Deformazione plastica dei materiali

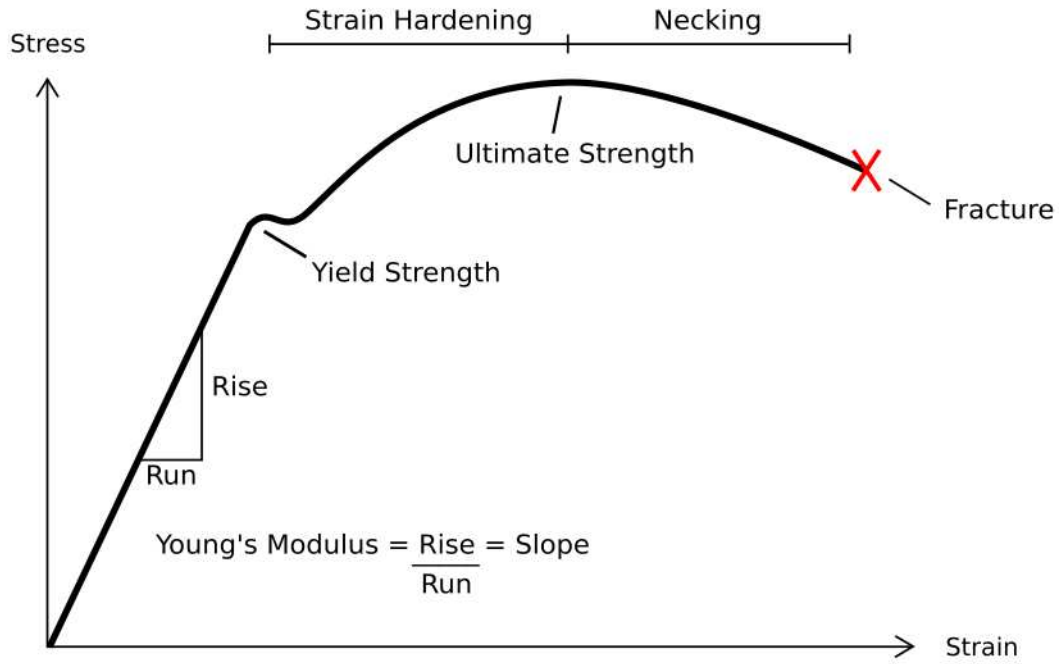
- È una trasformazione che interessa un materiale allo stato solido che può avvenire a diverse temperature

- Esistono, nell'ambito della deformazione plastica due tipi di processo:
  - Processi primari per la trasformazione del materiale da fuso in semilavorati di tipo commerciale
  - Processi secondari per la trasformazione dei semilavorati commerciali nei pezzi specifici

Comportamento dei materiali

- La curva della prova di trazione è tra le più significative per comprendere il comportamento dei materiali. Presenta:
  - Un primo tratto caratterizzato da comportamento elastico
  - Una fase di snervamento
  - Un tratto caratterizzato da deformazioni di tipo plastico e dal fenomeno dell'incrudimento,
  - Il carico massimo
  - Il fenomeno della strizione
  - La rottura

Sforzo - deformazione



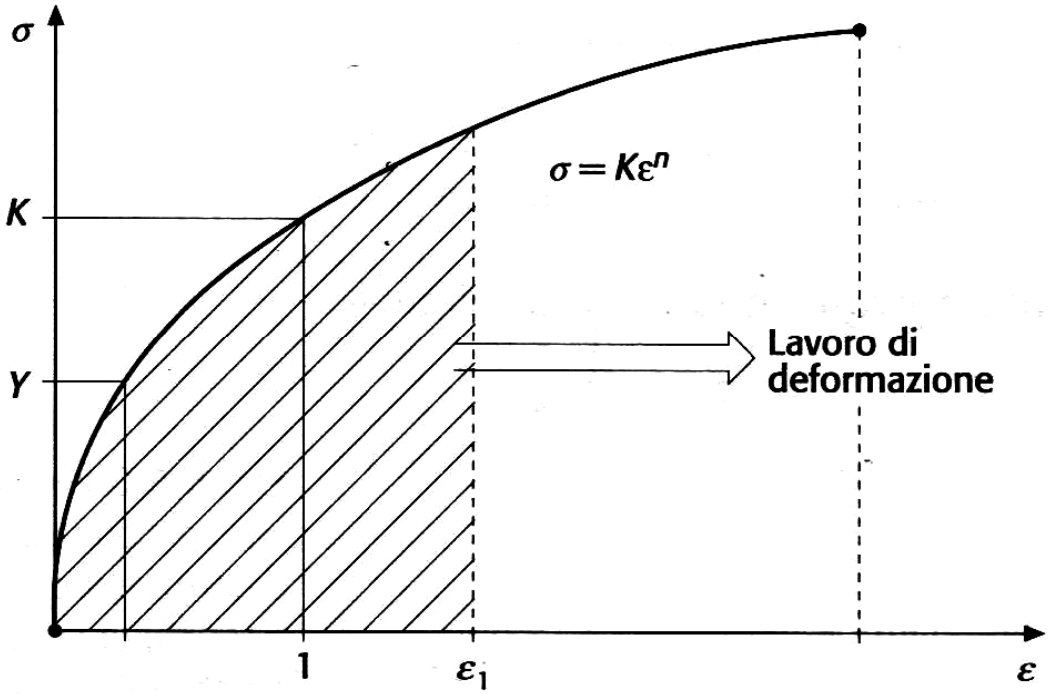
Caratteristiche dei materiali

- I processi di deformazione plastica utilizzano la capacità del materiale di deformarsi prima di rompersi
- La deformazione plastica avviene quando il materiale si trova nel tratto di curva tra lo snervamento e il carico massimo

Classificazione dei processi di deformazione plastica

- A freddo
  - Avviene a temperatura ambiente
  - Il materiale di fatto si scalda ugualmente durante la deformazione
  - Svantaggi
    - Piccole deformazioni
    - Maggiori forze e potenze
  - Vantaggi:
    - Miglior finitura superficiale
    - Precisione dimensionale
- A caldo
  - Avviene normalmente a temperature non molto lontane dalla fusione. Ovviamente prevede il riscaldamento del materiale prima di effettuare la deformazione
  - Vantaggi:
    - Necessarie minori forze e potenze
    - Possibilità di grandi deformazioni
  - Svantaggi:
    - Energia spesa per il riscaldamento
    - Ossidazione dei metalli con conseguente cattiva finitura
    - Poca precisione dimensionale

Lavoro di deformazione



Curva «tensione vera-deformazione vera». L'area tratteggiata rappresenta il lavoro ideale di deformazione per unità di volume, per deformazione pari a ε_1.

