



*centroappunti.it*

**CORSO LUIGI EINAUDI, 55/B - TORINO**

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

**NUMERO: 2508A**

**ANNO: 2021**

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

**STUDENTE: Palma Carlo**

**MATERIA: Sistemi di Produzione - Appunti Completi - Prof. Mastrogiacomo**

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

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

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

## SISTEMI DI PRODUZIONE – APPUNTI – LEZIONE A

### Il Processo produttivo

Il processo produttivo industriale è l'insieme delle attività tecnologiche e organizzative necessarie per trasformare materiali in prodotti o beni economici. Le operazioni di trasformazione all'interno del sistema produttivo richiedono scambi energetici e realizzano cambiamenti delle caratteristiche fisiche, chimiche, meccaniche e morfologiche dei materiali in ingresso.

Da un punto di vista logico il sistema produttivo può essere orientato o al prodotto o al processo: nel primo caso la produzione è fortemente influenzata dalle caratteristiche del singolo prodotto o dalle famiglie di prodotti; nel secondo caso sono le operazioni che l'azienda può svolgere a influenzare il processo (i macchinari sono general purpose e sono raggruppati per compiti funzionali).

La produzione può avvenire:

- Su commessa: produzione di beni richiesti specificatamente dal cliente.
- A magazzino: produzione di beni sulla base di analisi di mercato e previsioni di vendita.
- Continua: produzione di grandi quantità (serie) di un prodotto con limitate variazioni nei modelli.
- Per lotti: prodotto fabbricato in quantità variabili, alternativamente ad altri, su impianti o macchine flessibili.
- Unitaria: piccole quantità di prodotti molto specializzati (industria aeronautica, delle macchine utensili).

La produzione è la funzione caratterizzante l'azienda. Lo sviluppo di un'azienda non può prescindere da una continua innovazione. L'innovazione di processo è condizionata da fattori economici, ambientali, sociali e tecnologici.

Fino agli anni '70 la produzione era di massa e il mercato insaturo e monopolistico.

In seguito la globalizzazione ha portato: qualità, diversificazione del prodotto, riduzione dei tempi di immissione nel mercato e riduzione del tempo di vita dei prodotti.

Tutte queste novità hanno provocato profondi cambiamenti del mercato, principalmente un calo enorme della domanda e la comparsa di nuove aziende che hanno portato grande competitività.

Le aziende hanno risposto a questi cambiamenti con: ridefinizione delle strategie di competizione e produzione, applicazione di concetti innovativi nella progettazione e nella produzione e flessibilità (ovvero adattarsi il più velocemente possibile a variazioni della domanda e delle caratteristiche dei prodotti).

Esistono principalmente quattro fattori competitivi: qualità, innovazione, servizio e costi.

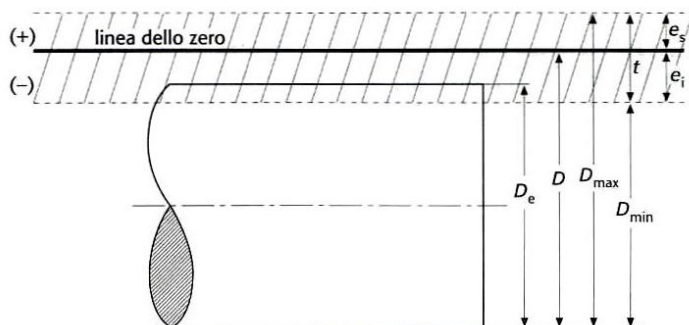
Ciclo vita di un prodotto: commessa del cliente → avan-progetto, studi di fattibilità, process planning, production planning → attività di processo, controllo della produzione → distribuzione del prodotto, assistenza clienti, riciclaggio dei materiali.

### Le tolleranze dimensionali.

*Albero*: lunghezza di un tratto pieno anche non cilindrico.

*Foro*: lunghezza di un tratto cavo anche non cilindrico.

**Concetto di tolleranza**: un prodotto conforme a specifiche non può indicare solo la lunghezza o più specificatamente non può indicare la sola "dimensione nominale". Per essere conforme a specifiche deve anche indicare una "tolleranza" ovvero un intervallo per cui se il prodotto rientra all'interno di tale intervallo è conforme alle specifiche.



**Fig. 2-9** Definizione grafica del «campo di tolleranza», riferita a un albero.  
 $D$  = dimensione nominale;  
 $D_e$  = dimensione effettiva;  
 $D_{max}$  = dimensione limite superiore;  
 $D_{min}$  = dimensione limite inferiore,  
 $t$  = tolleranza o «campo di tolleranza»;  
 $e_s$  = scostamento superiore;  
 $e_i$  = scostamento inferiore.

La tolleranza può essere unilaterale (ovvero quando il foro o l'albero hanno una dimensione effettiva o soltanto al di sopra o soltanto al di sotto della dimensione nominale) oppure bilaterale (cioè quando la dimensione effettiva supera sia al di sopra che al di sotto la dimensione nominale).

**Gli accoppiamenti alberi-fori**: se accoppio un foro più grande dell'albero si dice che l'accoppiamento ha creato "gioco". Se accoppio un foro più piccolo dell'albero si crea "interferenza". Sarà comunque possibile, entro certi limiti, fare entrare l'albero nel foro senza però che esso si muova. Nel caso in cui non si è sicuri che si possa creare o meno un'interferenza si parla di "accoppiamento incerto".

Il sistema ISO prevede 19 qualità di tolleranze fondamentali (per dimensioni da 1 a 500 mm): IT 01, IT 0, IT 1 ... IT 17; più il numero di IT è basso, più la qualità è alta. Infatti le qualità IT 01, IT 0, IT 1 fino a IT 4 per gli alberi, fino a IT 5 per i fori vengono utilizzate per strumenti e apparecchiature di controllo e macchine di alta e altissima precisione. Le qualità IT 5 per gli alberi, IT 6 per i fori fino a IT 11 sono, invece, impiegate per costruzioni meccaniche comuni. Le qualità da IT 12 fino a IT 17 sono usate per lavorazioni grossolane o per elementi non destinati all'accoppiamento.

Per ogni qualità di lavorazione da 5 a 17, i valori delle tolleranze fondamentali IT sono espressi in multipli interi dell'unità di tolleranza  $i$ , che si calcola:

$$i = 0,45 \cdot \sqrt[3]{D} + 0,001 \cdot D \text{ } \mu\text{m}$$

dove  $D$  è la dimensione nominale in mm e il termine  $0,001 \cdot D$  tiene conto delle incertezze di misura. Per le qualità 01, 0, 1 i valori delle tolleranze fondamentali IT sono forniti in funzione di  $D$ .

