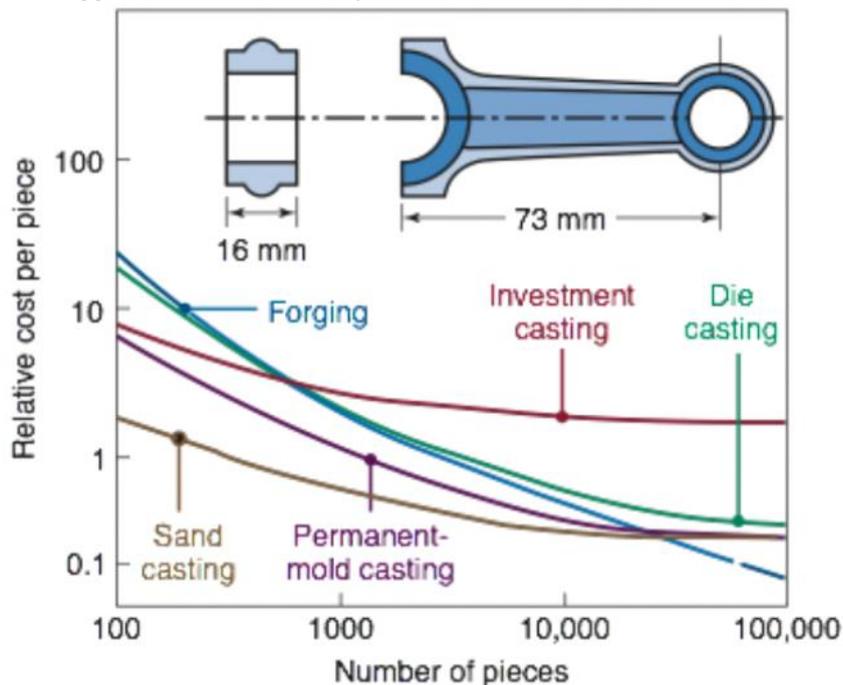
Instabilità plastica e frattura



I difetti tipici nelle operazioni di forgiatura sono la formazione di fratture, che possono essere duttili, segnate da bordi più irregolari o causate da instabilità plastica. Queste fratture sono sempre inclinate di 45° rispetto al piano di appoggio, questo perché è la direzione di sforzo massimo.

Costi di forgiatura

La forgiatura è un'operazione costosa ed è conveniente se e soltanto se riusciamo a produrre una serie numerosa di pezzi con uno stesso stampo, infatti gli stampi in acciaio che richiedono lavorazioni di fresatura per essere prodotti, sono molto più costosi degli stampi da fonderia. Inoltre anche il costo delle macchine e la necessità di avere operatori con un alto livello di esperienza, incidono maggiormente sui costi di produzione stessi.



Confronto tra forgiatura e fonderia

Le analogie tra i due processi sono:

- La necessità in entrambi i processi di una forma chiusa
- Il fatto che un grezzo di fonderia e un grezzo di stampaggio siano visivamente simili.

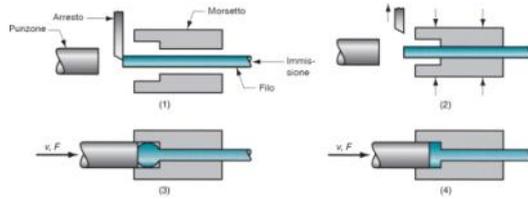
Tuttavia lo stampaggio permette di creare pezzi dalle caratteristiche meccaniche più spinte, inoltre abbiamo un miglior controllo della struttura microscopica.

I costi unitari dipendono dalla numerosità della serie da produrre

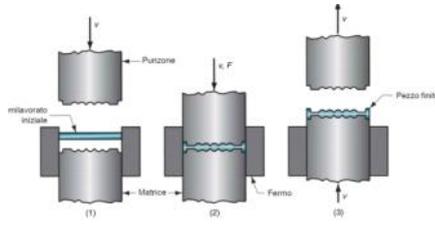
La scelta di un processo anzi che un altro dipende dalla geometria del pezzo, dal numero di pezzi da produrre, dalla colabilità del materiale, dalla fragilità del materiale e dalle dimensioni del pezzo stesso.

Altri processi

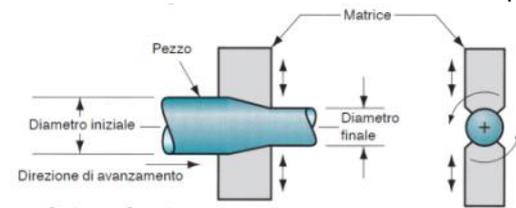
- **Ricalcatura:** per creare le teste delle viti e di altra minuteria



- **Coniatura:** processo severo per gli stampi, perché avviene con una piccola altezza e una grande superficie da stampare, quindi la forza di stampaggio è elevata rispetto alle dimensioni degli stampi. La coniatura è un processo costoso perché è difficile ammortizzare il costo degli stampi



- **Forgiatura radiale o martellatura:** lavorazioni in stampi semiaperti



- **Forgiatura isoterma:** processo applicato poco spesso e quando è fatto solitamente lo si fa sottovuoto per evitare l'ossidazione. Si cerca di mantenere la temperatura del pezzo costante durante tutto il processo.

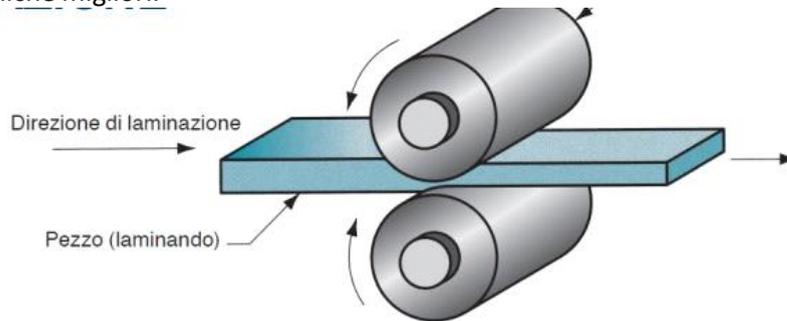
4.3.1 - Laminazione

È un processo di deformazione in cui viene ridotto lo spessore del grezzo mediante forze di compressione esercitate da due cilindri contrapposti. I cilindri sono quindi gli utensili che operano la lavorazione e possono essere anche in questo caso utensili di forma, quindi sagomati per laminare profili specifici.

La laminazione è un processo di deformazione plastica massiva, infatti, sebbene il risultato sia una lamina di materiale, il processo lavora dei grezzi massicci.

La lavorazione può avvenire:

- A caldo, se bisogna ridurre lo spessore in modo considerevole, quindi esercitare grandi deformazioni;
- A freddo, per piccole deformazioni, con il vantaggio di avere maggiori precisioni e proprietà meccaniche migliori.

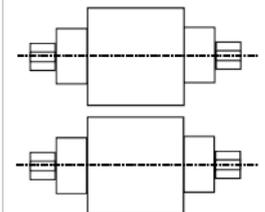


Struttura del grano

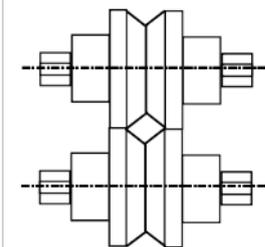
Durante la laminazione vengono prodotti pezzi che sono anisotropi, ovvero i grani sono allineati, infatti il processo avviene schiacciando il grano e costringendolo ad allungarsi per passare in mezzo ai rulli di laminazione. Questo fatto impone che sia necessario conoscere la direzione di laminazione, per poter sfruttare al meglio le proprietà meccaniche della lamina. La riduzione dello spessore del grano comporta un aumento della resistenza meccanica e della duttilità del materiale.

Geometrie di laminazione

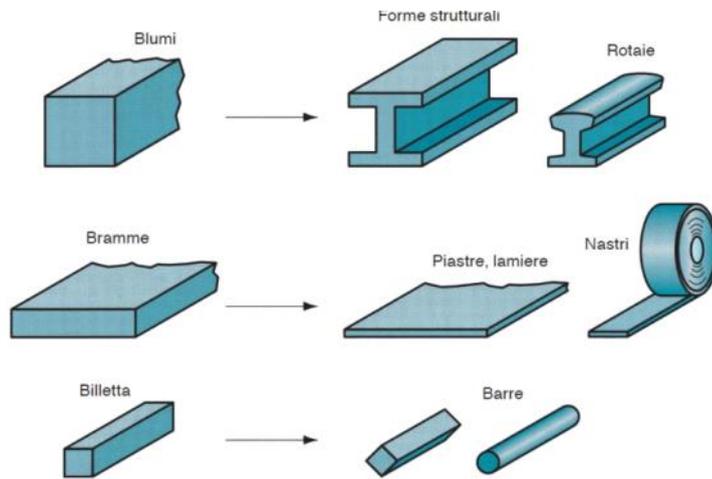
Il caso più semplice di laminazione è quella piana, dove i rulli hanno forma cilindrica. Questo tipo di processo è il più tipico per quanto riguarda la produzione delle lamiere e sarà quello che analizzeremo con modelli matematici.



In altri casi i rulli possono essere sagomati. In questo caso si parla di calibri e questi impongono una particolare geometria alla sezione in uscita dalla laminazione.



Prodotti ottenuti per laminazione

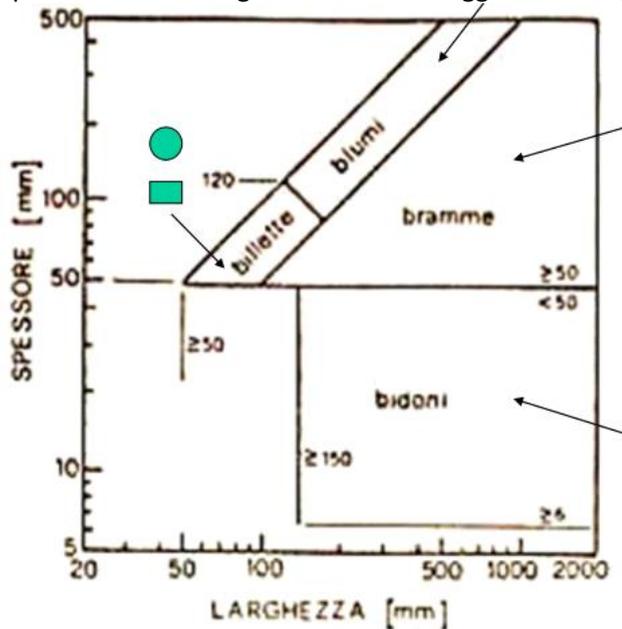


Inoltre attraverso il processo di laminazione possiamo ottenere anche dei tubi.

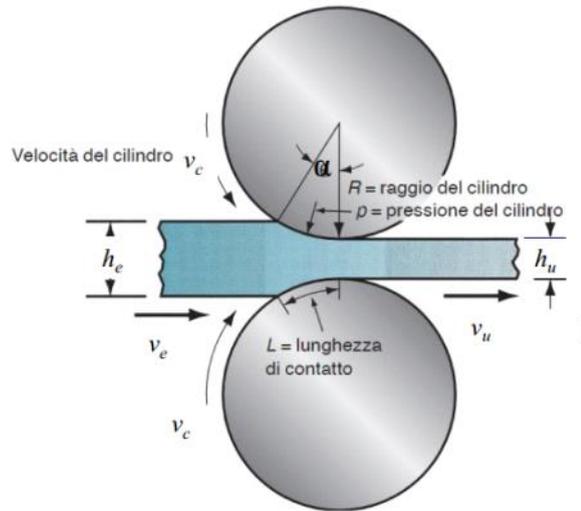
Classificazione dei grezzi di partenza

I semilavorati che possiamo ottenere per laminazione si classificano in base alla loro geometria e al loro spessore:

- Blumi: pezzi a geometria circolare o prismatica, hanno dimensioni di spessore e larghezza paragonabili (sezione circolare, quadrata, rettangolare...)
- Bramme: pezzi prismatici la cui larghezza è maggiore dello spessore
- Billette: pezzi sempre prismatici o cilindrici, con dimensioni di spessore e larghezza paragonabili ma più piccoli dei blumi
- Bidoni: pezzi prismatici la cui larghezza è molto maggiore dello spessore.