Lavoro di deformazione

- Il lavoro di deformazione è esprimibile con la formula

$$W = \int \sigma \, d\varepsilon$$

Lavorazioni per deformazione plastica

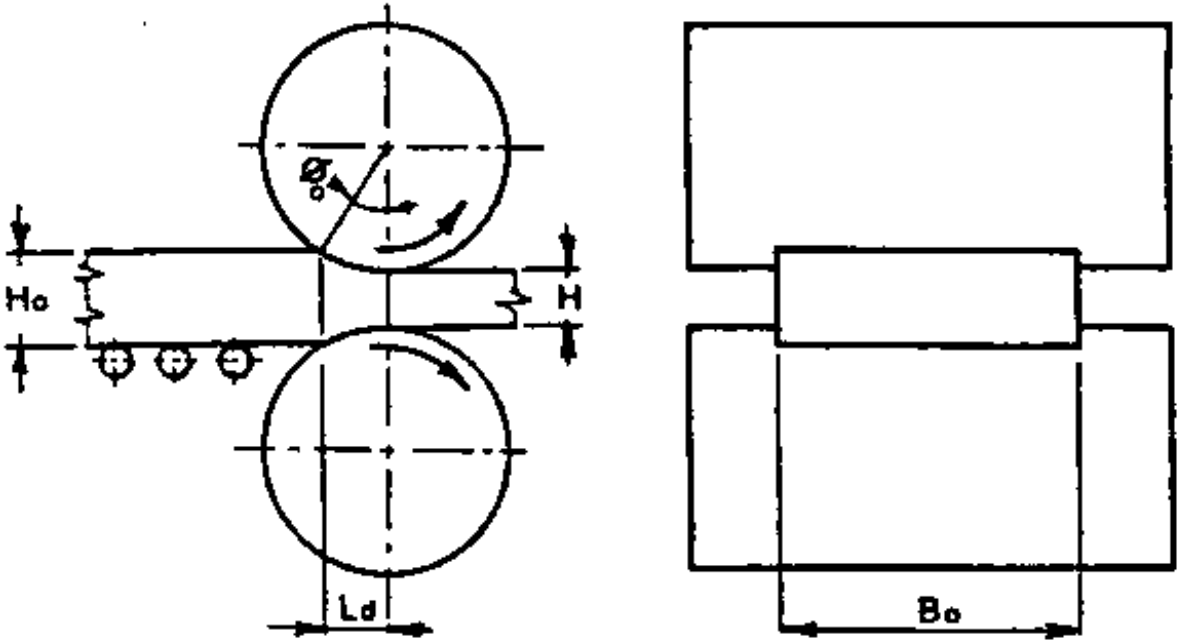
Laminazione

- È un processo impiegato nell'industria siderurgica per la trasformazione del materiale colato (lingotti o colata in continuo) in semilavorati commerciali
- I prodotti più comuni sono:
  - Blumi: sezione quadrata, lato >130 mm
  - Billette: sezione quadrata, lato 40-130 mm
  - Bramme: sezione rettangolare, lato min. -100mm
  - Profilati speciali: semitondi, etc, lunghezza 6m
  - Barre: sez. quadrata, rettangolare, esagonale, ottogonale e piatti
  - Lamiere: in tutti i formati, sottili (<3mm) e grosse (>3mm) in fogli
  - Vergella: tondino con diametro nominale > 5mm in rotoli
  - Travi: ad I, H, U, T, L
  - Nastri: avvolti in rotolo, larghi (>600mm) o stretti (<600mm)
  - Materiale ferroviario

Laminazione

- Il materiale è costretto a passare dentro due cilindri contro-rotanti che ne riducono la sezione ed incrementano la lunghezza
- La sollecitazione principale è quella di compressione

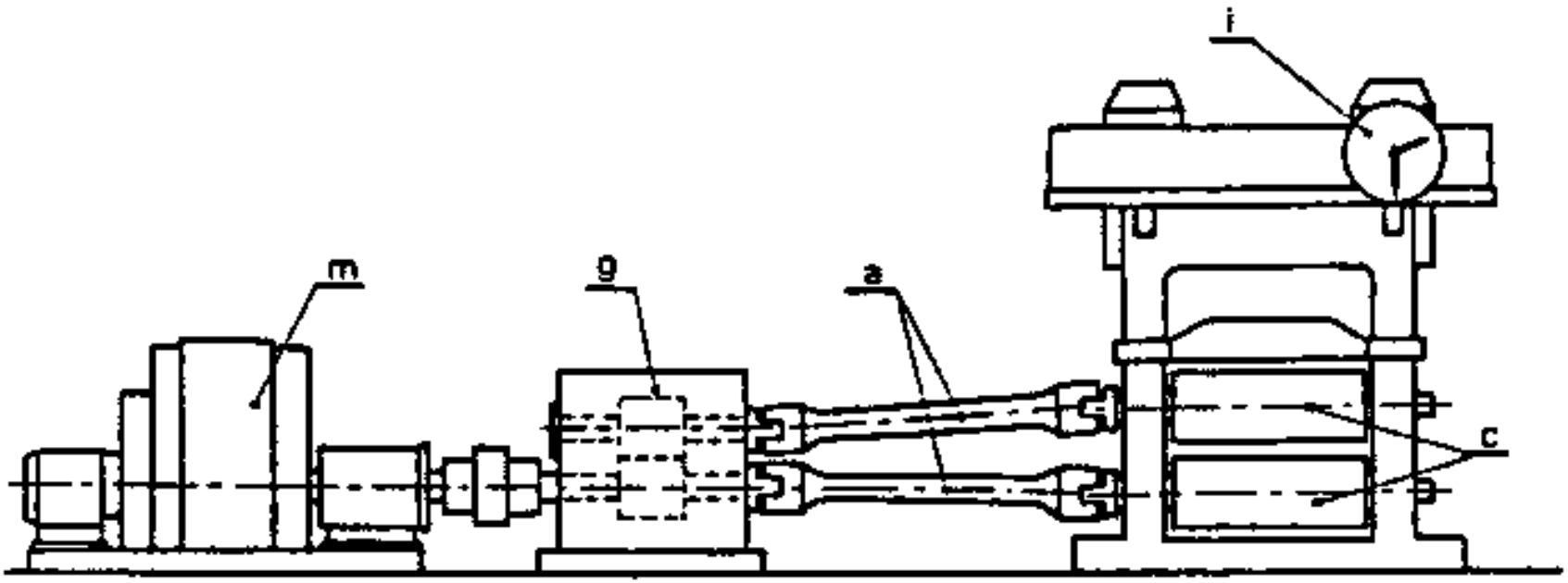
Schema di laminazione



Schema della laminazione.