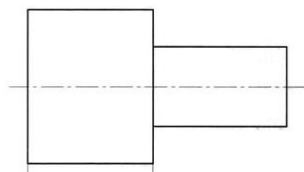


fig. - albero

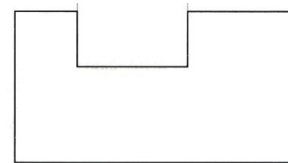


fig. - foro

Tipologie di superfici: ideale, reale, misurata, di riferimento, media. Le irregolarità superficiali possono avere un orientamento e/o un passo, e sono classificate in errori di forma (marcogeometrici) o errori microgeometrici: rugosità e ondulazioni. La superficie nominale o "linea media" di riferimento per il calcolo della rugosità si ottiene sul profilo misurato con un metodo di approssimazione (metodo minimi quadrati).

### Analisi e sintesi delle tolleranze.

- L'approccio worst case:  $t_r = \sum t_i$ .
- L'approccio statistico:  $t_r = \sqrt{\sum t_i^2}$ .

**I materiali** possono essere: metallici, polimerici (plastiche) e di natura inorganica (ceramiche). I materiali hanno una struttura atomica: le caratteristiche fisiche e chimiche di un atomo dipendono dal numero e dalla disposizione orbitale degli elettroni di valenza; un atomo da cui è stato rimosso un elettrone è denominato ione. I legami tra atomi possono essere primari o secondari a seconda della forza di interazione tra gli atomi; tra i legami primari troviamo il legame ionico, il legame covalente e il legame metallico. Tra i secondari abbiamo forze di dipolo, forze di van der Waals, forze di London e legami a idrogeno.

### Il legame metallico:

- uno o più elettroni si allontanano dall'atomo originario e vengono condivisi tra più atomi vicini creando un numero elevato di ioni positivi immersi in una nuvola di cariche negative;
- gli elettroni costituiscono cariche vaganti negative che si insinuano nello spazio tra gli ioni positivi;
- la coesione è stabilita dalle forze di attrazione tra la nuvola elettronica e gli ioni;
- se gli ioni si allontanano tra loro, la nuvola elettronica tende a fissarli in equilibrio stabile, secondo distanze ben definite.

**Il reticolo cristallino.** La struttura è composta da un elevato numero di ioni metallici distribuiti nello spazio a formare il reticolo cristallino; la più piccola porzione di volume che ripetuta riempie completamente il reticolo, è denominata cella unitaria o elementare.

La forma della cella elementare può essere:

1. Cubica a corpo centrato (CCC): ferro- $\alpha$  (forma allotropica stabile fino a 770°C), vanadio (V), molibdeno (Mo), tungsteno (W), cromo (Cr).

- Lega bifasica (o multifasica): La maggior parte delle leghe consistono di due o più fasi solide. Un sistema a due fasi solide è detto sistema a due fasi in cui ogni fase è parte omogenea della massa totale e possiede caratteristiche proprie.
- Composto intermetallico: Soluzione solida di due metalli aventi caratteristiche vicine a quelle di un composto chimico ma che spesso non rispetta la regola ordinaria delle valenze.

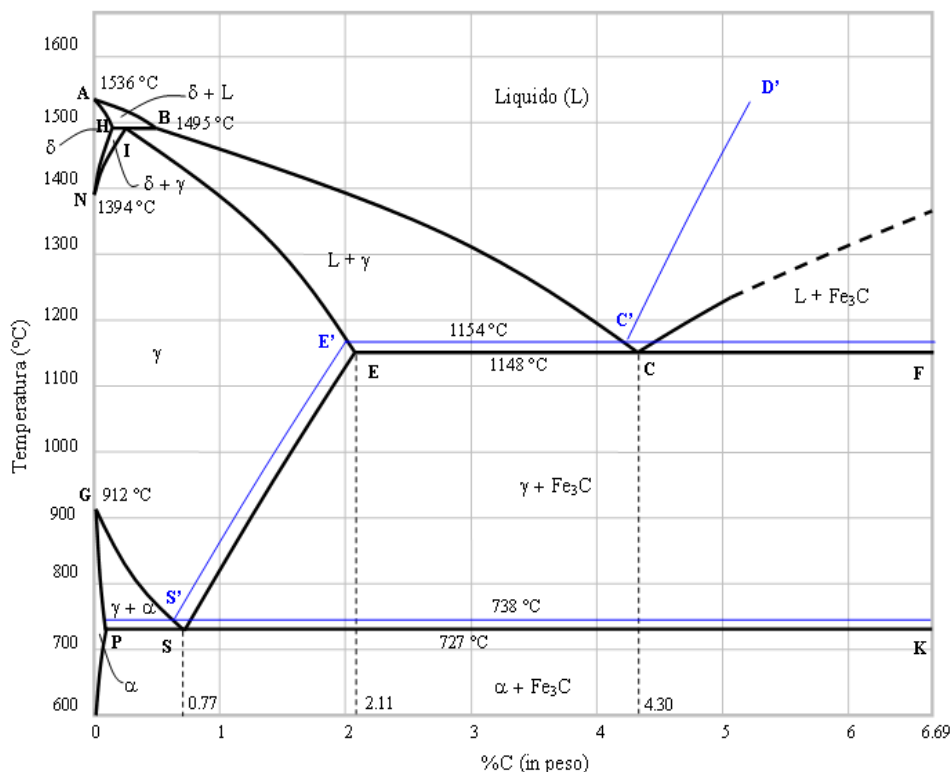


Diagramma ferro-carbonio.

### Le leghe ferro-carbonio:

Il ferro puro non ha interesse industriale in quanto non trova applicazioni ingegneristiche, ma il suo interesse pratico aumenta considerevolmente quando è in lega con il carbonio. In generale in natura il ferro si trova difficilmente allo stato puro: esso, quasi sempre, è legato al carbonio, silicio, manganese, nichel, cromo.

A seconda della quantità di carbonio presente nel ferro si formano leghe che prendono diversi nomi e hanno diverse caratteristiche. Le due grandi categorie delle leghe ferro-carbonio sono le "ghise" e gli "acciai". L'acciaio è una lega di ferro contenente carbonio in percentuale non superiore al 2,11%. Oltre tale limite le proprietà del materiale cambiano e la lega assume la denominazione di ghisa (fino al 6.67% di C). Oltre al carbonio possono essere presenti degli ulteriori elementi alliganti (acciai legati, nichel, cromo, molibdeno).