Laminazione piana: principali relazioni (slide 7-20)



I parametri della lavorazione di laminazione sono:

- La riduzione di spessore $\Delta h = h_e - h_u$
- La riduzione percentuale di spessore $r_l = \frac{\Delta h}{h_e}$
- La diffusione, ovvero di quanto si allarga il nostro pezzo $\Delta b \approx 0 \rightarrow b_e = b_u$
- La portata volumetrica $h_e v_e b_e = h_u v_u b_u$
- l'arco di contatto $L = \sqrt{R \Delta h}$
- l'angolo di contatto $\alpha = \frac{L}{R}$
- Il punto di inversione $v_e < v_c < v_u$
- Lo slittamento in avanti $s = \frac{v_u - v_c}{v_c}$

Inoltre imponiamo, come per ogni lavorazione di deformazione plastica, la conservazione del volume.

$$h_e l_e b_e = h_u l_u b_u$$

Si può inoltre dimostrare che:

$$\frac{v_u}{v_e} = \frac{h_e}{h_u}$$

E quindi che la velocità del laminato in uscita sia maggiore di quella in ingresso. ($v_u > v_e$)

Come abbiamo visto la diffusione è circa zero, in realtà quindi abbiamo un allargamento del pezzo in uscita definito come:

$$\Delta b = b_e - b_u$$

Questa grandezza è legata con buona approssimazione ad altre nel caso di laminazione con rulli cilindrici, in particolare abbiamo che:

- Per sezioni quadrate si usa la formula di Geuze: $\Delta b = 0.35 \Delta h$
- Per sezioni rettangolari abbiamo:
 - o La formula di Siebel: $\Delta b = L \frac{\Delta h}{h_e} = \sqrt{R \Delta h} \frac{\Delta h}{h_e}$
 - o La formula di Sedlaczeck: $\Delta b = \frac{\Delta h}{6} \sqrt{\frac{R}{h_e}}$

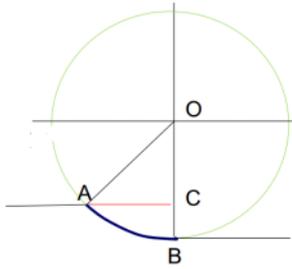
Anche se in ogni caso è sempre vero che:

$$\Delta b < \Delta h \quad e \quad \frac{\Delta h}{h_e} \gg \frac{\Delta b}{b_e}$$

Per questo motivo possiamo approssimare la diffusione a zero.

NOTABENE PER ESAME!!!!

L'arco di contatto



Per calcolare l'arco di contatto di un singolo rullo, analizziamo solo metà laminatoio, quindi in particolare ci troviamo nella situazione in figura dove:

$$AO = BO = R_{rullo}$$

$$CB = \frac{\Delta h}{2}$$

Per calcolare l'arco di contatto di un singolo rullo, analizziamo solo metà laminatoio, quindi in particolare ci troviamo nella situazione in figura dove:

$$AO = BO = R_{rullo}$$

$$CB = \frac{\Delta h}{2}$$

Sviluppando con il teorema di Pitagora e approssimando l'arco di contatto AB ad un segmento:

$$AB^2 = AC^2 + CB^2 = OA^2 - OC^2 + CB^2$$

Quindi sostituendo:

$$AB^2 = R_{rullo}^2 - \left(R_{rullo} - \frac{\Delta h}{2} \right)^2 + \frac{\Delta h^2}{4} = R\Delta h$$

Da cui:

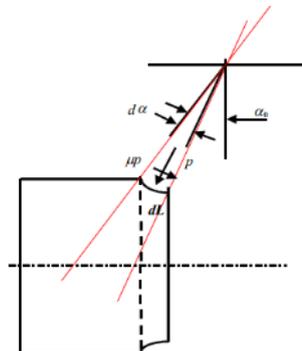
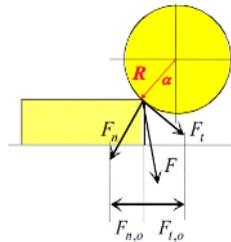
$$L = AB = \sqrt{R\Delta h}$$

Da cui ricaviamo l'angolo sotteso dall'arco di contatto che vale:

$$\alpha = \frac{L}{R} = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$$

Condizione di imbocco

La condizione di imbocco è la condizione che deve essere rispettata per fare in modo che il laminando imbrocchi il laminatoio senza spinte esterne, ma sfruttando l'attrito di strisciamento tra il laminando e i rulli del laminatoio. Quindi per verificare quale sia la condizione di imbocco vogliamo calcolare di una generica forza F la componente normale e quella tangenziale, per poi proiettarle sull'orizzontale, ovvero la direzione di moto del laminando.



Dato che:

$$\begin{cases} F_n = p \cdot dL \cdot b_e \\ F_t = \mu \cdot p \cdot dL \cdot b_e \end{cases}$$

Allora proiettando sull'orizzontale si ottiene

$$\begin{cases} F_{n,o} = p \cdot dL \cdot b_e \cdot \sin \alpha \\ F_{t,o} = \mu \cdot p \cdot dL \cdot b_e \cdot \cos \alpha \end{cases}$$

Se la componente orizzontale della forza tangenziale è maggiore della componente normale allora si ha l'imbocco, altrimenti il materiale viene rifiutato.

Quindi la condizione di imbocco si ha per:

$$F_{t,o} \geq F_{n,o} \rightarrow \mu \cdot \cos \alpha \geq \sin \alpha \rightarrow \mu = \tan \tau \geq \tan \alpha$$

$$\tau \geq \alpha$$

Indicando infine con L l'arco in presa e approssimandolo con la corda si ottiene quindi:

$$\mu \geq \tan \alpha \approx \alpha = \frac{L}{R} = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad \rightarrow \quad \Delta h \leq \mu^2 R$$

Che rappresenta la condizione di massima riduzione ammissibile in condizioni di imbocco naturale.

Se questa condizione non è rispettata si può intervenire

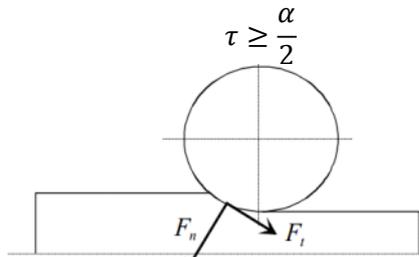
- Aumentando l'attrito tra rullo e laminando, quindi riducendo la lubrificazione dei rulli stessi
- Aumentare il raggio dei rulli
- Diminuire il Δh
- Applicare una forza di spinta al laminando

Ovviamente queste soluzioni presentano tutte degli svantaggi.

Condizione di trascinamento

Questa condizione, meno severa di quella di imbocco, ci dice se il materiale una volta imboccato il laminatoio verrà trascinato per effetto dello strisciamento tra i rulli e il laminando.

Se consideriamo la forza F che rullo e laminando si scambiano come forza concentrata nel punto medio dell'arco, possiamo di nuovo scomporla nelle sue due componenti, proiettarla sull'orizzontale e imporre che la risultante sia diretta nel verso di uscita dal laminatoio. Con calcoli analoghi ai precedenti si ottiene:



FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

Sezione di inversione

Si può dimostrare che:

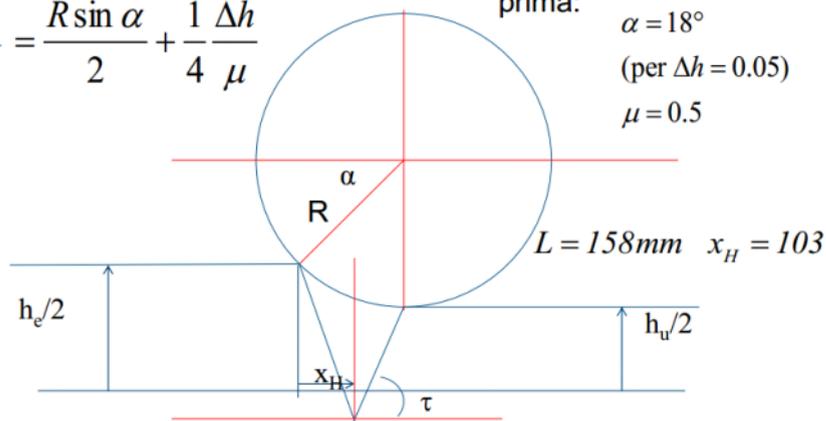
$$x_H = \frac{R \sin \alpha}{2} + \frac{1}{4} \frac{\Delta h}{\mu}$$

Con gli stessi valori di prima:

$$\alpha = 18^\circ$$

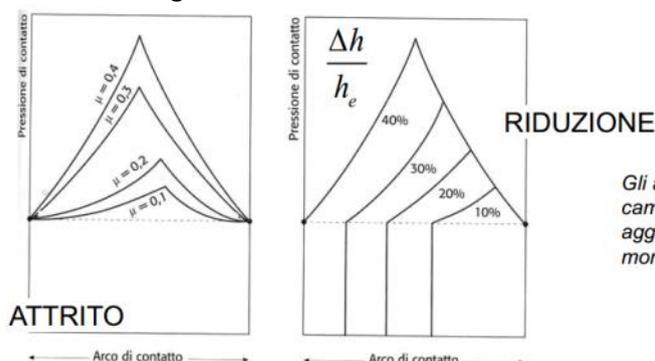
$$\text{(per } \Delta h = 0.05)$$

$$\mu = 0.5$$



Forze e potenze

Per valutare precisamente le forze e le potenze in gioco, abbiamo bisogno di determinare la pressione lungo l'arco in presa. La pressione $p(\theta)$ è rappresentabile con la collina delle pressioni. In questo caso la analizzeremo senza l'aggiunta di sollecitazioni causate da un tiro a valle o a monte, che ne modificherebbero gli andamenti.



Gli andamenti cambiano se si aggiunge un tiro a monte o a valle

Attraverso il teorema della media integrale possiamo determinare la pressione media di contatto

come:

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

Le forza verticale invece la otteniamo come il prodotto della pressione media per l'area di contatto media

$$F_v = p_{av} b_m L = p_{av} b_m \sqrt{R \Delta h} \dots$$

$$M = F_v d \approx F_v \frac{L}{2} = p_{av} \frac{L^2}{2} b_m$$

$$P = 2M\omega = p_{av} b_m L^2 \frac{v_c}{R} = p_{av} b_m v_c \Delta h$$

$$W = P \cdot \text{tempo}_{lam} = (p_{av} b_m v_c \Delta h) \cdot \text{tempo}_{lam}$$

$$v_c \cdot \text{tempo}_{lam} \cong \frac{l_e + l_u}{2} = l_m$$

$$W = p_{av} b_m l_m \Delta h = p_{av} b_m l_m h_m \frac{\Delta h}{h_m} = p_{av} \ln \frac{h_e}{h_u} V = uV$$

Difetti di laminazione

I difetti tipici che possiamo incontrare a seguito di una laminazione sono dovuti allo spessore del pezzo in ingresso nei rulli, all'usura dei rulli stessi e all'attrito.

Lo spessore del pezzo infatti, se è troppo elevato può causare una flessione dei rulli che si inarcano verso l'esterno del laminatoio, questo porta ad avere il lavorato in uscita con uno spessore maggiore al centro rispetto a quello ai lati della lamina.

L'usura dei rulli comporta anch'essa dei difetti, infatti oltre alle tolleranze dimensionali che non saranno rispettate a causa dello spessore non uniforme dei rulli, ne risentirà anche la finitura superficiale della lamina.

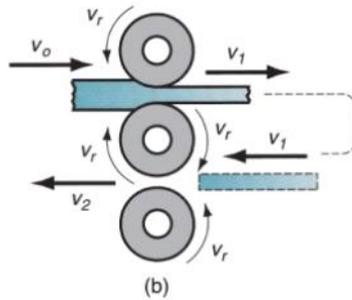
L'attrito genera difetti di distorsione e di surriscaldamenti locali, infatti il pezzo potrebbe surriscaldarsi entrando tra i rulli, quindi presentare bruciature sulla superficie o zone in cui il materiale ha subito un ritiro non uniforme, formando delle pieghe. Questo effetto è presente soprattutto nella laminazione a freddo. Come sappiamo però, oltre a non essere del tutto eliminabile, l'attrito è necessario in questo processo, infatti il pezzo viene trascinato tra i rulli proprio dall'attrito di contatto pezzo-rullo.

Un ultimo difetto tipico è quello di apertura del laminato, questo infatti potrebbe essere un materiale affine a quello dei rulli, che a causa della pressione di contatto, subisce una microsaldatura con il rullo stesso, aprendosi come una bocca di coccodirillo.

Tipologie di laminatoi

Quindi per ridurre i difetti di laminazione, i laminatoi sono stati riprogettati al fine di irrigidire la struttura e di ridurre la differenza di altezza di una singola passata, progettando laminatoi che facciano più passate in serie.

Una delle tipologie più efficaci di laminatoi è quello DUO, infatti in questa configurazione il materiale da laminare entra nella macchina e viene fatto passare in una serpentina, al centro della quale vi sono i rulli di laminazione che spianano la lamina assottigliandone sempre di più lo spessore, inoltre le serpentine hanno in comune il rullo di laminazione centrale, quindi le forze di laminazione esercitate dal rullo superiore, irrigidiscono maggiormente questa con figurazione. Un altro vantaggio di questa configurazione è la compattezza della macchina.



Laminazione di calibratura

Come abbiamo detto quando si utilizzano dei rulli che sono sagomati, questi si chiamano calibri e l'operazione prende il nome di calibratura. Gli obiettivi di questo tipo di lavorazione sono ottenere una forma definita del prodotto finito, con quindi una buona precisione superficiale e il miglioramento grazie all'incrudimento delle proprietà meccaniche. I prodotti sono travi metalliche a T, doppio T, a C, a L; barre di sezione particolare e rotaie.

Le problematiche tecnologiche legate a questo tipo di lavorazione sono la progettazione della sequenza di forme e il numero di passaggi.

NOTABENE PER ESAME!!!!

Calcolo del numero di passaggi in calibratura

Il calcolo del numero di passaggi serve per assicurarsi che durante la passata di laminazione non venga superato il valore massimo di allungamento.