H_o, H = spessore iniziale, finale del laminando,
B_o = larghezza iniziale del laminando,
L_d = lunghezza della zona di deformazione,
ϕ_o = angolo di primo contatto.

Linee o treni di laminazione

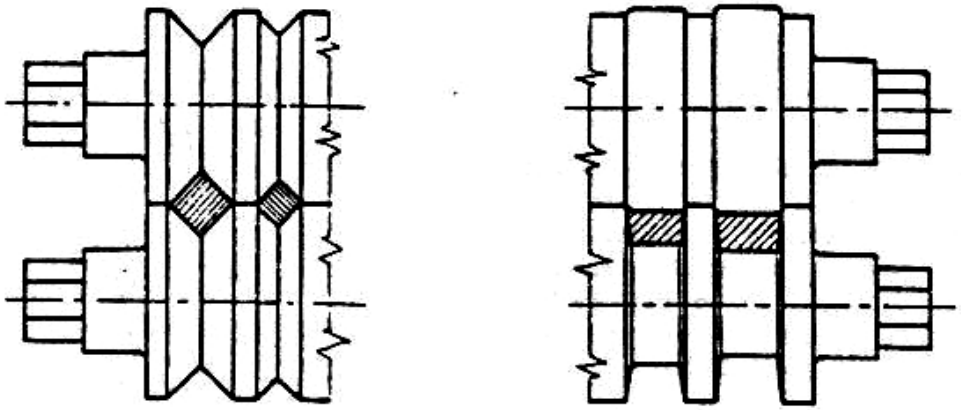


Gabbia di laminazione

c: cilindri,
i: indicatore della distanza fra i cilindri,
a: allunghe,
g: gabbia a pignoni,
m: motore.

Cilindri di laminazione

- Sono di diversi tipi:
  - Lisci: per prodotti piatti (nastri e lamiere)
  - Scanalati: per profili specifici, a loro volta
    - Aperti
    - Chiusi
  - Le pareti laterali devono presentare angoli di spoglia di almeno 1°-2°



Tipi di cilindri scanalati.

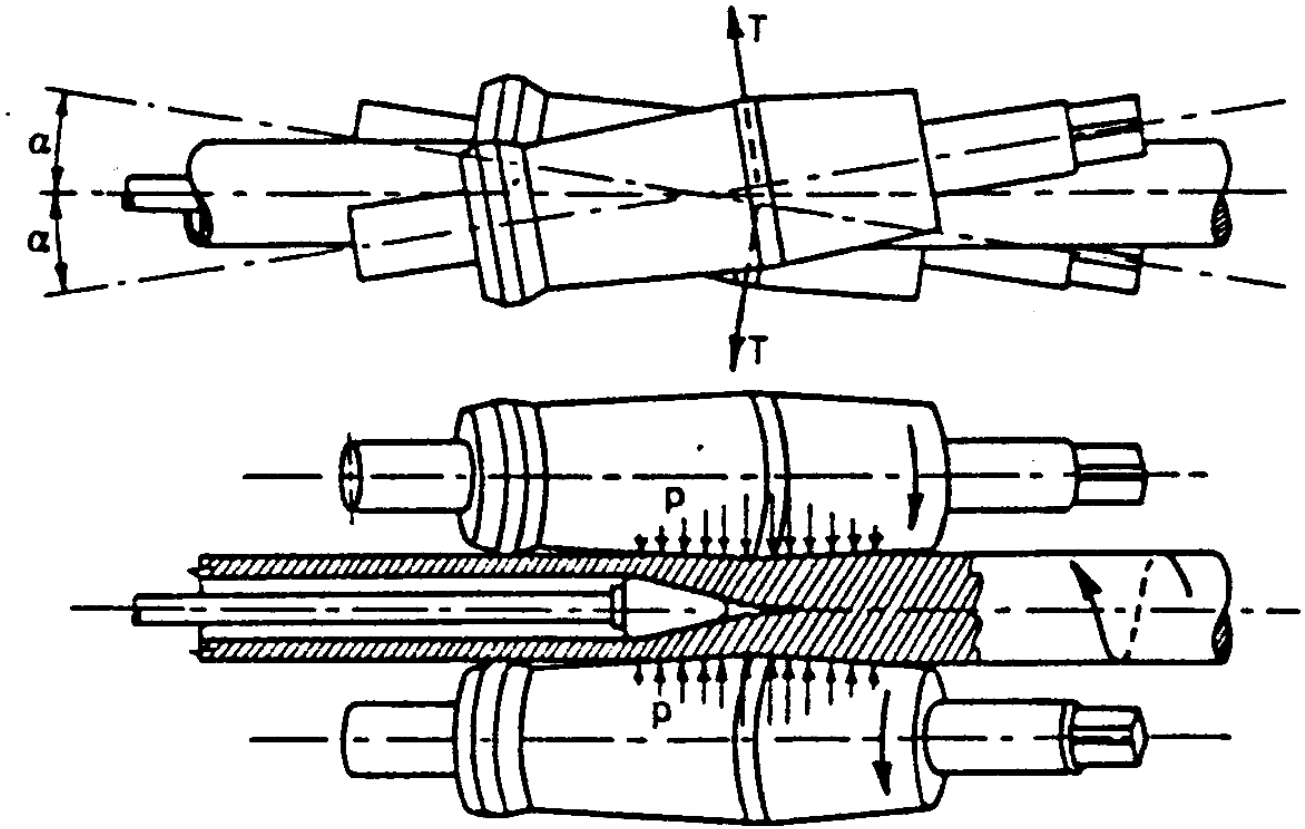
Laminazione di tubi

- I tubi si ottengono dal pieno mediante laminazione attraverso due operazioni di base:
  - Produzione del forato a pareti spesse mediante laminazione con spina interna di un lingotto pieno
  - Stiratura e finitura con riduzione dello spessore esterno attraverso laminazione con o senza spina

Produzione del forato

- Metodo Mannesmann o della laminazione obliqua:
  - Cilindri a tronco di cono con assi obliqui
    - Azione di pressione P progressivamente crescente
    - Azione tangenziale T che sviluppa un a componente assiale $A = T \operatorname{sen}\alpha$ che consente l'avanzamento del pezzo
    - Forza di trazione massima al centro della sezione circolare del pieno che, guidata dalla spina, provoca la generazione del foro centrale