- Ferrite (alfa): è una soluzione solida di ferro cubico a corpo centrato (BCC) e ha un massimo di solubilità del 0,022% di carbonio alla temperatura di 727°C.
- Austenite: tra i 912 e 1394°C il ferro subisce una trasformazione allotropica da struttura BCC a struttura FCC (cubica a facce centrate) diventando ferro gamma o austenite. Solubilità fino a 2,11% di carbonio a 1148°C; è duttile ed ha ottime proprietà di formabilità.

- 6. La normalizzazione:** rende omogenea la struttura dell'acciaio eliminando le tensioni interne. Ad un riscaldamento a temperature di tempra è seguito un raffreddamento in aria per attenuare la durezza eccessiva dopo il primo trattamento.

**Trattamenti superficiali:** cambiano solo le proprietà della superficie del pezzo con lo scopo di aumentare la resistenza alla corrosione. Un esempio è l'ossidazione con mezzi chimici o mediante riscaldamento ad elevata temperatura della superficie del pezzo. Un altro metodo è l'anodizzazione dell'alluminio: è un processo elettrochimico in cui si ossida, in maniera controllata, la superficie dell'alluminio per immersione in soluzione acquosa e si collega un generatore di tensione all'anodo.

**I materiali plastici o materiali polimerici.** Pastiche, dalla parola greca plastikos, significa "che possono essere modellate". Lo sviluppo della moderna tecnologia delle materie plastiche iniziò negli anni '20 del secolo scorso quando si cominciarono ad estrarre dal carbone e dal petrolio le materie prime necessarie per produrre i polimeri.

Caratteristiche principali dei materiali plastici: elevato rapporto resistenza/massa, basso costo, bassa conducibilità elettrica, alta resistenza agli agenti chimici, elevato coefficiente di dilatazione termica, elevata versatilità di impiego, facilità di lavorazione.

Il monomero costituisce l'elemento costruttivo di base dei polimeri. I polimeri sono quindi molecole a catena lunga, dette anche macromolecole o molecole giganti. La classificazione dei polimeri può avvenire in base alla costituzione: omopolimeri (A-A-A, la lettera indica l'elemento) e copolimeri (alternati A-B-A-B, a blocchi A-A-B-B); o in base alla struttura: lineari, ramificati, reticolati; anche in base alle proprietà: termoplastici, termoindurenti, elastomeri.

- Polimeri termoplastici: ottenuti per processo di calore; si possono modellare più volte.
- Polimeri termoindurenti: il materiale base è allo stato liquido e dopo la modellizzazione non si può più rimodellare. La modellazione avviene per "reticolazione": l'aumento della temperatura è limitato per fare sì che i legami deboli vengano intaccati e quelli forti rimangano saldi. È proprio quest'ultimo il motivo per cui non si possono rimodellare in seguito: portandoli ad alte temperature le caratteristiche fisiche dei polimeri verrebbero alterate irreversibilmente.
- Polimeri elastomeri (gomme): comportamento elastico ovvero ritornano alla loro forma e dimensione originale dopo essere state deformate. La più importante e più diffusa categoria di elastomeri sono i "siliconi".

Tutti i materiali plastici si formano a seguito di un processo di vulcanizzazione; durante questo processo lo zolfo crea un legame di saldatura forte fra le macromolecole della gomma naturale. Generalmente tutti i materiali plastici seguono le leggi della viscoelasticità e si collocano a metà strada fra i solidi elastici e i liquidi viscosi.

In un corpo di materiale plastico le macromolecole si dispongono parallelamente a sé stesse e formano una struttura molto simile alla "struttura cristallina" dei metalli. Nella realtà però i materiali polimerici non presentano quasi mai una struttura cristallina completa ma strutture semicristalline oppure totalmente disordinate (strutture amorfe). I polimeri semicristallini sono generalmente plastiche rigide; le catene di polimero, ripiegandosi, riescono a disporsi regolarmente

### La metrologia industriale.

Misura: entità matematica composta da valore (spesso indicato con  $V$ ), incertezza (spesso indicata con  $U$ ) e unità di misura  $\rightarrow (V \pm U)$  [unità di misura].

Misurazione: azione che produce una misura.

Misurando: grandezza misurata (es. lunghezza).

Oggetto misurato: oggetto sottoposto a misurazione (es. tavolo).

Ogni misura può essere affetta da un'incertezza di misura e può contenere uno o più errori.

### Proprietà degli strumenti di misura.

- Sensibilità: capacità di uno strumento di rilevare anche le minime variazioni della grandezza misurata. Sensibilità assoluta:

$$S_{ass} = \frac{dU}{dE}$$

dove  $dU$  è la variazione dell'output dello strumento e  $dE$  è la variazione della grandezza da misurare.

- Accuratezza: è il grado di corrispondenza del dato teorico, desumibile da una serie di valori misurati (campione di dati), con il dato reale o di riferimento, ovvero la differenza tra valor medio campionario e valore vero o di riferimento.
- Ripetibilità: margine di variazione del valore ottenuto dallo strumento misurando ripetutamente la stessa grandezza nelle stesse condizioni.
- Riproducibilità: margine di variazione del valore ottenuto dallo strumento misurando ripetutamente la stessa grandezza in condizioni diverse.
- Risoluzione di lettura (e portata): il più piccolo incremento di misura leggibile sulla scala.
- Stabilità: capacità di fornire un segnale in uscita costante nel tempo quando la grandezza misurata rimane costante nel tempo.
- Prontezza: rapidità con cui lo strumento esegue la misura o rileva le variazioni della grandezza misurata.

### Misure di durezza.

Il termine durezza rappresenta la capacità di un materiale di resistere alla deformazione permanente della propria superficie. Le prove di durezza vengono eseguite mediante degli strumenti chiamati durometri che utilizzano penetratori, a forma di sfera, cono o piramide. Il penetratore, a seguito della compressione, lascia un'impronta le cui dimensioni sono inversamente proporzionali alla durezza ovvero la resistenza che il materiale oppone a lasciarsi penetrare. In realtà le prove di durezza possono essere utili anche a trovare altre caratteristiche dei materiali quali: lavorabilità, effetto di trattamenti termici, tenacità, resistenza all'abrasione o al taglio. Poiché la durezza è una grandezza che dipende sia dal tipo di durometro che dalla forza da esso esercitata, essa non è una grandezza fondamentale, ma una grandezza strumentale. Le prove di durezza si suddividono in due gruppi: prove di Macro durezza quando l'impronta impressa dal penetratore interessa un notevole volume di materiale e carichi applicati sul penetratore sono



La formula per calcolare HV è la seguente:

$$HV = \frac{2F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{g \cdot d^2}$$

**La prova Rockwell (ISO 6508):** brevettata nel 1919 da un'azienda progenitrice dell'attuale General Motors. Consiste nella penetrazione del materiale con un cono di diamante o con una sfera di acciaio temprato; inizialmente viene posto sul durometro una forza  $F_i$  iniziale e viene misurata l'impronta di questa forza. Successivamente sul penetratore viene appoggiato il carico di forza  $F$  e viene nuovamente misurata l'impronta. La durezza HR si calcola come differenza delle due impronte:

$$HR = E - e$$

Qualora venisse usato un cono di diamante, l'angolo di incidenza della piramide sulla superficie deve essere di  $120^\circ$ . L'unico sostanziale difetto di questa prova è la sua scarsa ripetibilità in quanto è molto sensibile alla durezza del supporto "provino".