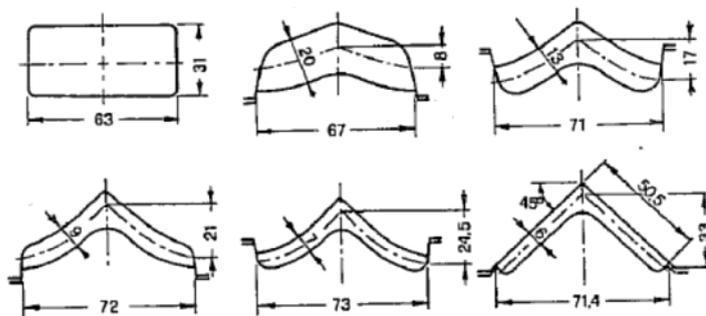
$$\lambda_t = \frac{l_u}{l_e} = \frac{A_e}{A_u} \quad \text{Allungamento totale}$$

λ_i Allungamento al passaggio i -esimo

$$A_{i-1} = \lambda_i A_i$$

$$A_e = \lambda_1 \dots \lambda_{n-1} \lambda_n A_u = \lambda_m^n A_u \quad \text{con } 1.25 < \lambda_m < 1.8$$

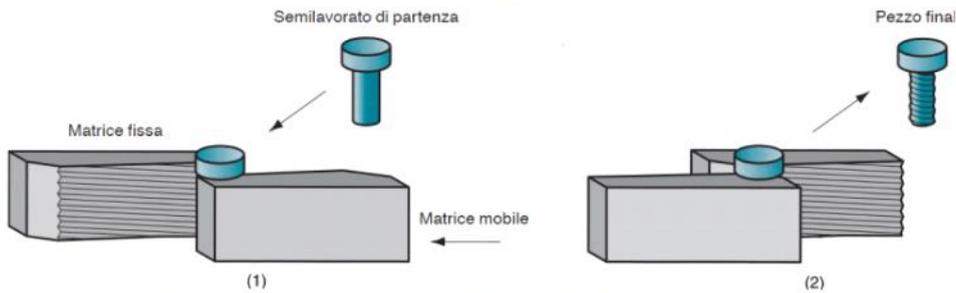
$$n_{\text{passaggi}} = \frac{\ln \lambda_t}{\ln \lambda_m} = \frac{\ln A_e - \ln A_u}{\ln \lambda_m}$$



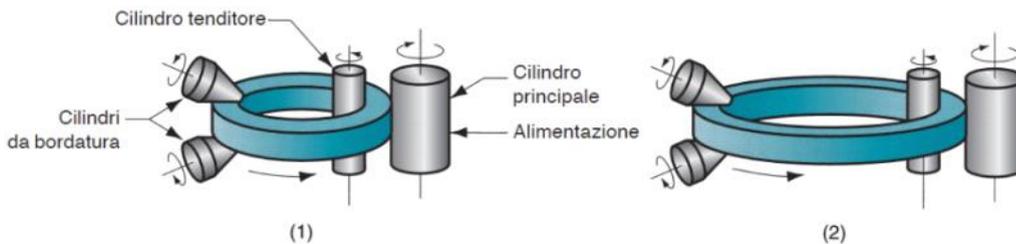
FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

Altre lavorazioni di laminazione

Rullatura (Thread Rolling)

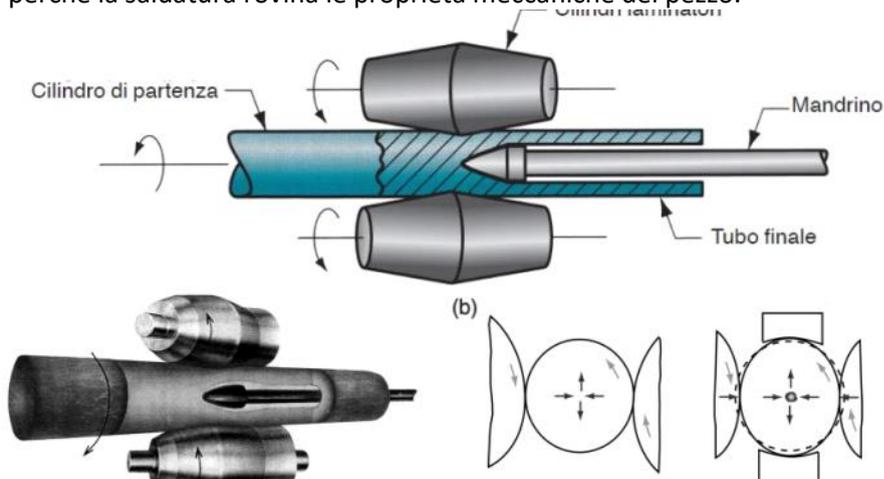


Laminazione di anelli (Ring Rolling)



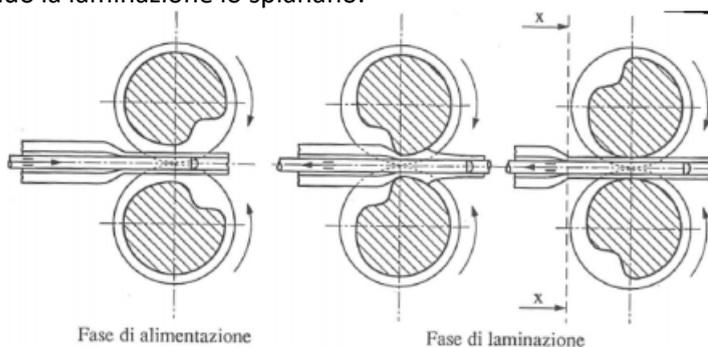
Laminazione Mannesmann o laminazione obliqua

Lo scopo di questa laminazione è quella di ottenere tubi lunghi e senza saldature longitudinali, questo perché la saldatura rovina le proprietà meccaniche del pezzo.



La prima fase del processo consiste in una prima laminazione di una billetta su una spina, questa prima passata inizia ad allungare il materiale in ingresso, inoltre la spina crea il foro all'interno del tubo. I cilindri sono disassati e non nello stesso verso, così facendo oltre a laminare il tubo, lo mettono in rotazione e lo spingono sulla punta che andrà a forarlo.

Nella seconda fase di laminazione il tubo viene ridotto di spessore in un laminatoio a passo di pellegrino, in cui i rulli non sono perfettamente cilindrici, ma hanno un gradino che serve per incastrarsi sulla parte indeformata per tirarla all'interno del laminatoio. Poi il pezzo non si muove e i rulli compiendo la laminazione lo spianano.



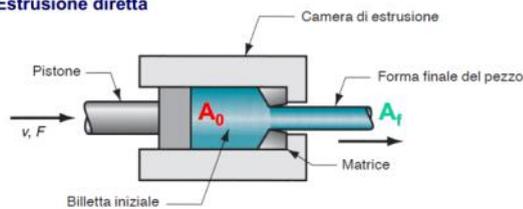
4.3.2 - Estrusione

Solitamente il processo di estrusione avviene a caldo, anche se può essere eseguito a freddo e a tiepido.

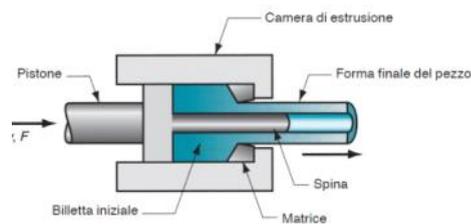
Gli schemi tipici del processo sono l'estrusione diretta e quella inversa.

Nell'estrusione diretta abbiamo che nella camera di estrusione un pistone spinge il materiale contro la matrice. La matrice, in posizione opposta al pistone è forata e fa sì che il materiale venga estruso attraverso l'apertura dalla forza applicata dal pistone. Con il processo di estrusione diretta è anche possibile estrudere pezzi cavi di varie geometrie, quali ad esempio dei tubi. Questo processo avviene inserendo una spina sul pistone che estrude il materiale, facendo sì che la spina sia la prima parte a penetrare nel materiale e riempia la parte centrale dell'apertura sulla matrice.

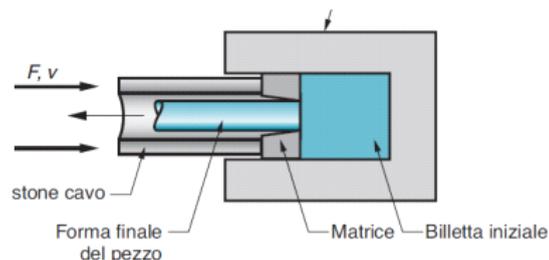
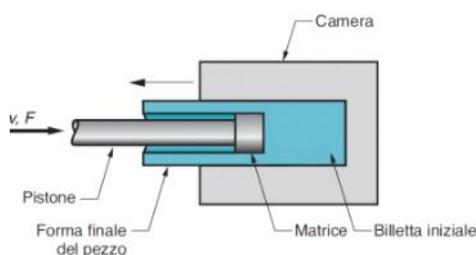
Estrusione diretta



diretta per pezzi cavi



Nell'estrusione inversa invece abbiamo la matrice che è collocata direttamente sul pistone, quindi il pistone comprime il materiale in una camera di estrusione fondo cieco. Il materiale si trova costretto a imboccare la matrice del pistone come via di uscita e viene estruso attraverso lo stesso. Anche in questo caso possiamo creare sia geometrie piene che cave, e nelle geometrie piene abbiamo il pistone cavo attraverso cui esce il materiale estruso, in quelle cave invece il pistone è pieno e crea la cavità nel pezzo. Il materiale in estrusione fuoriesce dall'intercapedine tra la matrice e la parete della camera di estrusione.



Meccanica dell'estrusione

Come si può notare, in estrusione abbiamo che la distribuzione degli sforzi e delle deformazioni nel materiale estruso non è uniformemente distribuita. Il materiale più esterno, viene maggiormente deformato e subisce uno stato di sforzo maggiore, questo per effetto dell'attrito relativo tra le pareti della camera di estrusione, la matrice e il materiale stesso. Al centro invece il materiale non risente di questo effetto, quindi resta più libero di fluire. È inoltre apprezzabile analizzando la distribuzione degli sforzi una zona morta, ovvero una zona dove gli sforzi sono nulli e che quindi non sarà deformabile per estrusione.

Sperimentalmente si è anche notato che i materiali hanno un loro angolo di scorrimento, che semplifica l'estrusione.

Analisi deformazioni e pressioni

$$A_0 L_0 = A_f L_f$$

Rapporto di estrusione $r_x = \frac{A_0}{A_f} = \frac{L_f}{L_0}$

Lavoro esterno Lavoro interno ideale

Deformazione ideale $\varepsilon_x = \ln r_x$

$$FL_0 = (A_0 L_0) Y_f \ln r_x$$

$$p A_0 L_0 = (A_0 L_0) Y_f \ln r_x$$

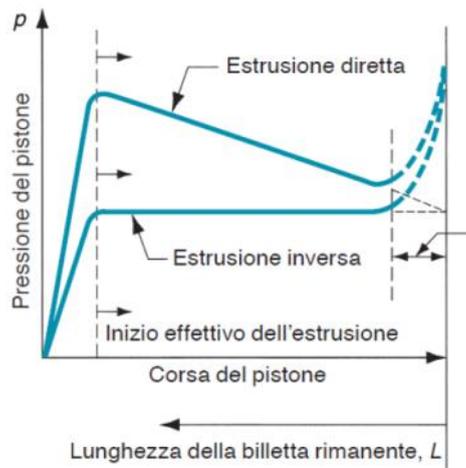
Pressione ideale del pistone $p = Y_f \ln r_x$

Deformazione reale: relazione di Johnson $\varepsilon_x = a + b \ln r_x \left\{ \begin{array}{l} a = 0.8 \\ b \in [1.2; 1.5] \end{array} \right.$

Pressione reale $p = \begin{cases} Y_f \left(\varepsilon_x + 2 \frac{L}{D_0} \right) \rightarrow \text{Estrusione diretta} \\ Y_f \varepsilon_x \rightarrow \text{Estrusione inversa} \end{cases}$

Come vediamo dal grafico pressione corsa, dopo il tratto iniziale dell'estrusione in cui si spinge il materiale nella matrice, l'andamento della pressione di contatto è diverso per l'estrusione diretta e quella inversa. Questo è dovuto al fatto che nell'estrusione diretta il pistone deve spostare tutto il materiale contenuto nella camera, quindi all'inizio la forza di attrito è maggiore e poi va diminuendo. Nel caso di estrusione inversa, l'attrito tra il materiale e la camera non agisce in modo rilevante, infatti il materiale è fermo ed è la matrice a muoversi.

NOTABENE PER ESAME!!!!



FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

Influenza dell'angolo della matrice sul lavoro

Avendo detto in precedenza che i materiali hanno un angolo naturale di scorrimento, è intuibile come anche l'angolo della matrice abbia un effetto sul lavoro di estrusione. Infatti il foro della matrice non è un foro cilindrico, bensì un foro tronco-conico, dove la base minore è quella a contatto con il materiale stesso.

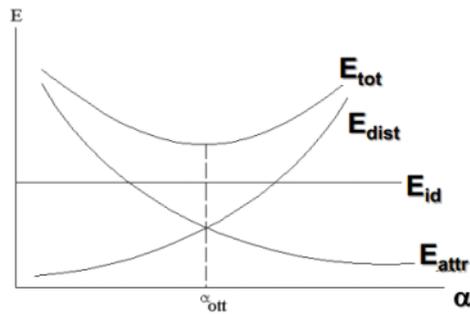
l'angolo della matrice si misura internamente, e ci dice di quanto la parete a contatto con il materiale è inclinata verso l'interno.