Metodo di Mannesmann

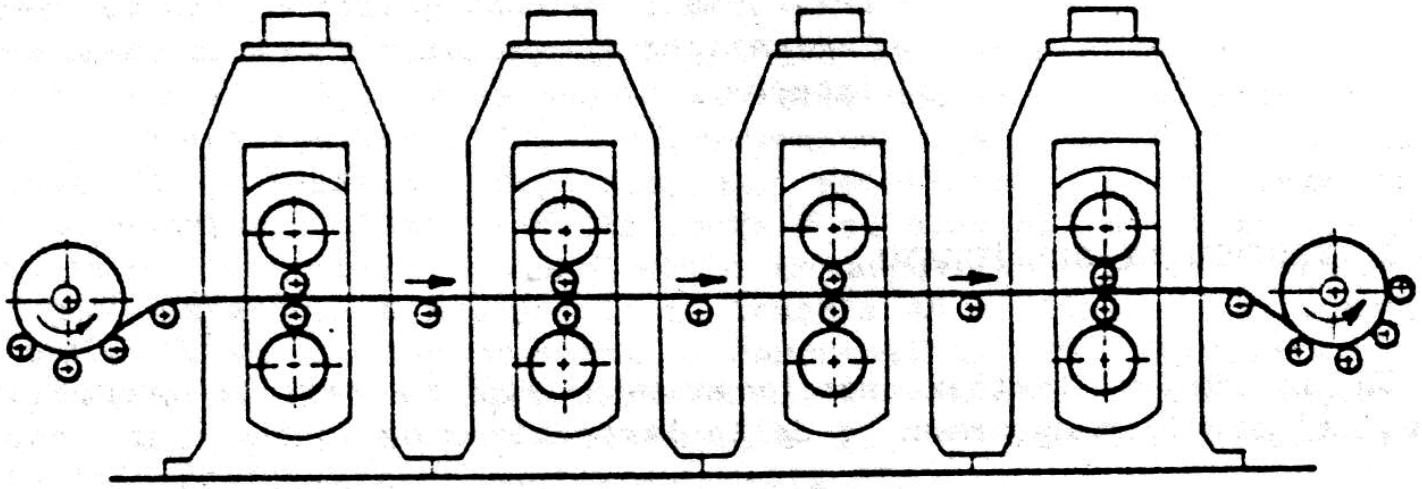


Laminatoio obliquo (Mannesmann).

Laminazione a freddo di nastri

- Si applica su nastri già laminati a caldo con l'obiettivo di
  - Ridurne ulteriormente lo spessore (fino 0,5 mm)
  - Migliorare la resistenza meccanica
- È preceduta da un'operazione di decapaggio per eliminare qualunque forma di ossido
- È realizzata con 4/5 gabbie successive che esercitano sul nastro, un'azione di compressione e di tiraggio progressivo fino alla bobina finale di avvolgimento

Laminazione a freddo di nastri

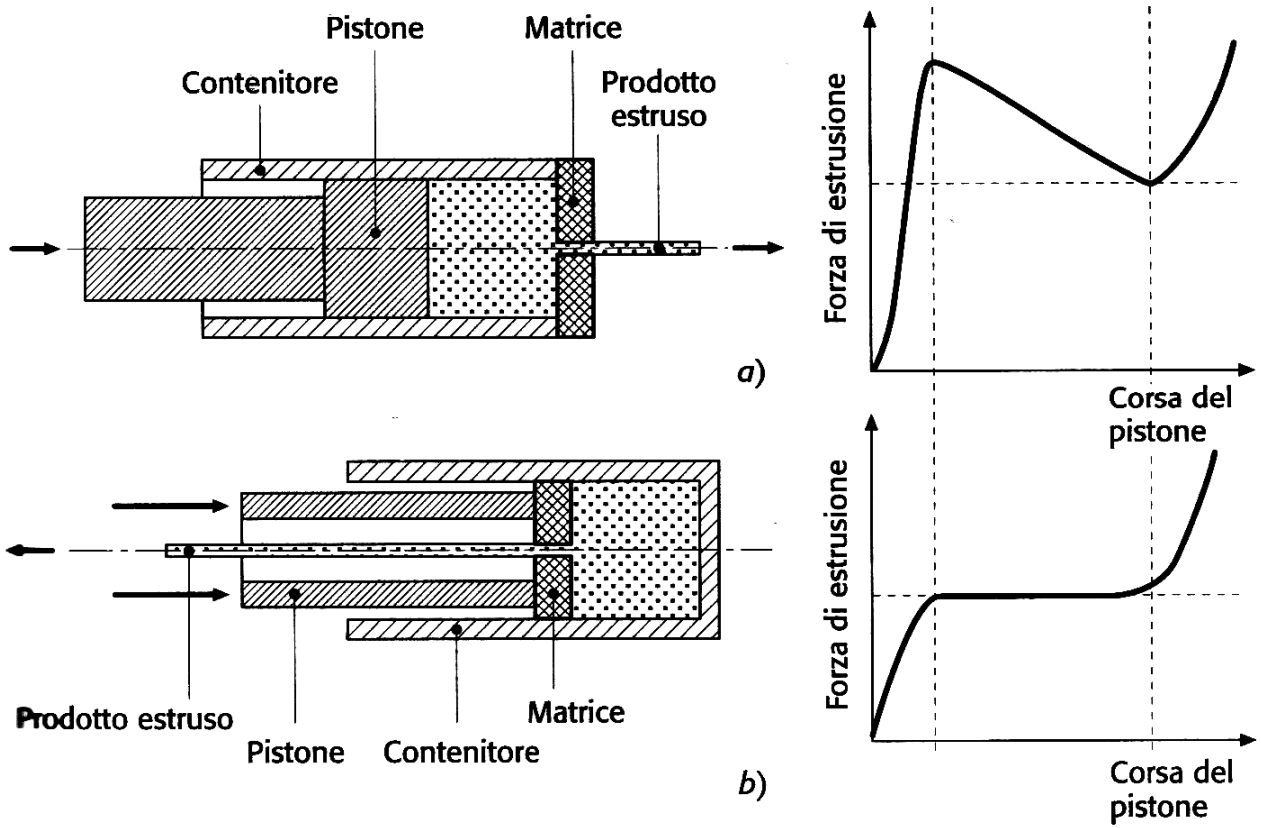


Laminatoio continuo a freddo per nastri.