**La prova Knoop:** uso di un penetratore con punta in diamante a forma di piramide allungata. Il carico varia tra  $0,25 \text{ N} \div 50 \text{ N}$ . La larghezza dell'impronta ( $L$ ) varia tra  $0,01 \div 0,10 \text{ mm}$ . La durezza HK è calcolata nel seguente modo:

$$HK = \frac{14,2 P}{L^2}$$

dove  $L$  = lunghezza dell'asse dell'impronta e  $P = \frac{F}{g}$ .

### **Prove Meccaniche Distruttive: La prova di trazione.**

La prova di trazione prevede che dei provini cilindrici o di sezione rettangolare, di dimensioni trasversali trascurabili rispetto la lunghezza, vengano sottoposti ad un carico assiale di trazione. Lo scopo di questa prova è sostanzialmente quello di risalire ad alcune caratteristiche meccaniche del materiale. La prova avviene mediante l'utilizzo di computer che, misurando tutte le componenti (forza, tensione, allungamento, sezione) per diversi punti del provino sottoposto a trazione, riescono a stampare un diagramma tensione deformazione. Si parte dal diagramma per spiegare poi il comportamento del provino durante la prova di trazione.

Il punto che separa il campo elastico da quello plastico è detto limite di snervamento; tale limite è difficile da trovare si è soliti attribuire un valore convenzionale a tale limite. Questo valore convenzionale è pari alla forza necessaria a produrre una deformazione permanente pari al 0,2% della lunghezza iniziale. La curva presenta un massimo nel punto di strizione. I materiali che hanno una notevole estensione della curva oltre il limite di snervamento sono detti duttili. I materiali che raggiungono la rottura senza deformazioni plastiche sono detti fragili.

- La duttilità è una proprietà fisica della materia che indica la capacità di un corpo o di un materiale di deformarsi plasticamente sotto carico prima di giungere a rottura, cioè la capacità di sopportare deformazioni plastiche. Un corpo è tanto più duttile quanto maggiore è la deformazione raggiunta prima della rottura.

Le deformazioni naturali o reali godono di alcune proprietà: additività e simmetria (deformazioni naturali hanno in valore assoluto lo stesso valore di trazione e di compressione. Nella tabella sotto ci sono le differenze tra le due tipologie di deformazioni.

CASO	DEFORMAZIONE NATURALE (reale)	DEFORMAZIONE NOMINALE (ingegneristiche)
ADDITIVITA': $l_0 \rightarrow l_1 + l_1 \rightarrow l_2$	$\varepsilon = \ln \frac{l_1}{l_0} + \ln \frac{l_2}{l_1} = \ln \frac{l_2}{l_0}$	$e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} + \frac{l_2 - l_1}{l_1}$ $= \frac{l_1^2 - 2l_0l_1 + l_2l_0}{l_0l_1}$
SIMMETRIA: $l_0 \rightarrow l_2$	$\varepsilon = \ln \frac{l_2}{l_0}$	$e = \frac{l_2 - l_0}{l_0}$

**Conversione delle tensioni e deformazioni da naturali a nominali.**

Tensione nominale:  $\sigma_n = \frac{F}{S_0}$ .

Dalla conservazione del volume:  $l_0 \cdot S_0 = l \cdot S \leftrightarrow ll_0 = S_0S$ .

Tensione Reale  $\rightarrow$  Tensione Nominale  $\sigma = \frac{F \cdot S_0}{S \cdot S_0} = \sigma_n \cdot \frac{S_0}{S} = \sigma_n(1 + e)$ .

Deformazione Reale  $\rightarrow$  Deformazione Nominale  $\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{S_0}{S} = \ln(1 + e)$ .

**La condizione di instabilità e il punto di strizione.** Dopo l'inizio della strizione, la forza resistente non aumenta e spesso diminuisce al procedere della prova. Nella zona di strizione si concentrano tutte le ulteriori deformazioni. L'incrudimento del materiale non compensa più la riduzione di sezione quindi la forza resistente diminuisce. Si ha l'instabilità quando la forza ( $F = \sigma \cdot S$ ) raggiunge il suo valore massimo. In particolare si annulla la derivata:  $F_{max} = \frac{dF}{d\varepsilon} = 0$ .

Calcolo della condizione di instabilità.

Dalla conservazione del volume:  $d\varepsilon = \frac{dl}{l} = - \frac{dS}{S}$ .

Dunque:  $\frac{dF}{d\varepsilon} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}S + \frac{dS}{d\varepsilon}\sigma = 0 \rightarrow S \left( \frac{d\sigma}{d\varepsilon} + \sigma \frac{dS}{S \cdot \frac{-dS}{S}} \right) = 0 \rightarrow \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \rightarrow \varepsilon = n$ .

**Altre prove meccaniche distruttive.**

Il caso più generico delle prove di durezza è la prova di compressione; la prova di durezza è una prova di compressione localizzata.

Un'altra prova meccanica distruttiva è la prova di flessione. Determinazione delle caratteristiche dei materiali limitatamente alle deformazioni elastiche. Per materiali fragili, che non presentano deformazioni permanenti fino alla rottura, rivela il carico di rottura della provetta. La provetta, posta su due rulli liberi o su due carichi uguali e simmetrici, è caricata con un carico posto a metà distanza dagli appoggi.

sicuramente bisogna sottolineare il costo molto contenuto della tecnica, la sorgente è molto piccola e può passare in aperture strette; inoltre, non ha bisogno di alimentazione elettrica. Tuttavia la sostituzione della sorgente radioattiva è molto costosa. Pertanto bisogna usarla accuratamente e non eccessivamente. Tra i difetti, inoltre, va sottolineato il fatto che non si possono analizzare oggetti con dimensioni superiori a 180 mm e che non si possono rilevare difetti bidimensionali se il loro orientamento, rispetto all'asse del cono radiante, è inclinato.