Per trovare l'angolo ottimo, si fa riferimento alle 3 aliquote energetiche che entrano in gioco nel processo.

La prima aliquota, che è costante, è l'energia di deformazione ideale, che è quella che serve per portare il diametro dal valore iniziale a quello finale con una sollecitazione mono assiale.

La seconda energia è quella di distorsione, necessaria a causare la deviazione di flusso del materiale.

La terza aliquota invece è l'energia necessaria a vincere la resistenza di attrito.



Come si evince dal grafico, le tre aliquote hanno un andamento tale per cui l'energia totale risultante è una funzione concava, che quindi ammette un minimo rappresentato dall'angolo α ottimo.

Pressioni di estrusione per matrici complesse

Per determinare la forza di estrusione per sezioni complesse, rese tali dalla presenza di pareti sottili, si utilizza il coefficiente correttivo K_x , che indica il rapporto tra la pressione per estrudere una sezione complessa e quella per estrudere una sezione circolare con la stessa area. Nel calcolo di questo coefficiente rientrano la circonferenza C_c di un cerchio avente la stessa area della sezione e il perimetro effettivo della sezione da estrudere.

$$K_x = 0.98 + 0.02 \left(\frac{C_x}{C_c} \right)^{2.25}$$

$$F = K_x p A_0$$

Matrici di estrusione

Nelle matrici inoltre troviamo un tratto iniziale di lunghezza a , calibrato in modo da conferire le dimensione finali e le caratteristiche di finitura superficiale al prodotto estruso

Altri processi di estrusione

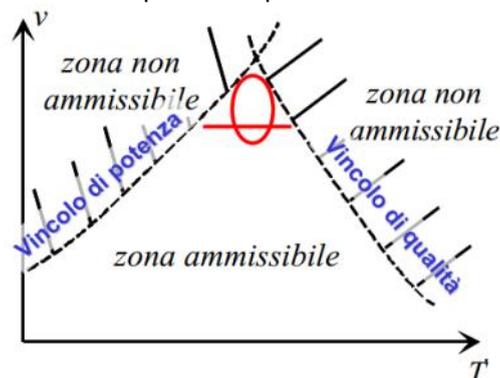
Altri processi di estrusione, sono:

- l'estrusione a impatto, in cui un punzone impatta contro il materiale posto sulla matrice e lo estrude sfruttando la forza impulsiva. Può essere fatto sia per pezzi cavi con estrusione diretta, sia per pezzi cavi con estrusione inversa, sia possono essere combinate le due tipologie di estrusione, ottenendo un pezzo estruso per impatto da ambo i lati della matrice.
- Estrusione idrostatica, processo costoso in cui nella camera di estrusione viene immesso del fluido, che verrà messo in pressione ed estruderà il materiale. È adatto a metalli fragili, infatti grazie al fluido la pressione viene meglio distribuita tutto attorno al pezzo; tuttavia il processo è costoso.

Difetti dei pezzi estrusi

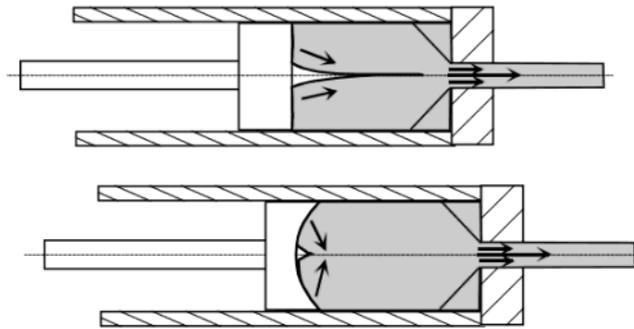
I difetti tipici dei pezzi estrusi sono le cricche e le deformazioni.

Le cricche superficiali sono causate da una troppo elevata temperatura di estrusione, dall'elevata velocità di estrusione o dagli attriti troppo alti, che quindi non permettono al reticolo cristallino di riformarsi dopo l'estrusione. Possiamo quindi individuare una regione su un piano v-T che ci dia le coppie di velocità e temperatura per cui sia accettabile la finitura superficiale del materiale estruso. Questa operazione è quindi un'operazione di ottimizzazione vincolata a due parametri, quindi vogliamo cercare di lavorare il più vicino possibile ai vincoli.



Le cricche interne invece sono quelle più pericolose, infatti sono visibili solo dopo aver analizzato il pezzo o rompendolo o con analisi ad ultrasuoni o radiografie. Queste cricche sono causate dalla velocità di estrusione più elevata al centro rispetto a quella delle porzioni periferiche, creando una

cavità nella zona posteriore del massello, che potrebbe estendersi fino all'estruso. Per ridurre l'incidenza di questo tipo di difetto, possiamo quindi creare una matrice che abbia una concavità rivolta verso il massello e che quindi, durante l'estrusione tende non solo a spingere in avanti il massello, ma comprime verso il centro le estremità, riducendo l'effetto di cavità.

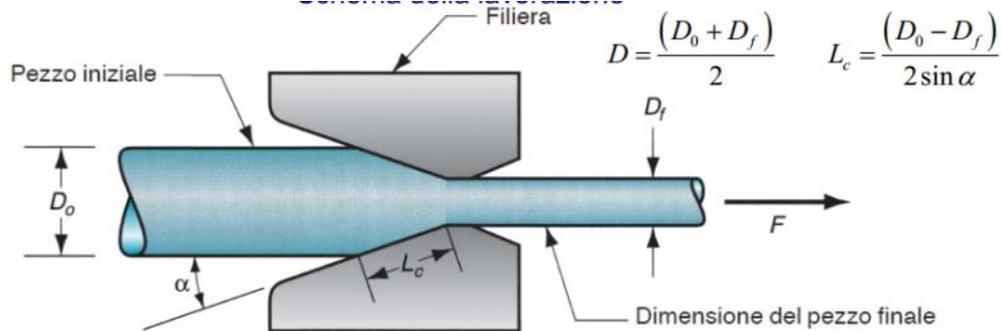


Infine un ultimo difetto può essere causato dalla distorsione del materiale, infatti la differenza di velocità tra la periferia e il centro del massello, crea delle tensioni e delle distorsioni che possono estendersi anche a valle della matrice stessa, rovinando quindi il materiale già estruso.

La trafilatura

La trafilatura è un processo di formatura che induce un cambiamento nella forma del materiale grezzo di partenza attraverso la deformazione plastica dovuta all'azione di forze impresse da attrezzature e matrici.

La trafilatura dei metalli realizza in continuo lunghi fili, barre con una sezione circolare oppure a profilo complesso con 3 o più lati e tubi (le barre entrano già con la loro forma finale, la trafilatura serve solo ad incrementare le proprietà meccaniche tramite incrudimento superficiale e a migliorare le tolleranze dimensionali). Le sue origini risalgono all'XI secolo e la sua continua evoluzione ha portato ad oltrepassare i limiti dimensionali progressivamente raggiunti.



Come vediamo dallo schema della filiera, i parametri che regolano il processo sono: il diametro iniziale del pezzo, il diametro finale, l'angolo di inclinazione tra la filiera e il pezzo stesso e infine la lunghezza del tratto di contatto pezzo-matrice.

In trafilatura definiamo inoltre:

- La riduzione di trafilatura: $r = \frac{(A_0 - A_f)}{A_0}$
- La deformazione di trafilatura: $\epsilon = \ln \frac{A_0}{A_f}$
- Lo sforzo di trafilatura: $\sigma_d = \frac{F_d}{A_f}$

Analisi degli sforzi

Nel processo vediamo facilmente che lo stato di sforzo è mono assiale, ma possiamo riconoscere due lavori equivalenti agenti sul pezzo.

Il primo lavoro è quello esterno, calcolato dall'analisi della forza applicata al pezzo stesso e dalla variazione di lunghezza subita:

$$W_{ext} = \Delta L \cdot F_d = \Delta L \cdot \sigma_d \cdot A_f$$

Il secondo lavoro è di tipo interno ed è quello visto dal reticolo del materiale per deformarsi:

$$W_{int} = V \cdot Y_f \cdot \epsilon = \Delta L \cdot A_f \cdot Y_f \cdot \epsilon$$

Poiché i due lavori sono uguali, eguagliando le due relazioni possiamo calcolare lo sforzo di trafilatura ideale secondo quella che è l'equazione di Schey:

$$\sigma_d = Y_f \cdot \epsilon = Y_f \cdot \ln \frac{A_0}{A_f} = Y_f \cdot \ln \frac{1}{1-r}$$

Come abbiamo detto però questo è lo sforzo ideale che avremmo sul materiale, infatti per calcolare quello reale dobbiamo tenere conto anche del contributo della disomogeneità della deformazione (dell'angolo di scorrimento del materiale e degli attriti). Quindi si introduce un parametro determinato empiricamente:

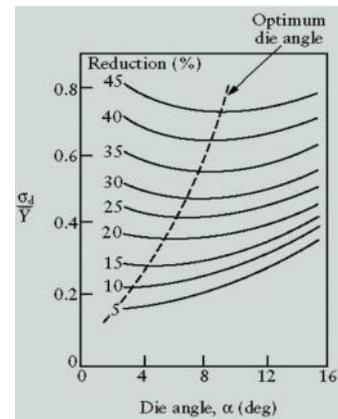
$$\phi = 0.88 + 0.12 \frac{D}{L_c} = 0.88 + 0.12 \frac{D_0 + D_f}{D_0 - D_f} \sin \alpha$$

E si rielabora l'equazione di Schey come:

$$\sigma_d = Y_f \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha}\right) \phi \ln \frac{1}{1-r}$$

È quindi possibile dimostrare anche in questo caso come esista un valore ottimo di α

In particolare si può dimostrare come il valore di ottimo di α aumenta con l'aumentare del rapporto di riduzione.



Massima riduzione

Come prima cosa è importante specificare che in tiro non può essere superato lo sforzo di snervamento.

Nell' ipotesi di:

- Lavoro ideale;
- Assenza di incrudimento: $\bar{Y}_f = Y_f$

$$\sigma_d = Y_f \ln \frac{A_0}{A_f} = Y_f \ln \frac{1}{1-r} \leq Y_f$$

$$\frac{A_0}{A_f} = e = 2.718 \rightarrow r_{\max} = \frac{e-1}{e} = 0.632$$

Se il materiale incrudisce, con ragionamento analogo



$$r_{\max} = 1 - \frac{1}{e^{n+1}}$$

$$\bar{Y}_f \ln \frac{A_0}{A_f} \leq Y_f$$

In pratica considerando anche il lavoro di attrito $r_{\max} = \begin{cases} 0.5 & \text{per trafilatura di barre} \\ 0.3 & \text{per trafilatura di fili} \end{cases}$

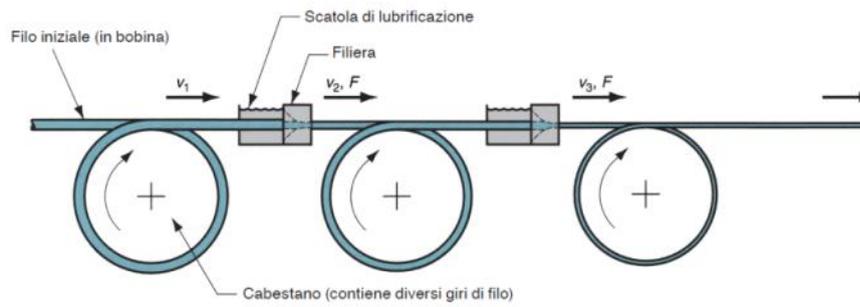
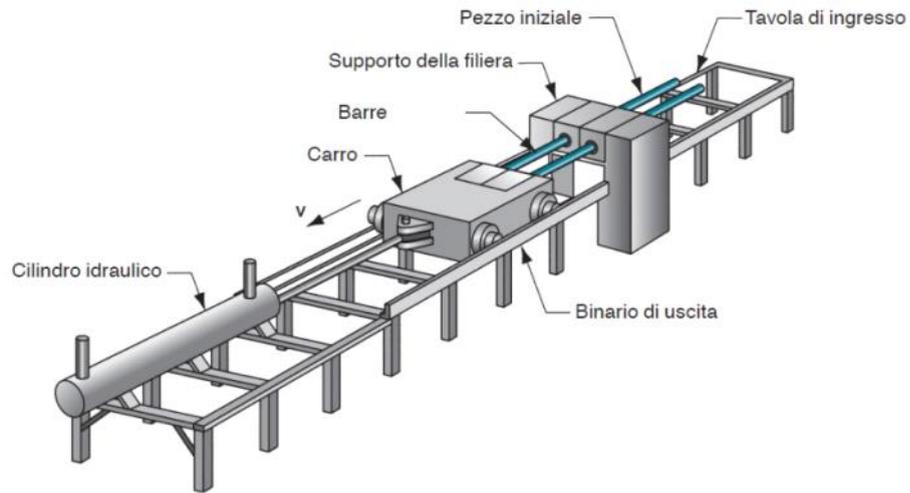
Difetti di trafilatura

Come per l'estrusione, un possibile difetto è il formarsi di cricche al centro del lavorato, questo perché proprio come in estrusione la zona centrale del materiale non risente degli effetti dell'attrito, quindi il materiale al centro fluisce più velocemente che all'esterno.