Estrusione

- Consiste nel processo di compressione di un massello cilindrico di materiale a temperatura ambiente (estrusione a freddo) o riscaldato (estrusione a caldo) mediante una pressa così da farlo fluire attraverso un foro in sagoma (matrice) avente sezione uguale al semilavorato che si desidera ottenere

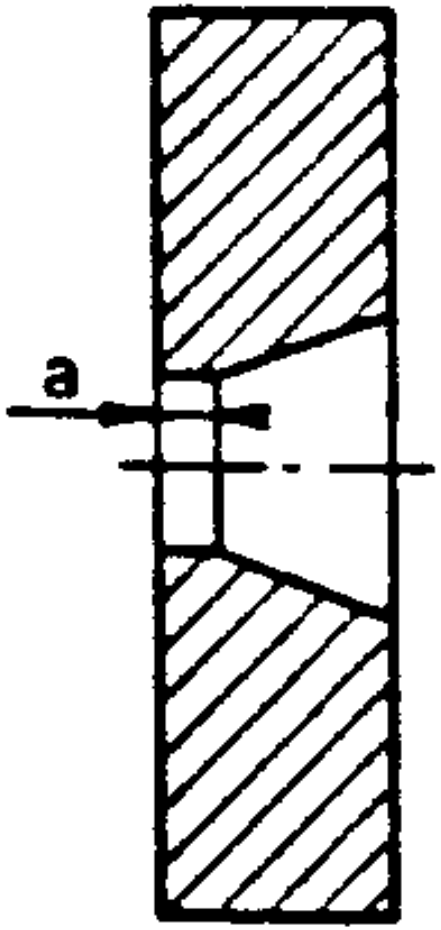
Processo di estrusione



Principio dell'operazione di estrusione, diretta *a*) e inversa *b*) e relativi diagrammi qualitativi dell'andamento della forza di estrusione in funzione della corsa del pistone premente.

Matrice di estrusione

- Il foro presenta un collare calibrato con duplice funzione:
  - Rifinire e stabilizzare la superficie del profilato
  - Evitare la rapida usura della matrice
- Il collare non deve essere eccessivamente esteso per non creare troppo attrito



Matrice.

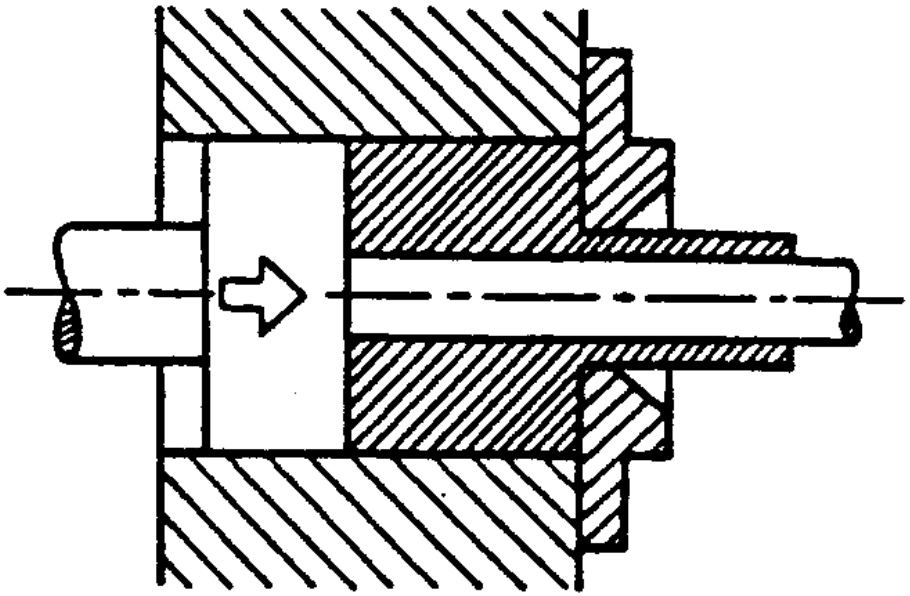
Estrusione di tubi

- L’estrusione è un processo utilizzato anche per la produzione di tubi, partendo:
  - Da un forato utilizzando l’estrusione diretta
  - Da un pieno utilizzando l’estrusione inversa ed ottenendo un estruso “a bicchiere”

Estrusione da forato

- Il forato viene inserito nel contenitore ove il pistone è munito di mandrino con diametro pari al diametro interno del tubo da ottenere
- Il materiale deve fluire tra la matrice ed il mandrino ottenendo il profilo richiesto

Estrusione di tubi partendo da un forato.



Estrusione da pieno

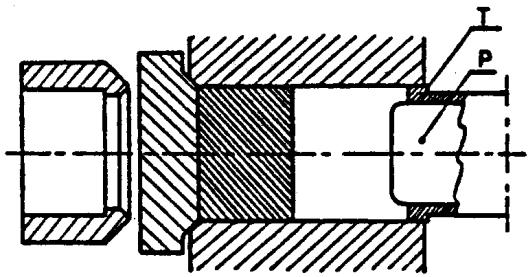


Fig. 5.12-a - Fase iniziale.

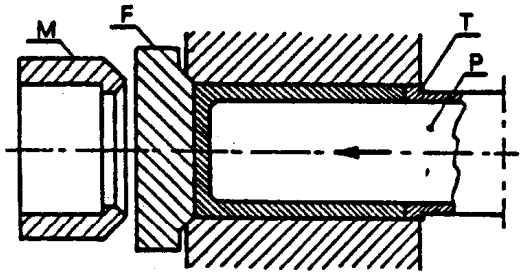
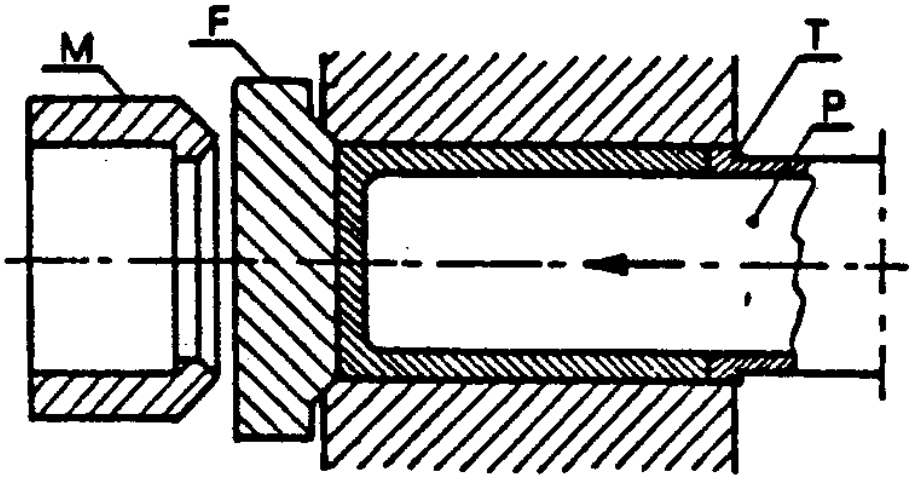
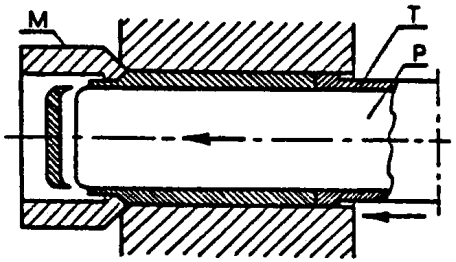