- Termografia. Riscaldare il pezzo e controllare la distribuzione del calore su di esso.
- Termografia olografica. È proiettato un ologramma secondo le specifiche su un prodotto per evidenziarne le possibili interferenze.
- Metodo di emissione acustica. Tecnica molto utilizzata per il collaudo dei motori. Consiste nel misurare le vibrazioni sonore del motore e vedere se sono conformi ai risultati predefiniti.
- Tecnica di impatto acustico. Consiste nel dare colpi leggeri alla superficie di un oggetto per ascoltare ed analizzare le onde sonore trasmesse in modo da identificare discontinuità o difetti.

### La meccanica dei materiali.

Prima di andare ad analizzare i due comportamenti che può assumere un materiale, ovvero il comportamento elastico e il comportamento plastico, è importante fare un'assunzione. Le deformazioni elastiche e plastiche sono totalmente indipendenti. Quindi la deformazione totale a cui è sottoposto ogni materiale è la somma algebrica delle due deformazioni plastica e elastica:

$$\varepsilon^{tot} = \varepsilon^{elastico} + \varepsilon^{plastico}$$

**Il comportamento elastico.** Il primo modello che analizziamo è quello del "comportamento elastico lineare" che prevede una proporzione costante fra la tensione e la deformazione (la deformazione subita dal materiale è reversibile). Questa proporzionalità può essere espressa mediante la "Legge di Hooke":

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \text{con} \quad E = \frac{F \cdot l_0}{S_0 \cdot \Delta l}$$

**Legge di Hooke per la tensione uniassiale.** In realtà non esiste un'unica tensione, ma tante tensioni dirette in ogni direzione spaziale. Per semplicità noi analizziamo le tensioni dirette nelle direzioni dei tre assi cartesiani. Per ricondurre la trattazione precedente circa la prova di trazione è utile sottolineare che nella suddetta prova la tensione è applicata in una sola direzione. Spesso è utile definire una tensione media del corpo calcolabile come segue:

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

**Legge di Hooke per le tensioni triassiali.** Anche le deformazioni, come le tensioni, possono essere viste in funzione dell'allungamento in tutte e tre le direzioni spaziali cartesiane.

**Il criterio di snervamento.** Quando lo stato tensionale raggiunge un valore limite detto "limite si snervamento", il materiale comincia a subire una deformazione permanente. È molto difficile trovare il limite di snervamento del materiale poiché tale limite dipende dal tipo di carico applicato al corpo: trazione, flessione, torsione. Poiché noi principalmente ci siamo concentrati sul carico a trazione, di seguito riportiamo i due criteri che mettono in relazione il limite di snervamento a trazione con lo stato tensionale del corpo.

**Criterio di Tresca:**  $Y = \sigma_1 - \sigma_3$  (tensione tangenziale massima).

**Criterio di Von Mises:**  $2Y^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2$  (energia di distorsione).

Utilizzando il criterio di Von Mises è possibile calcolare una "tensione equivalente", ovvero una tensione fittizia che permette di mettere in equivalenza tutti gli stati tensionali con lo stato di trazione uniassiale. Allo stesso modo è possibile definire una "deformazione equivalente" che produce un lavoro di deformazione equivalente a quello delle deformazioni reali.

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

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$$

Come si può notare il criterio di Von Mises è più preciso, ma spesso il criterio di Tresca si fa preferire per la sua semplicità. Riportiamo di seguito una tabella nella quale vengono confrontati tra loro i due criteri in alcuni casi particolari.

STATO TENSIONALE	TRESCA	VON MISES
Tensione Piana $\rightarrow \sigma_2 = 0$	$Y = \sigma_1 - \sigma_3$	$Y^2 = \sigma_1^2 + \sigma_3^2 + \sigma_1\sigma_3$
Tensione Assialsimmetrica $\rightarrow \sigma_1 = \sigma_2$	$Y = \sigma_1 - \sigma_3$	$Y = \sigma_1 - \sigma_3$
Deformazione Piana $\rightarrow \sigma_2 = \sigma_m$	$Y = \sigma_1 - \sigma_3$	$\frac{2}{\sqrt{3}}Y = \sigma_1 - \sigma_3$

**Le equazioni costitutive.** Per comodità si utilizzano delle relazioni analitiche (formule matematiche, equazioni) che approssimano con un'unica legge la curva caratteristica della prova di trazione. Per la precisione utilizziamo due "leggi": la legge lineare e la legge esponenziale.

**Legge lineare e legge esponenziale.** Nella legge lineare approssimiamo la curva di trazione ad una retta. Nella legge esponenziale si trascura il tratto elastico della curva, ovvero si assume che il materiale si deformi plasticamente appena subisce una tensione, senza bisogno di raggiungere un

## SISTEMI DI PRODUZIONE – APPUNTI – LEZIONE B

### Le lavorazioni:

- **Formatura:** fonderia, metallurgia delle polveri, galvanoplastica.
- **Deformazione plastica:** laminazione, estrusione, stampaggio, trafilatura, fucinatura.
- **Asportazione truciolo:** tornitura, foratura, fresatura, rettificazione, elettroerosione, taglio laser.
- **Assemblaggio:** saldatura, incollaggio, chiodatura, imbullonatura.

### Fusione dei metalli.

La lavorazione dei materiali mediante fusione è un processo antichissimo. Questo processo consente di trasformare un metallo in un pezzo avente la forma desiderata mediante colata del metallo fuso in una cavità.

### Elementi essenziali della foratura:

- Il materiale di fusione ha buona fusibilità a "basse" temperature (1600 °C); buone doti di colabilità; capacità di solidificare in maniera omogenea; assenza di difetti nei getti.
- La forma può essere transitoria (una sola colata) o permanente. La colabilità di un metallo può essere valutata come il percorso compiuto dal materiale fuso in un canale. Il primo metodo prevede la realizzazione di un solo modello di produzione (positivo) e del relativo negativo che poi viene riprodotto in serie. Il secondo metodo prevede invece l'utilizzo di staffe e stampi permanenti, o comunque per un numero elevato di modelli. relativamente piccolo, prima di arrestarsi in seguito all'iniziarsi della solidificazione.
- Le anime sono degli oggetti che servono per ottenere dei fori nella fusione, cioè delle parti che non devono venir riempite dal metallo liquido. Possono essere prodotte o in terra (per forme complesse con problemi di estrazione del getto) o in acciaio (con scomposizione delle parti).
- I modelli con le migliori caratteristiche fusibili sono le ghise (non gli acciai), le leghe di rame (ottone, bronzo), le leghe di alluminio e le leghe eutettiche (leghe in cui la composizione non varia al passaggio dalla fase solida a quella liquida).
- Greggio di fusione.