Un altro possibile difetto è la pelatura, che accade quando l'angolo di scorrimento è troppo poco acuto, facendo sì che la parte esterna del materiale non riesca a imboccare la filiera e si stacchi dal pezzo anzi che deformarsi plasticamente.

Infine si può anche avere la rottura del filo se il pezzo subisce uno sforzo troppo elevato.

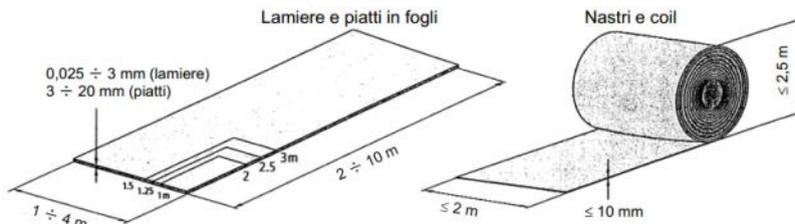
Esempi di impianti



4.4.1 - Lavorazioni della lamiera

Nelle lavorazioni di lamiera si parte da grezzi di partenza che possono essere delle lamiere o dei piatti in fogli oppure da dei nastri e dei coil. Ciò che distingue i semilavorati di partenza sono lo spessore e la lunghezza.

- Lamiere e piatti sono larghi tipicamente $1 - 4\text{ m}$ e lunghi $2 - 10\text{ m}$
 - o Le lamiere sono spesse $0.025 - 3\text{ mm}$
 - o I piatti sono spessi $3 - 20\text{ mm}$
- I nastri invece sono caratterizzati da una larghezza massima di circa 2 m , da uno spessore minore di 10 mm e da una lunghezza molto maggiore di 10 m



Principali lavorazioni della lamiera

Le principali lavorazioni per deformazione plastica delle lamiere sono:

- Taglio della lamiera
 - o Tranciatura
 - o Punzonatura
 - o Cesoiatura
- Piegatura
- Curvatura, calandratura
- Imbutitura, stampaggio

Sono generalmente lavorazioni eseguite a freddo, anche se possono essere effettuati dei trattamenti termici intermedi di ricottura. La maggior parte di esse inoltre richiede la progettazione dell'attrezzatura opportuna (stampo e punzone).

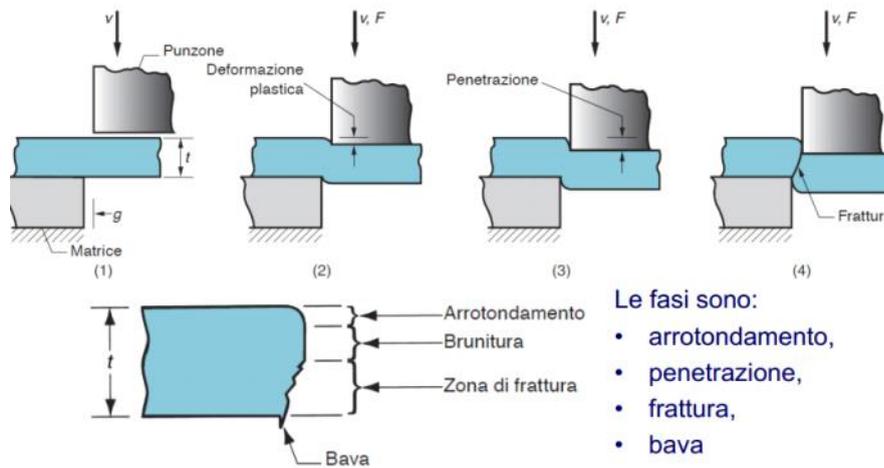
Questi processi sono adatti alla lavorazione di pezzi prodotti in serie medio-grandi.

Taglio della lamiera

A seconda del tipo di operazione il nostro pezzo lavorato può essere quello che viene espulso dalla matrice di taglio, come nel caso della tranciatura della lamiera o quello che invece resta sulla matrice, come nel caso della punzonatura.

In ogni operazione di taglio della lamiera possiamo riconoscere 4 fasi distinte:

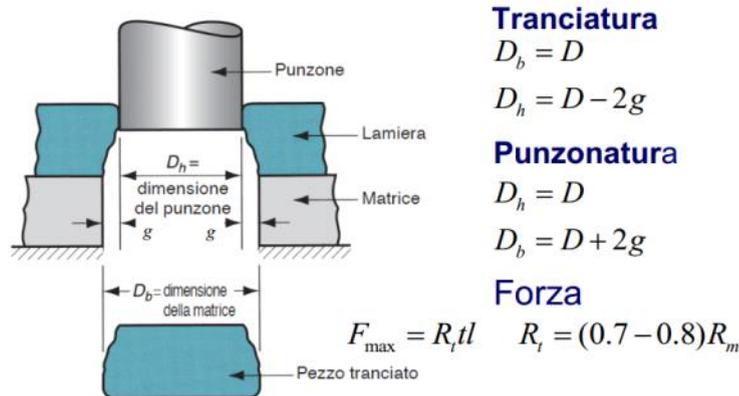
1. Arrotondamento, in questo tratto il punzone è entrato in contatto con il materiale e lo sta spingendo all'interno della matrice, il materiale inizia quindi a deformarsi plasticamente, mostrando un tratto arrotondato che costeggia il punzone e simmetricamente anche la matrice.
2. Penetrazione o brunitura, il materiale è quasi al carico di rottura, quindi il bordo arrotondato intorno al punzone inizia a farsi spigoloso e il punzone penetra effettivamente nella lamiera stessa.
3. Frattura, il materiale è in tutti i suoi punti al carico di rottura, quindi si va a creare la frattura nello spessore della lamiera da cui verrà estratto il pezzo. La frattura non si crea istantaneamente in tutto il materiale, ma si forma dall'estendersi di due cricche, una in corrispondenza dello spigolo del punzone, l'altra in corrispondenza dello spigolo della matrice, che si propagano congiungendosi.
4. Bava, arrivando a fine corsa il punzone crea della bava sul bordo del pezzo.



Come possiamo vedere già dallo schema sopra, deve esistere un gioco tra la matrice e il punzone, questo diventa importante da considerare quando si fanno le analisi delle forze che entrano in gioco nelle lavorazioni.

Analisi ingegneristica delle operazioni di taglio

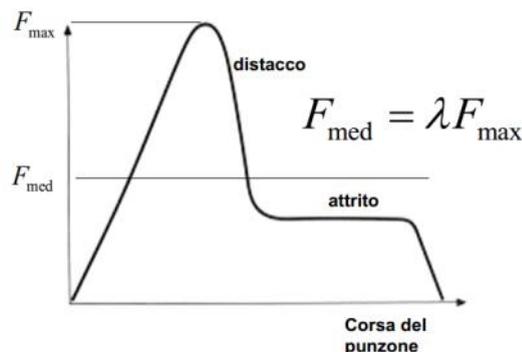
Gioco g $g = A_g t$ $A_g \in [0.045; 0.075]$ Dove t è la corsa del punzone



Come vediamo dal grafico, nell'andamento tipico della forza possiamo riconoscere il momento del distacco del materiale e la forza che deve essere impiegata per espellere il pezzo contrastando l'attrito. Inoltre è importante notare come l'energia aumenti al diminuire del gioco, infatti aumentano gli attriti da contrastare per completare il distacco del pezzo.

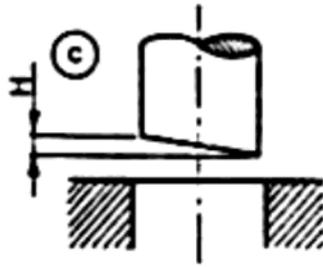
NOTABENE PER ESAME!!!!

È inoltre importante notare che l'area sottesa al grafico, rappresentate l'energia necessaria per tranciare un pezzo, resta la stessa anche se la F_{Max} aumenta.



FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

Inoltre se la forza di tranciatura è troppo elevata, quindi non è raggiungibile attraverso la pressa a nostra disposizione, possiamo ridurla ad esempio inclinando la superficie di tranciatura del punzone o della matrice stessa, aumentando la corsa che il punzone deve compiere ma riducendo la forza massima, infatti il punzone non sarà contemporaneamente impegnato su tutto il materiale, riducendo l'area di contatto, avendo quindi una maggior forza di contatto a parità di spinta della pressa.



Anche nel caso di punzone inclinato possiamo prevedere il valore della forza massima, infatti, tenendo presente che il punzone dovrà effettuare una corsa $t + H$ e che l'energia richiesta per eseguire la tranciatura resta costante:

$$E = \lambda F_{max} t = \lambda F'_{max} (t + H) \rightarrow F'_{max} = \frac{F_{max} t}{t + H}$$

Possiamo quindi ricavare anche l'angolo di cui deve essere inclinato il punzone per ottenere la forza desiderata, poiché di questo conosciamo il diametro iniziale e l'altezza di cui è inclinato.

Macchine utensili

Sono di due tipi:

- Centri di lavoro a controllo numerico: non sono specializzati, quindi sono molto flessibili in termini di lavorazione ma non hanno una grande capacità produttiva. Matrici e punzoni sono standard, sostituibili e solitamente queste macchine sono usate per la loro flessibilità nelle operazioni di roditura.
- Presse con stampi dedicati: come dice la parola, sono dedicati ad un solo tipo di prodotto, quindi non sono flessibili, ma hanno un alto regime di produzione. Gli stampi sono progettati specificatamente per il pezzo in produzione.

In generale i centri di lavoro sono usati per la lavorazione di fogli e piatti, proprio perché non hanno un alto regime produttivo, mentre il secondo tipo di macchine viene spesso alimentato dai coil di lamiera.

La scelta di uno e dell'altro tipo di macchina deve tener conto:

- Dimensione del pezzo da realizzare,
- Cadenza produttiva richiesta,
- Geometria,
- Dimensione della serie
- ...

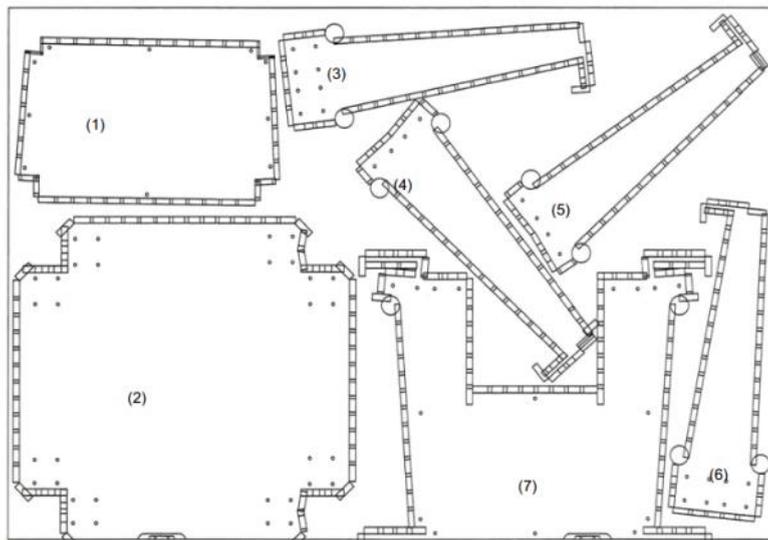
Matrici di tranciatura

In tranciatura abbiamo 2 tipologie di matrici di taglio, le matrici semplici, che contengono appunto solo una forma geometrica, oppure le matrici progressive o a passo, che sono progettate per compiere lavorazioni progressive su una stessa lamiera, senza dover passare il pezzo sotto altre macchine utensili, o senza dover cambiare lo stampo della macchina.

Roditura

È un'operazione che può essere eseguita grazie a un centro di lavoro della lamiera. Queste macchine sono macchine a controllo numerico, che possono muoversi lungo tutti e tre gli assi, ovvero oltre al movimento della lamiera e quello del punzone, abbiamo che anche la testa può muoversi lungo un suo asse, ortogonale a quello della lamiera. Inoltre dispongono di un magazzino di utensili (matrici e punzoni) di geometria elementari.

L'operazione di roditura consiste nel creare geometrie complesse attraverso più colpi singoli di un punzone, interpolando gli assi di movimento lungo la geometria. Il sistema cambia automaticamente la matrice e il punzone per eseguire la lavorazione indicata. Il grosso vantaggio di questo sistema è quindi la possibilità di poter ottenere una geometria qualsiasi a partire da punzoni e matrici standard; tuttavia questo sistema è più lento di una macchina per il taglio di lamiera tradizionale.

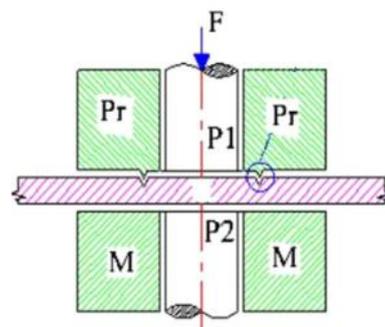


La tranciatura fine

È una variante del processo di tranciatura, in cui riusciamo ad ottenere superfici di qualità elevata e un'elevata precisione dimensionale del prodotto. È importante notare che non esiste la punzonatura fine, in quanto per ottenere la tranciatura fine, come vedremo, premiamo con un premi lamiera quello che poi diventerà metallo di scarto. Questa pressione crea dei difetti superficiali, che finché sono sullo scarto, come in tranciatura, non sono rilevanti, ma non abbiamo modo di adattare lo schema di processo alla punzonatura.