Fig. 5.12-b - Fase di estrusione inversa.



b - Fase di estrusione inversa.



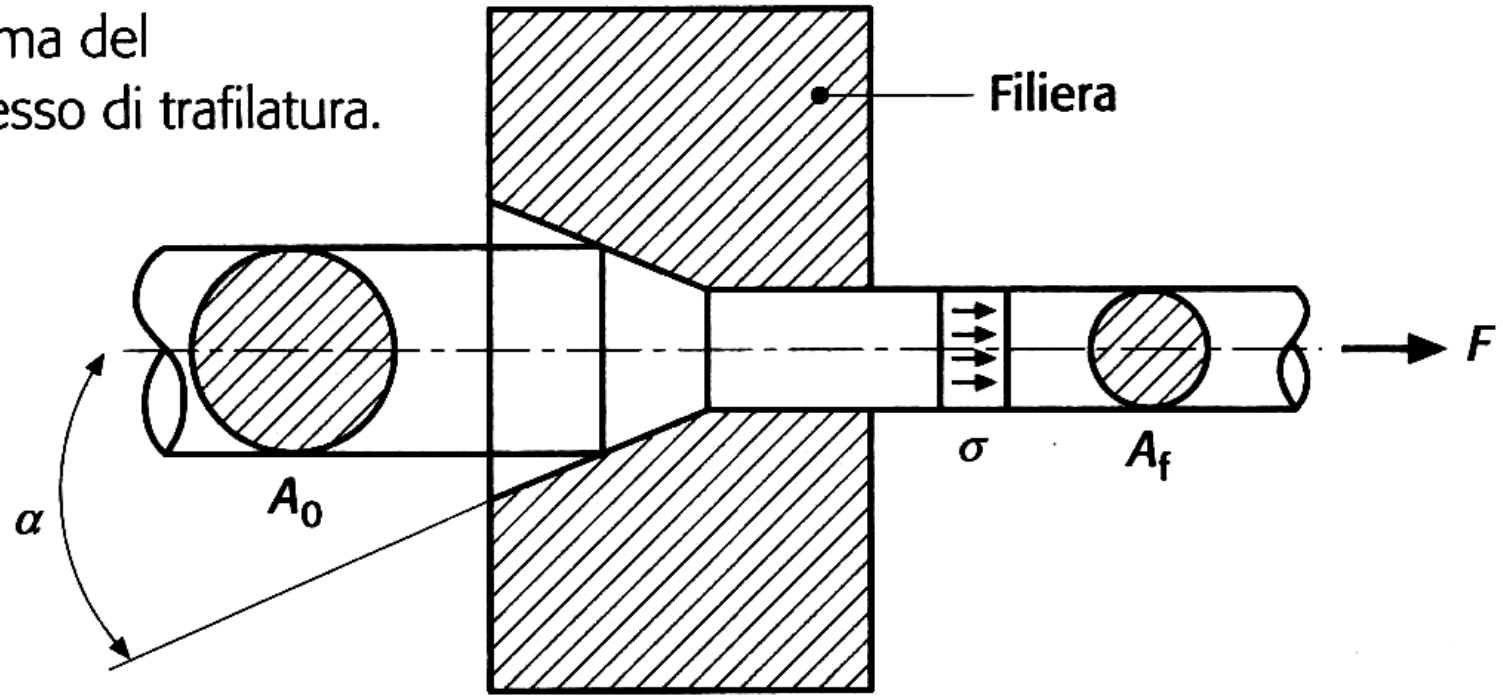
c - Fase di tranciatura e di estrusione diretta.

Trafilatura

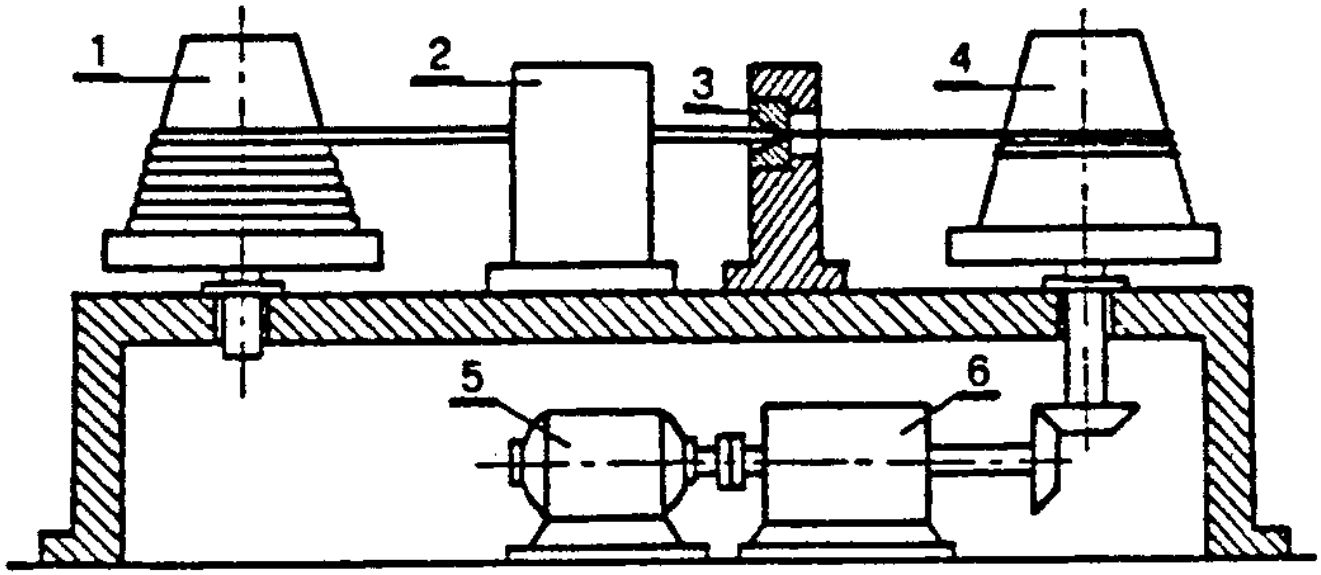
- È un procedimento di deformazione plastica a freddo ove il materiale è soggetto ad una forza di trazione che lo costringe attraverso un foro calibrato in sagoma detto filiera (o trafila)
- Consente di ottenere prodotti finiti con notevole precisione dimensionale e finitura superficiale quali:
  - Fili
  - Barre tonde o profilate
  - Tubi
  - Nastri

Filiera

Schema del processo di trafilatura.