Si possono verificare delle criticità nella progettazione del modello: sottosquadri (quelle parti rientranti che se riprodotte successivamente possono rompere o danneggiare il pezzo), angoli di sforno (per facilitare l'estrazione del modello), portate d'anima (nel caso in cui nel pezzo da realizzare siano presenti fori o cavità occorre considerare questi pezzi detti "anime" che vanno aggiunti dopo o durante la colata), raccordi, scomposizione del modello (linea di divisione), ritiro (risolto maggiorando le dimensioni), sovrmetalto (il grado di finitura del getto è spesso di scarsa qualità e bisogna lavorare il pezzo con macchine utensili).

**Le cavità di ritiro** sono quelle cavità che si formano all'interno del materiale o della colata di solito a causa del fenomeno del ritiro o per un cattivo mantenimento della temperatura di fusione. Le cavità di ritiro hanno di solito un profilo conico. Talvolta la necessità di evitare la formazione di cavità di ritiro con un'adeguata alimentazione, comporta un inevitabile aumento di volume con l'aggiunta di spessori di sovrametallo aggiuntivi che in seguito devono essere asportati. Come desiderato in fase di progetto la materozza è l'ultima a solidificare e in essa si concentreranno tutti i difetti del metallo. In fase di progettazione del processo è utile tenere presente anche un altro fattore: il baricentro termico, ovvero quel punto in cui si chiudono tutte le superfici isoterme e si completa la solidificazione. Il baricentro termico deve concentrarsi sempre nella materozza.

**Il sistema di colata.** È formato generalmente dai seguenti elementi:

1. **Il bacino di colata:** ha la funzione di ricevere il metallo fuso, smorzare la sua velocità e "purificarlo" dalle scorie.
2. **Il canale di colata:** ha lo scopo di convogliare il metallo proveniente dal bacino di colata sul piano dove ci sono altre canalizzazioni.
3. **Il canale di distribuzione:** ha generalmente forma trapezoidale e serve per alimentare i diversi attacchi di colata; come il bacino di colata ha la funzione di smorzare la velocità del metallo fuso e di "purificarlo" dalle scorie mediante appositi dispositivi;
4. **Gli attacchi di colata:** sono canalizzazioni di forma rettangolare, triangolare o trapezoidale che servono per convogliare il metallo fuso in più punti del getto.

**Le fasi preparatorie del processo:**

- disegno e realizzazione del modello (forma, stampo).
- preparazione delle terre.
- realizzazione della forma.

**Le fasi del processo successive alla colata:**

- distaffatura;
- smaterozzatura;
- sbavatura (non sempre).

**Altre eventuali fasi del processo:** sabbiatura, lavaggio, trattamento termico del pezzo.

**Modello teorico della fusione.** Cinque sono i principi che regolano il processo di fusione:

1. **TEOREMA DI BERNOULLI:**  $h$ =altezza colata;  $P$ =pressione del fluido;  $\rho$ =densità del fluido;  $v$ =velocità della colata;  $k$ =costante funzione del livello di energia del fluido.

$$h + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2g} = k$$

4. **SEZIONE DEL CANALE DI COLATA:**  $S = \frac{Q}{v} = \frac{V}{T \cdot v}$   
 con Q = Portata e v = velocità.

**Il tempo di solidificazione e il modulo di raffreddamento.** Per calcolare il tempo di solidificazione è utile la "regola di Chvorinov". Come vedremo dalla breve dimostrazione riportata sotto, il tempo di solidificazione è proporzionale al quadrato del modulo di raffreddamento. Il solido con modulo di raffreddamento più basso è quello che impiega il tempo minore per solidificare.

**TEMPO SOLIDIFICAZIONE:**  $t = \left(\frac{x}{2}\right)^2 = M^2$

con x = spessore getto e M=modulo di raffreddamento.

**MODULO DI RAFFREDDAMENTO:**  $M = \frac{V}{S} = \frac{S \cdot x}{2S} = \frac{x}{2}$

**Dimensionamento e collocamento della materozza.** La materozza è collocata in corrispondenza del pezzo con il modulo di raffreddamento più alto e le sue dimensioni devono soddisfare la seguente relazione:

$$M_{\text{mat}} = 1,2 M_n$$

Il motivo della maggiorazione è legato alla presenza del cono di ritiro sulla materozza. Il cono di ritiro diminuisce il volume e aumenta la superficie della materozza, quindi alla fine del processo di fusione il modulo di raffreddamento della materozza sarà sensibilmente inferiore rispetto a quello iniziale.

**La fusione in forma transitoria.** È un'evoluzione della formatura in terra: più qualità dei getti e meno dispendioso nei procedimenti. I materiali presentano alcune caratteristiche peculiari:

- Refrattarietà: resistenza alle temperature della lega fusa senza fusione della forma.
- Coesione: resistenza alle forze di compressione e taglio.
- Permeabilità: possibilità di lasciarsi attraversare dai gas limitando l'insorgere di soffiature.
- Scorrevolezza: facilità di riempire la forma attorno al modello.

I procedimenti che si effettuano sono tre: ad indurimento meccanico che prevede una compressione manuale o meccanica e formatura in terra sintetica o in fossa; processi ad indurimento chimico attraverso reazioni chimiche naturali o con catalizzatori; si effettuano processi con l'anidride carbonica e formatura in sabbia e cemento o in cold-box. Infine abbiamo processi ad indurimento termico in cui il calore interviene nel processo di formatura; i processi usati sono "shell molding" e microfusione.

## PROCESSI AD INDURIMENTO TERMICO

**Processo shell-molding.** Consiste nel colare metallo fuso all'interno di una forma a guscio, che può contenere una o più anime, per ottenere un getto con minime tolleranze dimensionali e superfici a bassa rugosità. I vantaggi di questo processo sono notevoli: la possibilità di ottenere getti con forma molto complessa, spessori sottili e con basse tolleranze dimensionali in modo da ridurre al minimo i sovrametalli di lavorazione; assenza di qualsiasi residuo di umidità e possibilità di colare particolari complessi in acciai legati grazie alla disponibilità di sabbie con diversa composizione e granulometria, che consente di controllare il processo di raffreddamento del getto e quindi ridurre al minimo la possibilità di avere scarti per micro ritiri.

**Microfusione.** Consente di realizzare le forme più funzionali, ideale per getti piccoli e finitura superficiale buona. Il vantaggio principale è la convenienza economica e la varietà dei materiali utilizzabili: tutti i tipi di acciaio, le super leghe speciali a base di nichel e di cobalto colabili in aria. Ci sono due tipologie: a miscela refrattaria e ad immersione in materiale ceramico.