La tranciatura fine è caratterizzata da:

- Presenza di un prelamiera, che serve a schiacciare contro la matrice la lamiera e tenerla più salda, evitando che si infletta sotto la forza del punzone
- Bordino di ritenuta o cuneo di coniazione sul prelamiera, che incastrandosi nella lamiera stessa evita che scivoli verso il centro della matrice;
- Presenza di un punzone inferiore, che sostiene il pezzo nella discesa, riducendo le deformazioni
- Bassa velocità di spostamento del punzone



Fasi di tranciatura fine

1. Il prelamiera viene spinto contro la lamiera, vincolandola nella posizione di tranciatura.
2. I punzoni vengono chiusi sulla lamiera
3. Il punzone superiore viene azionato con una forza maggiore del punzone inferiore, in modo da farlo affondare nel materiale realizzando la tranciatura. La velocità tipica di questo passaggio è di 10 mm/s e non abbiamo la penetrazione del punzone nella matrice
4. Il punzone superiore passa in stato di scarico, consentendo al punzone inferiore di risalire estraendo il pezzo. Contemporaneamente viene sollevato il prelamiera.

Il risultato di questi passaggi è un componente di elevata precisione dimensionale, con una superficie generata di elevata qualità.

Come si capisce dalla dinamica del processo, abbiamo ritmi produttivi di molto inferiori rispetto alla tranciatura tradizionale.

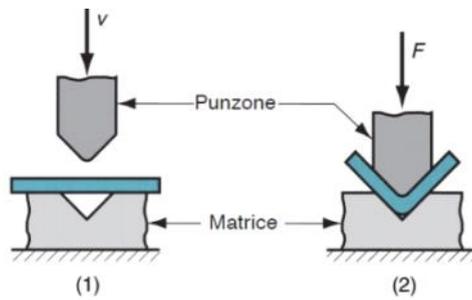
Viene largamente impiegata per la realizzazione di componenti dove è possibile ottenere un pezzo finito senza eseguire altre lavorazioni.

Piegatura

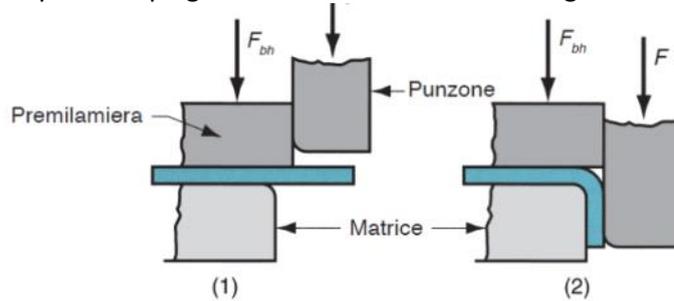
Il processo di piegatura dà come risultato una lamiera piegata di un determinato angolo. Esso può essere eseguito in due varianti, in matrice, dove un punzone preme la lamiera su una matrice piegandola o in aria.

Piegatura in matrice

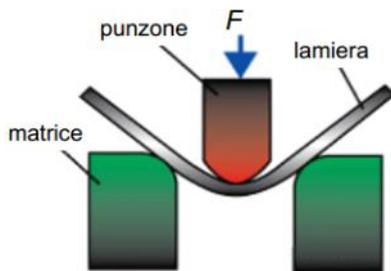
La piegatura in matrice viene eseguita spingendo con un punzone il pezzo contro una matrice, in cui abbiamo il negativo della piegatura finale. Gli estremi della matrice non sono vincolati, ma mentre scende il punzone si inflettono seguendo l'angolo di piegatura.



Un tipo particolare di piegatura è la flangiatura, in cui la lamiera è premuta sulla matrice dal premilamiera e il punzone piega il materiale creando una flangia.



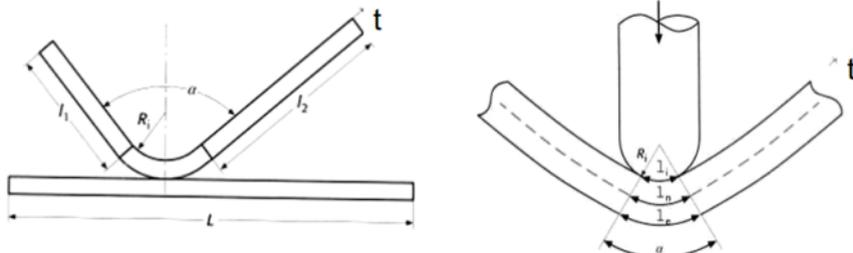
Piegatura in aria



In questo tipo di processo il punzone viene controllato in corsa, quindi so esattamente la quota a cui il pistone si arresta, per piegare una lamiera appoggiata su di una matrice cava. Le forze di piegatura sono molto basse, infatti posso permettermi l'utilizzo di materiali polimerici per la matrice e il punzone, al fine di avere meno graffi superficiali, tuttavia vi è un elevato ritorno elastico, di cui va tenuto conto quando si pensa al progetto di processo.

Analisi ingegneristica della piegatura

In piegatura vogliamo infine determinare lo sviluppo in piano della lamiera deformata, per determinare le dimensioni della lamiera di partenza. Infatti possiamo identificare una regione della lamiera che in cui le fibre si distendono, quindi abbiamo un allungamento della lamiera.



Se supponiamo che l'asse neutro sia esattamente a metà spessore della lamiera, preso l'angolo in radianti, lo sviluppo risulta:

$$L = l_1 + l_2 + \alpha \left(R_i + \frac{t}{2} \right)$$

Dove α è l'angolo acuto compreso tra le due sezioni di lamiera in cui supponiamo non avere distensione delle fibre.

NOTABENE PER ESAME!!!!!!!

Il raggio interno inoltre è vincolato tra un massimo e un minimo valore. Questo raggio infatti è il raggio di piegatura e deve essere compreso tra un raggio massimo, al di sopra del quale la lamiera non plasticizza e quindi non mantiene la piegatura e un raggio minimo, sotto il quale la lamiera incorre a rottura.

FINE NOTABENE PER ESAME!!!!!!!

Per determinare la larghezza del nastro o la dimensione trasversale della lamiera di partenza, è necessario conoscere lo sviluppo in piano che il pezzo ha subito per raggiungere la forma deformata. Supponendo che l'asse neutro sia esattamente a metà spessore:

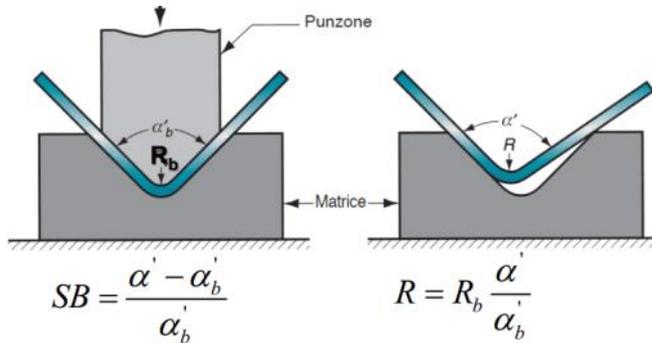
$$L = l_1 + l_2 + \alpha \left(R_i + \frac{t}{2} \right)$$

In realtà dobbiamo considerare anche quello che è l'allungamento della lamiera durante la piegatura, quindi si introduce un margine di allungamento:

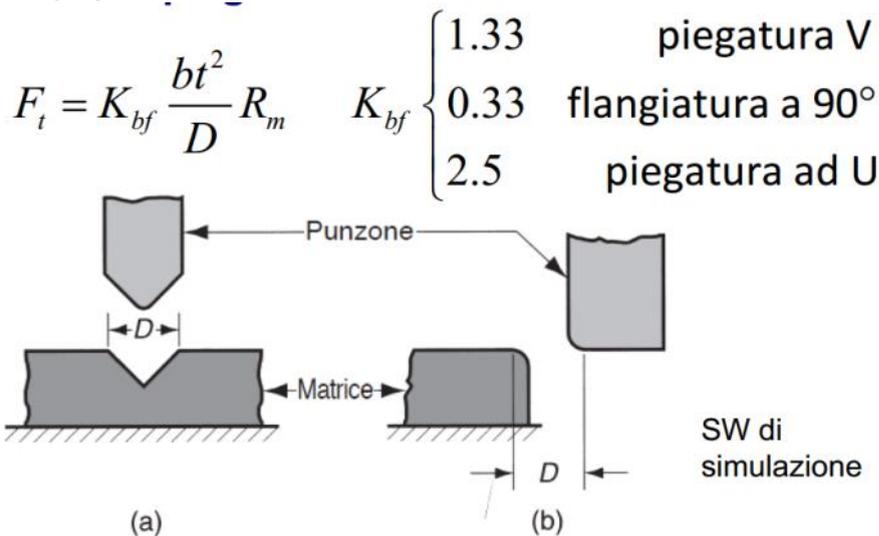
$$L = l_1 + l_2 + A_b \quad \text{con } A_b = \alpha(R_i + K_{ba}t) \quad K_{ba} = \begin{cases} 0.33 & R_i < 2t \\ 0.50 & R_i \geq 2t \end{cases}$$

Ritorno elastico

Nella pratica va anche considerato, progettando la matrice di piegatura, quello che è il ritorno elastico del materiale, ovvero che il materiale non sia completamente plasticizzato sull'angolo finale di piegatura, quindi tenda leggermente alla sua posizione indeformata. Per farlo quindi si riduce l'angolo della matrice del fattore SB oppure si può anche aumentare la pressione di contatto tra la lamiera e il punzone.

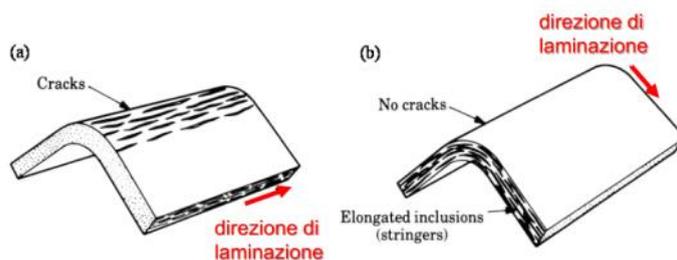


La forza di piegatura

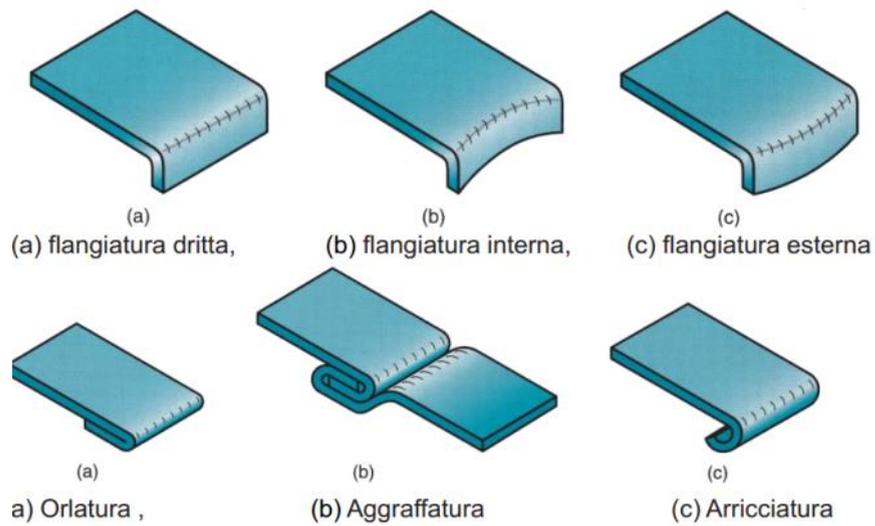


Difetti di piegatura

Come per tutte le lavorazioni plastiche, il principale difetto in cui si può incorrere è la formazione delle cricche, influenzate fortemente anche dalla direzione di laminazione del materiale. Infatti essendo il materiale anisotropo dopo la laminazione, tende a fratturarsi quando viene piegato lungo la direzione parallela a quella di laminazione, poiché la resistenza trasversale del materiale è ridotta.



Altre operazioni di piegatura



Attrezzi per presse piegatrici

La combinazione di varie matrici e punzoni, permette di ottenere la geometria desiderata evitando che nell'operazione si incorra in sottosquadri, quindi che il punzone non possa accedere alla zona di piegatura o che il pezzo, dopo la piegatura, si incastri sul punzone.