Schema di trafilatrice

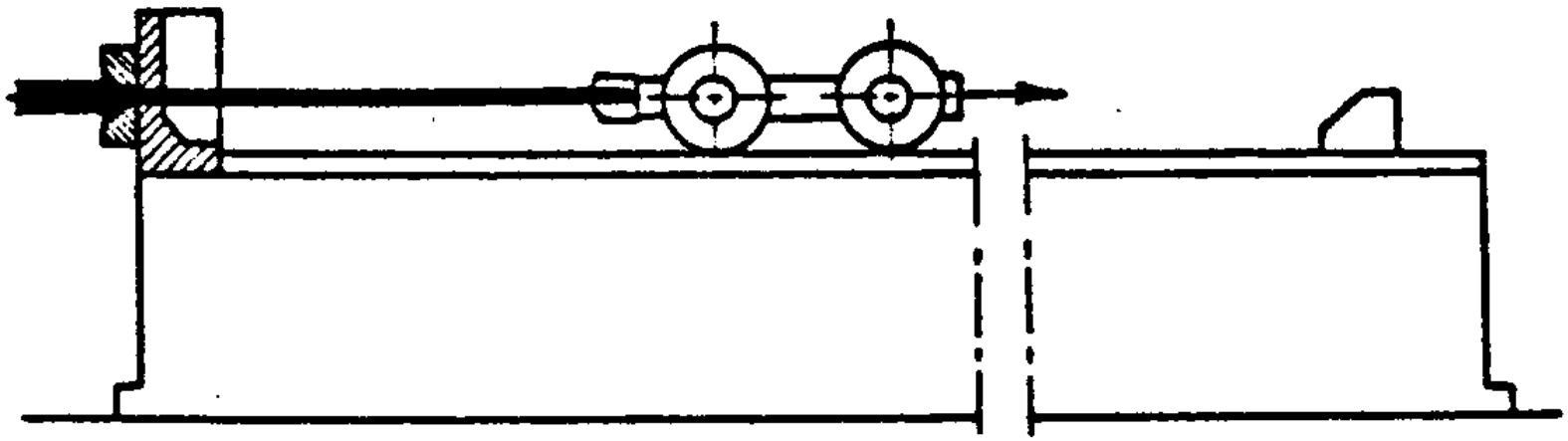


Schema di una trafilatrice.

1) aspo condotto, 2) dispositivo di lubrificazione, 3) filiera,
4) aspo avvolgitore, 5) motore, 6) cambio.

Trafilatura di barre

- La trafilatura delle barre serve per ottenere:
  - Buona finitura superficiale
  - Ottima tolleranza dimensionale



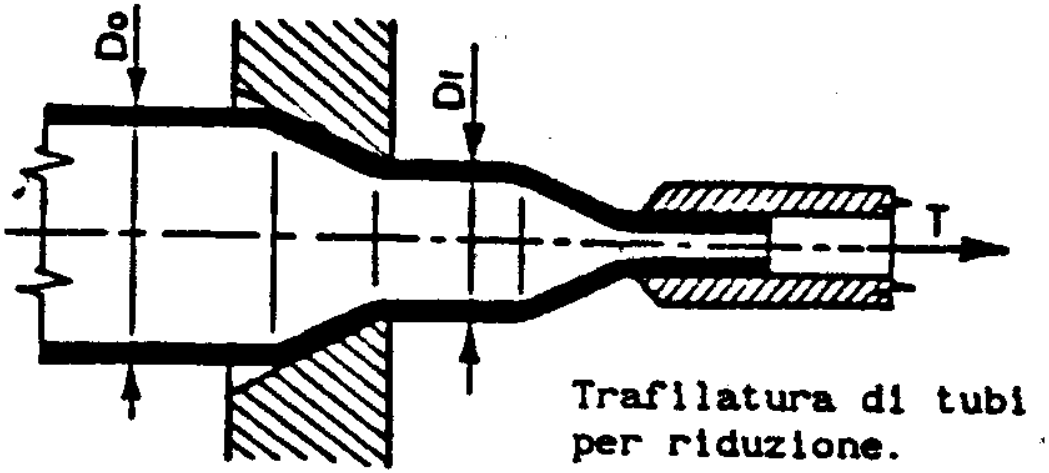
Schema di un banco di trafila per barre.

Trafilatura di tubi

- Serve per ridurre o espandere il diametro di tubi precedentemente ottenuti per laminazione, estrusione, saldatura
- Generalmente utilizzata a freddo o a caldo per ottenere tubi di grande diametro senza saldatura

Trafilatura con riduzione di diametro

- Necessario operare per più passate
- Creare un imbocco di presa a “collo di bottiglia”
- Velocità di trafila di circa 10-14 m/min
- Dimensioni lavorabili da 1mm a 400mm
- Uso di un lubrificante per operazioni a freddo



Trafilatura di tubi per riduzione.