### **La fusione in forma permanente.**

La forma (conchiglia) è realizzata in lega metallica (acciai legati, ghise speciali) per essere usata in un numero elevato di getti uguali. I principali vantaggi sono: automatizzazione degli impianti di colata, produzione in grande serie, struttura cristallina fine dei getti e buona precisione e finitura superficiale. Presenta, ovviamente, alcune criticità: la conchiglia è porosa per cui bisogna implementare dei canali di sfogo per la fuoriuscita dell'aria e dei gas; la temperatura della conchiglia deve essere costante per evitare blocchi del getto. Quindi, le leghe devono possedere una buona colabilità e una temperatura della colata non troppo alta.

La conchiglia può essere riempita sotto pressione o per gravità. Nelle conchiglie riempite per gravità le anime possono essere in terra (usato per forme complesse o con problemi di estrazione del getto), in acciaio (scomposizione delle parti).

La qualità dei getti dipende da diversi fattori: lubrificazione delle parti in movimento, temperatura della conchiglia, verniciatura delle superfici interne, canalizzazioni di colata e materozze presenti. Importantissima è la temperatura di colata al fine di evitare il ritiro eccessivo del getto e ottenere una fluidità tale da non provocare un riempimento incompleto; l'equilibrio termico si raggiunge in seguito alla colata di alcuni pezzi. È, anche, importante la verniciatura dell'interno della conchiglia per il miglioramento della finitura superficiale, per l'aumento della vita della conchiglia e per il controllo dello scorrimento della lega e del trasferimento del calore nelle materozze.

Perciò è importante progettare il sistema di colata per ridurre al minimo le turbolenze e alimentare il getto senza spruzzi di colata nella conchiglia. La conchiglia deve essere basculante per eliminare gli intrappolamenti e assicurare un riempimento dolce della stessa. La colata può avvenire in sorgente, lateralmente o dall'alto con basculamento.

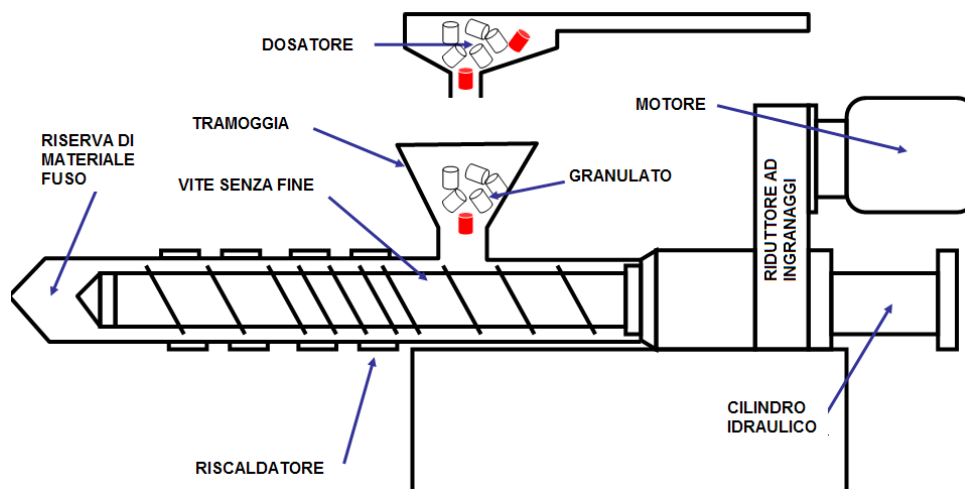


**La materia prima.** In commercio i materiali plastici si trovano sotto forma di pellets (granuli cubici di dimensioni 3x3x3 mm oppure cilindrici di dimensioni 3x3 mm) oppure sotto forma di polveri di granulometria fine.

**Lavorazione dei termoplastici.** Processo: fusione e formatura del polimero; poi raffreddamento del polimero al di sotto della  $T_m$  (fusione) se è un solido cristallino oppure al di sotto della  $T_p$  (rammollimento) se è un solido amorfo.

**Lavorazione dei termoindurenti.** Processo: riscaldamento fino alla temperatura di reticolazione; formatura del polimero e mantenimento del polimero alla temperatura di reticolazione fino a fine processo.

**Lo stampaggio ad iniezione.** La maggior parte dei materiali termoplastici e anche tanti materiali termoindurenti vengono lavorati principalmente con il processo dello "stampaggio ad iniezione". È un processo molto simile alla pressofusione in camera calda. Generalmente i polimeri allo stato plastico hanno una viscosità troppo elevata per riempire efficacemente lo stampo sotto la forza della sola gravità. Perciò, è necessario che essi vengano pressati all'interno degli stampi. Di solito le presse per lo stampaggio ad iniezione sono costituite da due parti: l'unità di iniezione e l'unità di controllo dello stampo.



#### Fasi del processo dello stampaggio ad iniezione.

1. Ingresso del materiale granulato dalla tramoggia (silos, contenitore) all'unità di iniezione (in questo caso la vite).
2. Inizio del processo di fluidificazione del materiale nella camera di plastificazione: il materiale spinto dalla vite verso lo stampo viene riscaldato da alcune piastre; prima di raggiungere lo stampo il materiale si è completamente fuso.
3. Riempimento dello stampo attraverso un ugello di iniezione.
4. L'azione della vite mantiene in pressione il materiale nello stampo fino alla solidificazione.
5. Estrazione del polimero dallo stampo.

## SISTEMI DI PRODUZIONE – APPUNTI – LEZIONE C

### I processi per deformazione.

I processi per deformazione sono il miglior compromesso per ottenere pezzi di elevata resistenza e buona qualità e sono pertanto la tipologia di processi più utilizzata nell'industria di produzione di massa. Il principale vantaggio dell'utilizzo di tale processo è che le proprietà meccaniche dei pezzi lavorati aumentano: raffinamento del grano cristallino; orientazione ottimale delle fibre; incrudimento statico e dinamico; chiusura delle cavità interne. Inoltre nei processi di deformazione plastica non avviene alcuna rimozione di materiale e tutto il ciclo viene effettuato in tempi molto brevi.

I materiali sono anisotropi: la resistenza meccanica dipende dalla direzione e la deformazione plastica allunga il grano in una sola direzione. Sono possibili due tipi di anisotropia: cristallografia e orientazione delle fibre.

I principali difetti di questo tipo di processi sono una qualità dimensionale e una finitura superficiale inferiore ad altri processi. E questo comporta che il pezzo dopo aver subito il processo di deformazione deve per forza subire anche delle lavorazioni di finitura.