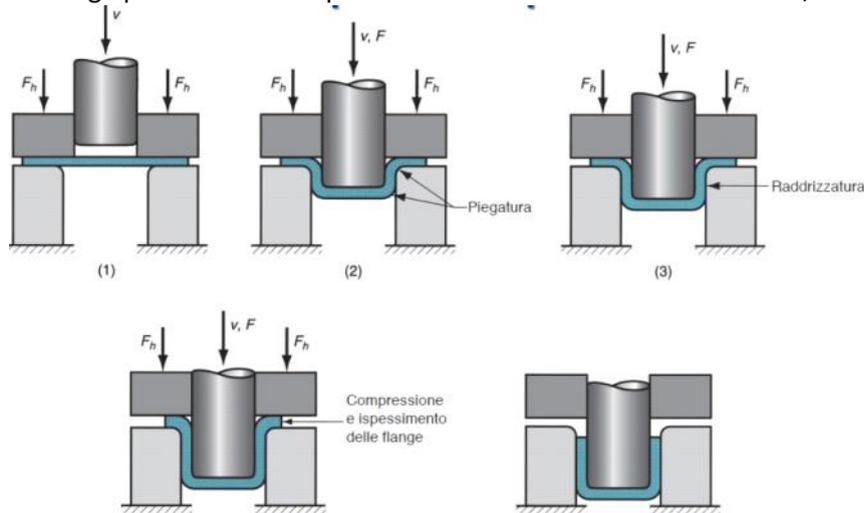
4.4.2 - Lavorazioni della lamiera

Imbutitura

Il processo di imbutitura è effettuato da una macchina che dispone, oltre che della matrice e del punzone, di un prelamiera. Questa configurazione è simile a quella di trancitura fine, ma in questo caso il prelamiera è liscio e serve per evitare la formazione di grinze sulla superficie della lamiera.

Le fasi del processo sono:

1. Si colloca la lamiera e si fa scendere il prelamiera su di essa in modo da fissarlo.
2. Nel prelamiera viene calato il punzone, che inizia a spingere la lamiera all'interno della matrice.
3. Si ha una prima fase di piegatura, come in trancitura, dove il materiale si arrotonda attorno all'angolo della matrice e al piede del punzone.
4. Con l'avanzare del punzone il materiale si schiaccia contro le pareti e si raddrizzano.
5. Le flange tendono a ispessirsi per la costanza del volume
6. Le flange possono essere spinte anch'esse all'interno della matrice, completando l'imbutitura.



Parametri del processo

	<ul style="list-style-type: none"> - F_h forza del prelamiera - v velocità del punzone - F forza del punzone - g gioco, deve essere solitamente maggiore dello spessore della lamiera - D_p diametro del punzone e diametro medio del pezzo lavorato - R_p raggio di curvatura del piede del punzone - R_d raggio di curvatura della spalla della matrice - D_b diametro del disco iniziale
--	---

Determinazione del gioco

Lo spessore della lamiera non resta costante durante il processo, infatti, sebbene il volume si conservi, l'imbutitura causa degli stati tensionali e di compressione nel materiale che lo portano a deformarsi senza mantenere uniforme il volume lungo tutto il pezzo. In particolare abbiamo due regole empiriche ed in particolare ci dicono che il gioco deve essere comunque maggiore dello spessore della lamiera.

$$g = 1.1t$$

$$g = t + C\sqrt{t} \text{ con } C = \begin{cases} 0.22 \text{ per acciai} \\ 0.06 \text{ per leghe di alluminio} \\ 0.12 \text{ per metalli non ferrosi} \end{cases}$$

Forma e dimensione del disco primitivo

NOTABENE PER ESAME!!!!

Gli imbutiti possono essere di due tipologie, cilindrici assialsimmetrici, per i quali possiamo determinare la forma e le dimensioni del disco primitivo esplicitando quale dovrà essere il diametro del disco stesso, mentre per imbutiti non simmetrici, dobbiamo calcolare graficamente il profilo che dovrà avere il tranciato, avvalendoci anche di software dove necessario.

$$D = \sqrt{d^2 + 4dh}$$

$$\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \pi dh$$

$$\frac{\pi}{4}(D-d)(D+d) = \pi dh$$

$$\frac{1}{4}2h_0 * 2(d + h_0) = dh$$

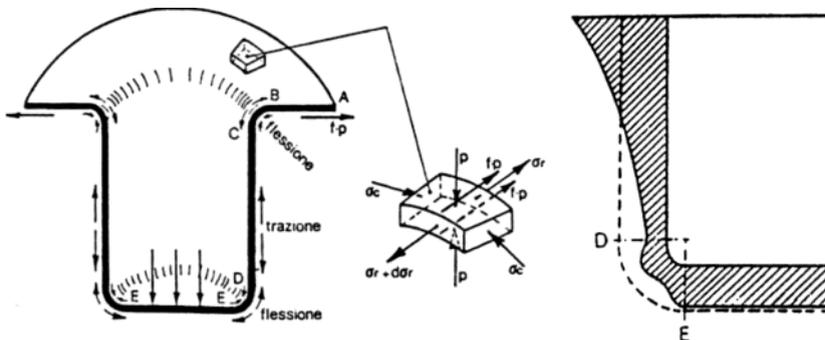
$$h = h_0 \left(1 + \frac{h_0}{d} \right)$$

Stato tensionale:

- Trazione radiale
- Compressione tangenziale

$$\varepsilon = \ln \frac{h}{h_0}$$

A causa della deformazione imposta, l'imbutitura comporta un particolare stato di sollecitazione del materiale di partenza, infatti abbiamo che il materiale è in piegatura lungo la spalla della matrice e lungo il piede del punzone, mentre è in trazione lungo il tratto verticale della matrice, inoltre la forza imposta dal prelamiera impone che gli sforzi restino planari. Questi effetti fanno sì che ci sia uno stato misto di tensione, infatti se prendessimo un concio infinitesimo e lo muovessimo lungo il materiale, noteremmo che lo stato tensionale è di compressione lungo la direzione tangenziale, mentre è di trazione lungo quello radiale. Infatti il disco viene spinto verso il fondo della matrice, ma le pareti della matrice stessa lo comprimono. Questo stato tensionale misto è quello che causa la variazione punto a punto dello spessore della lamiera.



Quindi la funzione del prelamiera risulta essere quella di evitare che la lamiera formi delle grinze. Tuttavia questo non è sempre possibile, infatti sebbene la pressione del prelamiera non deve essere troppo bassa, altrimenti si formerebbero le grinze, un'eccessiva pressione potrebbe portare la lamiera oltre il tratto plastico e a rottura.

FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

Raggi di raccordo

Anche questo parametro progettuale va dimensionato correttamente sia per il punzone che per la matrice, inoltre bisogna tener conto anche del numero di imbutiture già subite dal semilavorato. Un raggio di raccordo troppo piccolo infatti può portare la lamiera a spezzarsi all'altezza del raccordo stesso.

Per dimensionare i raggi abbiamo delle regole empiriche. Nel caso di prima imbutitura:

$$R_d = 4t$$

$$R_p = (5 \div 6)t$$

Nel caso invece di imbutiture successive:

$$R_d = (3 \div 4)t$$

$$R_p = (5 \div 6)t \geq R_d$$

Forze di imbutitura

Nel caso più generale, le forze nelle operazioni di imbutitura dipendono dal tipo di materiale, dalla geometria dello stampo, dalla velocità con cui si muove il punzone, dalla lubrificazione e infine dalla grandezza detta rapporto di imbutitura, ovvero il rapporto tra il diametro del cerchio primitivo e quello del punzone.

In particolare, detti:

- Diametro primitivo D
- Diametro esterno del cerchio tenuto dal premilamiera D_b
- Diametro del punzone D_p
- Raggio di raccordo della matrice R_d
- Carico di rottura R_m
- Carico di snervamento R_s

La forza massima applicata dal punzone si calcola come:

$$F = \pi D_p t R_m \left(\frac{D}{D_p} - 0.7 \right)$$

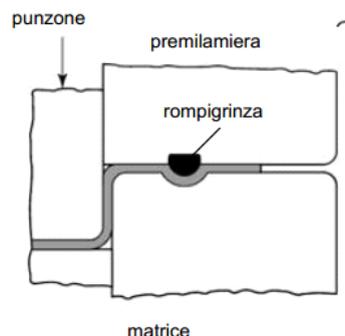
Mentre la forza massima applicata dal premilamiera:

$$F_h = 0.015 R_s \pi \left[D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2 \right]$$

Come vediamo la forza del premilamiera non è un grandezza fissa, ma è variabile ed è direttamente proporzionale al diametro del cerchio che deve premere. Infatti esistono presse per imbutitura in cui il premilamiera è controllabile anche come profilo spaziale, ovvero possiamo ridurre la forza mano a mano che diminuisce il diametro del cerchio esterno. Inoltre esistono presse per geometrie complesse in cui il premilamiera è controllabile anche come profilo spaziale, ovvero possiamo impostare forze diverse per diverse sezioni del premilamiera, al fine di ottimizzare la qualità dell'imbutito finale.

Il rompigrinza

Per forme più complesse, sul premilamiera possiamo trovare questa geometria raccordata che serve, come dice il nome, a rompere le grinze che si formano sul pezzo. Queste funzionano frenando il materiale dove tenderebbe ad avere un flusso più rapido, uniformando il flusso stesso e riducendo la presenza di difetti.



Anisotropia

Il processo di laminazione, come avevamo già detto, spesso ha come conseguenza quella di rendere anisotropo il materiale.

Definiamo anisotropia normale la quantità:

$$r_\alpha = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_t}$$

Dove ϵ_b e ϵ_t sono rispettivamente la deformazione trasversale e nello spessore di un provino di trazione valutate a carico massimo, ovvero quando il materiale è instabile ma non si è arrivati a rottura. Per un materiale isotropo si ha:

$$r_\alpha = 1$$

Il pedice di r è un angolo, infatti il valore dell'anisotropia dipende anche dall'angolo tra l'asse della provetta e la direzione di laminazione. Convenzionalmente si misura l'anisotropia lungo tre piani, uno inclinato di 0° , uno di 45° e l'ultimo di 90°

In particolare abbiamo:

- Perfettamente isotropo: $r_0 = r_{45} = r_{90} = 1$
- Anisotropia normale, ovvero anisotropo solo nello spessore $r_0 = r_{45} = r_{90} \neq 1$
- Anisotropia planare $r_0 \neq r_{45} \neq r_{90}$

Una misura sintetica dell'anisotropia viene fatta attraverso due quantità, ottenute per interpolazione delle 3 anisotropie normali.

Il coefficiente medio di anisotropia normale:

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \geq 0$$

Il coefficiente medio di anisotropia planare:

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90}}{2} - r_{45}$$

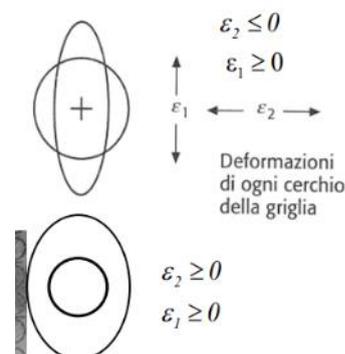
Se $r_m = 1$ e $\Delta r = 0$ allora si dice che il materiale è perfettamente isotropo nel piano e nello spessore.

l'anisotropia normale nell'imbutitura è positiva, infatti contrasta l'assottigliamento e dunque ritarda la frattura dovuta alla strizione, mentre quella planare può portare, nel processo di imbutitura, ad una differente deformazione in funzione della direzione, quindi al formarsi di orecchie.

Curva limite

Per determinare la massima deformazione possibile si può utilizzare la viseoplasticità, ovvero sulla lamiera piana viene tracciato un pattern di cerchi e si osserva la deformazione subita dal cerchio dopo l'imbutitura. In generale questo degenera in un'ellisse, quindi quando succede, se mantiene gli assi ortogonali tra di loro, possiamo misurare gli assi e quindi conoscere la deformazione subita e in che direzione questa è avvenuta. Quindi possiamo quantificare la deformazione, conoscere il tipo di sforzo e deciderne la direzione. In rari casi tuttavia le deformazioni potrebbero essere entrambe causati da sforzi di trazione, quindi l'ellisse si allarga lungo entrambe le direzioni e si parla di stretching biassiale. Raramente questa condizione di sforzo conserva la forma circolare del pattern, quindi gli sforzi erano uguali in ambo le direzioni.

Per un processo sano, ovvero che non presenti difetti, vogliamo che almeno uno degli sforzi sia di trazione, infatti potremmo avere non solo uno stretching biassiale, ma anche una compressione biassiale.

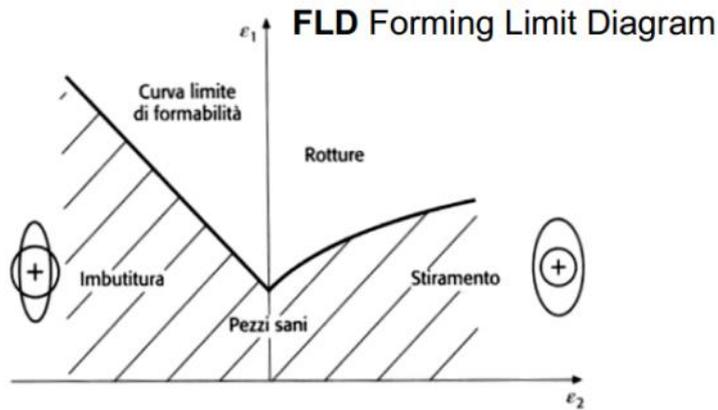


A partire dall'analisi di viseoplasticità possiamo creare un grafico ϵ_1 ϵ_2 in cui è possibile identificare una curva limite, che separa la zona di formabilità da quella dei pezzi difettosi.

NOTABENE PER ESAME!!!!

Questo grafico serve nelle applicazioni su software ai volumi finiti, infatti ci dice quando il materiale raggiunge il limite di sforzo senza dover fare prove sperimentali.

Tuttavia, il Forming Limit Diagram rappresenta una approssimazione, infatti sarebbe più corretto identificare una banda come limite di formabilità



L'FLD è un diagramma concettualmente simile al diagramma di Caine, entrambi infatti indicano delle zone in cui ci interessa lavorare per ottenere pezzi che non siano sfridi ma velocemente.

FINE NOTABENE PER ESAME!!!!

Difetti di imbutitura

- Formazione di grinze sulla flangia, causate da una forza del premilamiera insufficiente
- Grinze sulle pareti, quando le grinze sulla flangia erano così marcate da non essere state stirate né dal premilamiera né dalla pressione tra il punzone e la matrice
- Fratture sul bordo inferiore o superiore causate dal raggio di raccordo del punzone o della matrice
- Irregolarità sul bordo causate dall'anisotropia planare
- Graffi superficiali causate dalla poca lubrificazione o dalla matrice rovinata
- Presenza di grinze, avvallamenti o graffi microscopici, che non sono visibili a occhio nudo ma solo sotto particolari condizioni di luminosità. Questo difetto è di tipo estetico ed è un grande problema (principalmente nel mondo dell'automotive) perché è difficile da rilevare e correggere.

Rapporti di imbutitura

I rapporti di imbutitura sono 2, il rapporto spessore diametro (del disco primitivo) che ci indica il limite di fattibilità dell'imbutitura per evitare la formazione di grinze:

$$\frac{t}{D} \geq 0.01$$

Mentre il Drawing Ratio ci indica se l'operazione è eseguibile in un solo passaggio o ne servono di più. (ogni azienda ha il suo LDR, Limiting Drawing Ratio, quello indicato è un buon valore limite)

$$DR = \frac{D}{D_p} \leq 2$$

È importante notare come maggiore sia il diametro del disco primitivo, più in profondità possiamo imbutire.

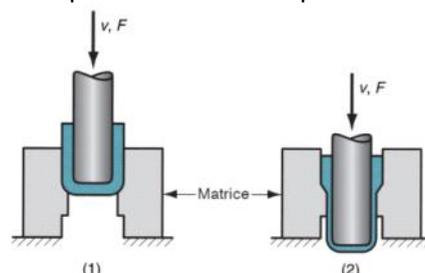
Imbutitura a più passaggi

Come abbiamo detto serve quando il pezzo non è ottenibile attraverso una singola imbutitura. Questo processo semplicemente si compone di passate intermedie attraverso cui il semilavorato viene portato verso la forma finale. Tra una passata e l'altra potrebbe essere tuttavia necessario un trattamento termico, la ricottura, per evitare che il materiale incrudito si fratturi nelle passate successive.

Altre operazioni di lavorazione della lamiera

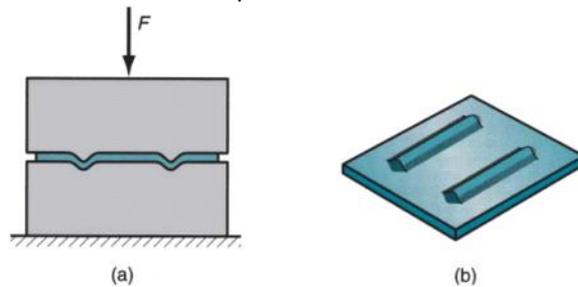
Imbutitura più trafilatura

Serve a ridurre e calibrare lo spessore durante l'operazione di imbutitura



Coniatura

La coniatura, operazione in cui si portano delle nervature in rilievo sulla lamiera, è un'operazione particolare, infatti sebbene sia un processo su una lamiera condivide con le lavorazioni massive lo stato di sforzo risultante dal processo, infatti abbiamo che questo è principalmente di compressione, mentre nelle lavorazioni su lamiera è tipicamente di trazione.

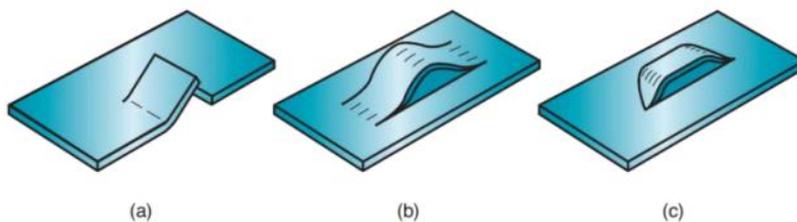


Incisione

L'incisione di una lamiera è un'altra operazione che si può compiere, questa non è sempre un'operazione pensata ai fini estetici o pratici del pezzo, ma può essere un'operazione figlia di scelte tecnologiche, infatti serve, ad esempio, ad attenuare lo stato di tensione del pezzo.

In questa lavorazione possiamo riconoscere l'unione di altri processi, ad esempio:

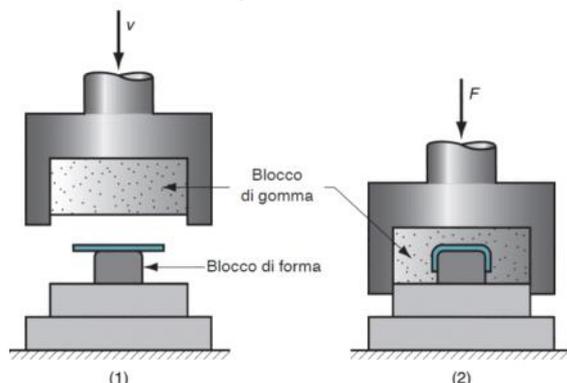
- Taglio e piegatura
- Piegatura e tranciatura
- Imbutitura e tranciatura



Processo Guerin

Questo tipo di processo è apprezzato nelle aziende aerospaziali e più in generale per la produzione di piccole serie di lavorati, che non giustificerebbero il costo di uno stampo in acciaio. Infatti in questo processo lo stampo è in gomma poliuretanica, quindi non ha una forma definita, ma la forma al pezzo finito viene data dal blocco su cui è appoggiata la lamiera. I blocchi di forma inoltre sono modulari, quindi possono essere assemblati per ottenere geometrie diverse, rendendo il processo molto flessibile. Si ha anche un vantaggio dal punto di vista estetico, infatti la gomma non crea graffi superficiali.

Ovviamente i tempi di processo e la versatilità dello stesso sono giustificati solo per le piccole serie di pezzi, infatti per grandi serie sarebbe inutile non avere uno stampo di acciaio, quindi molto più resistente e veloce, che uno in gomma.

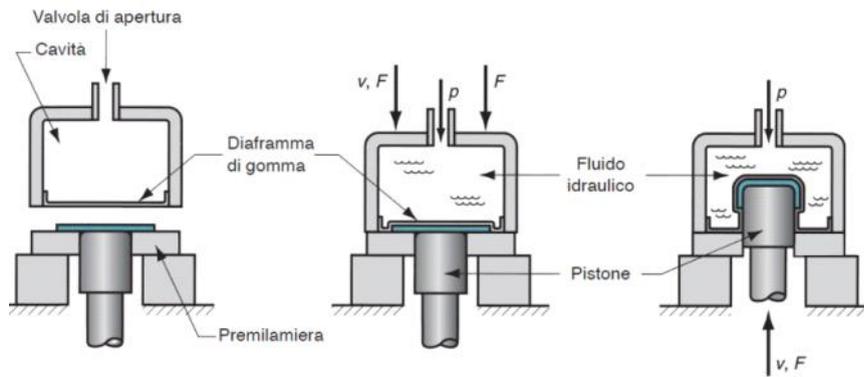


Idroformatura o Flexforming

Nel processo di flexforming si ha una matrice general part (ossia una matrice non con una forma definita) posta nella parte superiore della macchina, in cui una membrana in gomma sigilla una sacca di fluido idraulico pressurizzato. Il pistone, salendo, spinge la lamiera contro la membrana formandola.

Anche in questo processo i vantaggi sono simili al processo Guerin, infatti la membrana in gomma non graffia il laminato e il processo è molto versatile. Un secondo grande vantaggio è la pressione del fluido regolabile, permettendoci di scegliere che pressione far applicare dalla membrana sulla

lamiera.



Operazioni di deformazione della lamiera non eseguite con le presse

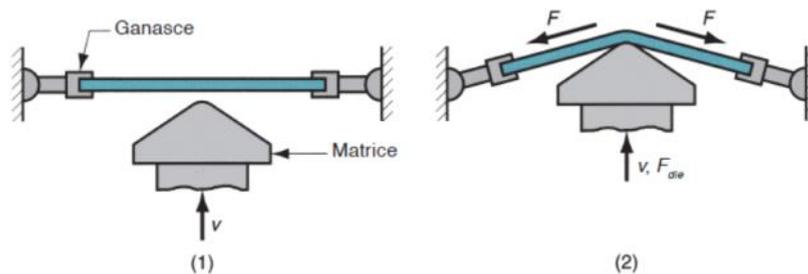
Piegatura per stiramento

Altro processo apprezzato nel settore aerospaziale perché richiede poche attrezzature:

- una matrice sagomata, che viene spinta contro il pezzo,
- due ganasce che mettono in trazione la lamiera, mentendola in trazione anche sul ginocchio della matrice.

L'obiettivo dello stiramento è quello di sovrapporre uno strato tensionale che aumenti la plasticizzazione del materiale, riducendo il ritorno elastico.

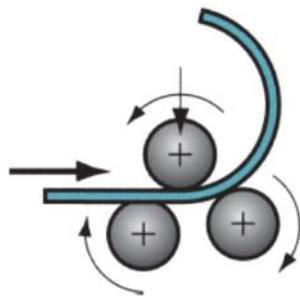
Per raggi di curvatura molto ampi o per pezzi di grandi dimensioni, diventa la soluzione più semplicemente abbordabile.



Calandratura

La calandratura avviene tra tre rulli: quelli inferiori sono motorizzati e trascinano avanti la lamiera, quello superiore (folle e registrabile in altezza) impone la deformazione alla lamiera.

Gli assi dei rulli possono essere sghembi per ottenere una conicità.

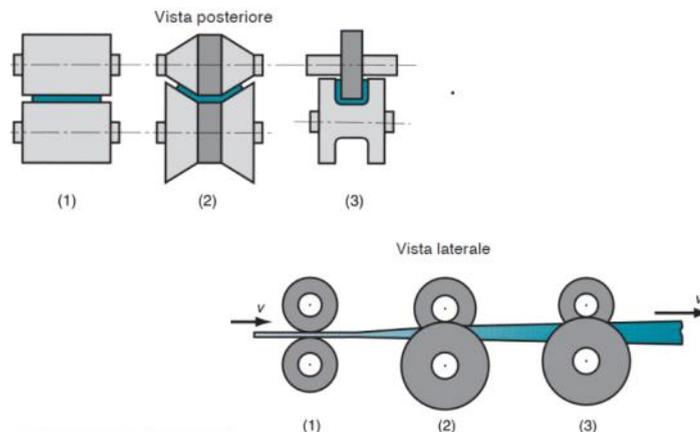


Un esempio di utilizzo della calandratura nella produzione di serbatoi per liquidi:



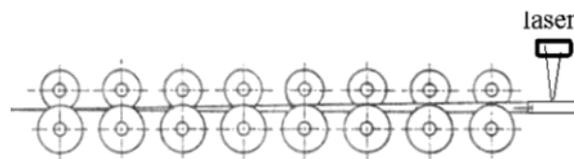
Formatura progressiva a rulli

È un processo di laminazione, implementato e eseguito con una coppia di cilindri controrotanti. L'obiettivo del processo non è quello di ridurre lo spessore della lamiera ma di piegare la lamiera dandole una forma predefinita. Il nastro piano viene fatto passare attraverso delle gabbie successive di cilindri che ne eseguono la piegatura in più stadi per rispettare il vincolo tecnologico del raggio minimo di piegatura.



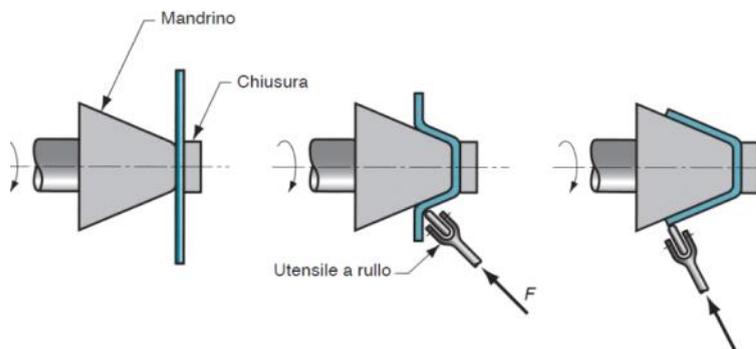
La piegatura assiale dei nastri può essere effettuata mediante linee di produzione dedicate. Si parla allora di "profilatura" del nastro.

In alcuni casi si arriva a realizzare un perimetro chiuso, che viene poi saldato (per esempio mediante laser se con piccolo spessore di parete). E' una delle modalità con cui vengono prodotti i tubi o i profilati in acciaio.



Imbutitura al tornio

È un processo non a spessore costante in cui la lamiera viene piegata sul mandrino, che funge da matrice, mediante un utensile a rullo. In questo processo abbiamo una buona finitura superficiale, soprattutto per quando riguarda l'estetica, infatti il rullo normalmente è in materiale polimerico e non graffia la lamiera.



Processo produttivo di una lattina