Il lavoro generato durante il processo di deformazione può essere scomposto in: 1) lavoro di deformazione uniforme; 2) lavoro ridondante e 3) lavoro di attrito.

$$L = L_{unif} + L_{rid} + L_{attr}$$

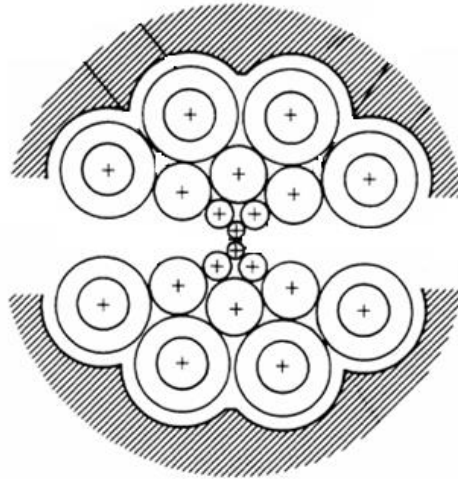
$$\text{con } L_{unif} = \bar{Y} \cdot \varepsilon \cdot V \quad \text{e} \quad L_{attr} = \mu \cdot P \cdot S \cdot c$$

Il lavoro di deformazione plastica è irreversibile e viene trasformato in calore per il 90% e di energia di legame al 10 %.

I processi possono classificarsi in base alle lavorazioni:

- Lavorazioni a caldo: il materiale subisce un riscaldamento prima della lavorazione per ottenere grandi deformazioni e forme complesse con macchinari semplici; d'altro canto richiede molta energia per il riscaldamento; i materiali si ossidano e la precisione dimensionale non è costante.
- Lavorazioni a freddo: il materiale è a temperatura ambiente ed è riscaldato solo dal lavoro di deformazione; il pezzo finito avrà una finitura superficiale migliore e miglior precisione dimensionale dei pezzi.
- Lavorazioni a semicaldo: la qualità è simile alle lavorazioni a freddo con possibilità di aumentare le dimensioni del pezzo e le eventuali deformazioni; per gli acciai la temperatura è di 600-700°C.

I processi per deformazione possono essere analizzati suddividendoli in tre grandi categorie: i processi continui (laminazione, estrusione, trafilatura), i processi discreti (stampaggio, fucinatura, tranciatura) e i processi di formatura della lamiera.



Gabbia di laminazione di tipo "Sendzimir"

**Analisi teorica.** Senza andare troppo nello specifico subito si può dire che il materiale subisce un "ridimensionamento" durante questo processo; infatti cambiano lo spessore, l'allargamento e l'allungamento ( $b$ =larghezza della lamiera).

- *Riduzione di spessore:*  $\Delta h = h_0 - h_1$ .
- *Allargamento (trasversale):*  $\Delta w = w_1 - w_0$ .
- *Allungamento:*  $\Delta l = l_1 - l_0$ .

Si suppone che l'allargamento subisca una deformazione tanto piccola da essere trascurabile.

**La velocità del materiale.** Per la condizione di continuità si ha:

$$v_0 \cdot h_0 \cdot b = v_1 \cdot h_1 \cdot b$$

Ne consegue che vi è la seguente relazione fra la velocità in entrata e in uscita:

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{h_0}{h_1}$$

**La condizione di imbocco e l'angolo di laminazione.** Per essere verificata la condizione di imbocco è necessario che sia vera la seguente equazione:

$$\mu \cdot P \cdot \cos \alpha \geq P \cdot \sin \alpha \rightarrow \mu \geq \tan \alpha$$

con  $\mu$ =coefficiente di attrito.

L'equazione sopradescritta limita pertanto l'angolo di laminazione. L'angolo di laminazione si calcola nel seguente modo:

$$\tan \alpha = \frac{L}{R - \frac{\Delta h}{2}}$$

con  $R$ =raggio cilindro,  $L$ =proiezione dell'arco di contatto sull'asse di laminazione.

Dalla formula precedente ne deriva che:

$$L = \sqrt{R \cdot \Delta h}$$

## Il processo di estrusione.

Con questo processo delle barre lunghe con forme diverse (cilindriche piene, tubolari, variamente sagomate) assumono le forme richieste. I vantaggi dell'estrusione sono principalmente tre:

- elevata produttività;
- buona precisione dimensionale e finitura superficiale;
- costi relativamente contenuti.

**Tre modalità di estrusione.** Il processo di estrusione può avvenire secondo tre modalità: estrusione diretta, estrusione inversa e estrusione di tubi. Sostanzialmente la differenza tra diretta e inversa sta nel fatto che nella prima il carico e il materiale si muovono nella stessa direzione, nell'inversa il materiale si muove in direzione opposta rispetto al carico; nella estrusione di tubi c'è un massello da estrarre, un pistone cavo e un mandrino che spingono verso la matrice. Altre differenze fra le estrusioni sono sia nella pressione di estrusione che nell'attrito come vedremo subito di seguito.

**Pressione di estrusione.** La pressione di estrusione dipende generalmente da cinque fattori:

- resistenza alla deformazione;
- forma della billetta;
- lunghezza e diametro della billetta;
- coefficiente di attrito  $\mu$  tra billetta e pareti della camera di estrusione;
- rapporto di estrusione R:

$$R = \frac{A_0}{A_1}$$

**Estrusione diretta:** la pressione decresce all'aumentare della corsa e l'attrito dipende dalla lunghezza della billetta; la pendenza nella zona di lavoro è funzione della velocità dello spintore.

**Estrusione inversa:** la pressione ha un andamento costante e l'attrito è trascurabile durante la corsa dello spintore.

## Analisi energetica.

È sempre difficile calcolare lo sforzo di estrusione in quanto esso dipende dal tipo di estrusione (diretta o inversa o tubolare) ma anche da altri fattori quali: la forza di pura deformazione, i vari attriti (interni, sul collare della matrice, con le pareti).

Di tutti questi contributi si tiene conto introducendo un opportuno coefficiente " $\eta$ " che si chiama "rendimento della deformazione".

Il suo valore quantificabile è il seguente:  $\eta = 0,5 \div 0,8$ .

**Lavoro ideale di deformazione.** Supponendo che non ci sia nessuna perdita di attrito e che il materiale abbia un comportamento plastico, il lavoro ideale di deformazione è il seguente:

$$L = F \cdot c = \bar{Y} \cdot \varepsilon \cdot V = \bar{Y} \cdot \varepsilon \cdot A_0 \cdot c$$

N.B. Nel caso di materiali incrudenti si sostituisce la costante Y con il valore medio della tensione di scorrimento.