Fucinatura

- Processo utilizzato normalmente per produrre pezzi di grandi dimensioni che non necessitano di tolleranze dimensionali troppo strette
- Consiste nella deformazione a caldo a più riprese di pezzi metallici di volta in volta riportati nelle condizioni di temperatura richieste
- Le macchine usate per fucinare sono i magli

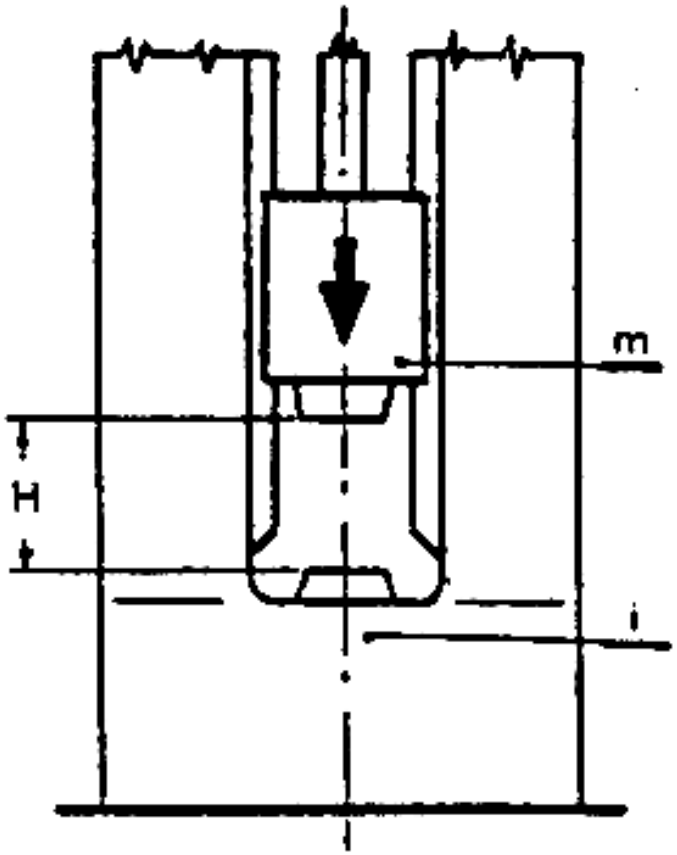
Magli

- Sono utilizzati per fucinatura e stampaggio a caldo.
- Sono costituiti da:
  - Mazza preposta alla deformazione del pezzo
  - Incudine su cui poggia il pezzo
  - Incastellatura su cui viene sollevata la mazza mediante apposite guide
- Sulla mazza e sull'incudine vengono montati utensili semplici atti a dar luogo ad operazioni di schiacciatura, arrotondamento, piegatura, taglio, ….
- La deformazione è ottenuta per trasformazione dell'energia cinetica dalla mazza:
  - In caduta libera (semplice effetto)
  - Ulteriormente accelerata da un fluido in pressione (doppio effetto)

Schema di maglio a semplice effetto

Maglio a semplice effetto.

m) mazza,
i) incudine,
H) altezza di caduta.



Stampaggio

- Consiste nell'obbligare, mediante compressione, un pezzo metallico ad occupare la cavità generata dalle due metà di uno stampo riproducente il pezzo da ottenere
- È un processo per produzione di grande serie dati gli investimenti in macchine e attrezzature
- È eseguito nella maggior parte dei casi a caldo per ridurre le forze necessarie
- Il materiale in eccesso fluisce nei canali di bava

Fasi dello stampaggio a caldo

- Riscaldo del materiale di partenza in appositi forni, teso ad aumentarne le caratteristiche plastiche
- Eventuale sbozzatura del pezzo o deformazione preliminare (p.e.: mediante fucinatura) al fine di preparare la forma per lo stampaggio finale
- Stampaggio vero e proprio a dare la forma finale
- Tranciatura delle bave formatesi
- Eliminazione di eventuali scorie superficiale (ad es. con sabbiatura)

Presse

Caratteristiche tecniche:

- Energia disponibile (J): energia fornita dalla macchina tramite il movimento dell'elemento mobile
- Forza disponibile (N): forza che la mazza può erogare sul pezzo
- Rendimento: energia disponibile/energia erogata (tiene conto delle perdite per gli attriti e le deformazioni elastiche della macchina)
- Numero di colpi nell'unità di tempo: produttività della macchina

Linea di stampaggio

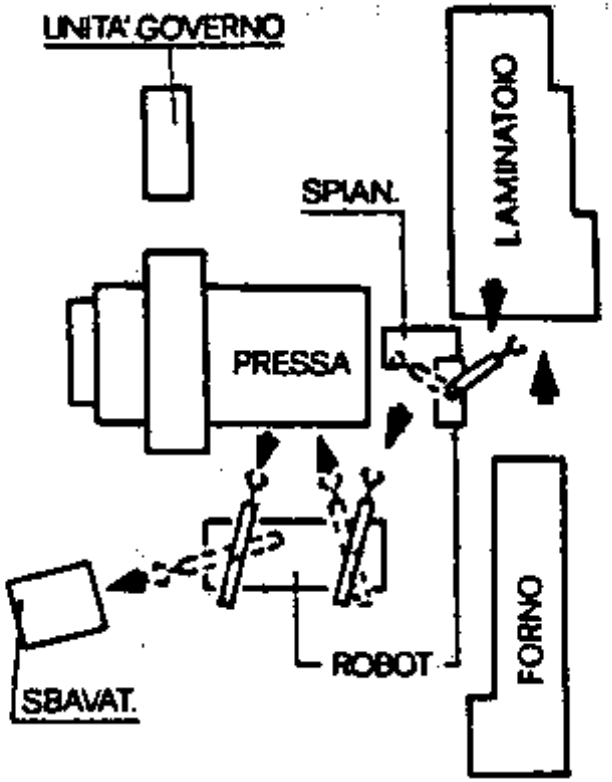


Fig. 8.29 - Esempio di linea di stampaggio automatica.

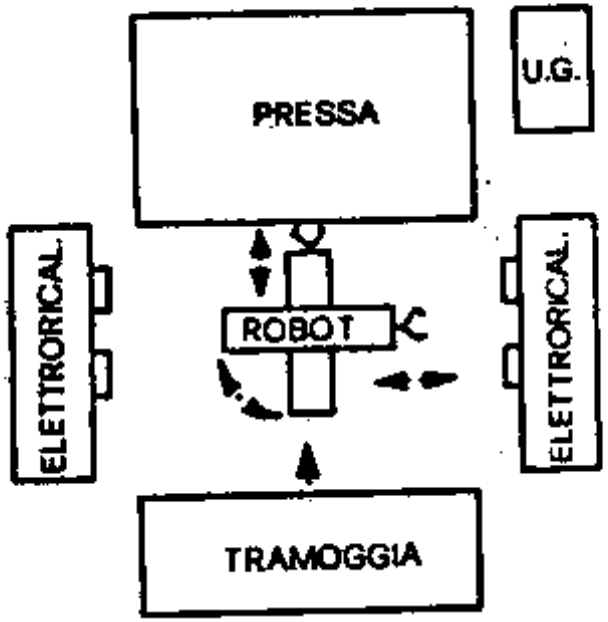


Fig. 8.30 - Altro esempio di linea di stampaggio automatica.

Progettazione stampi

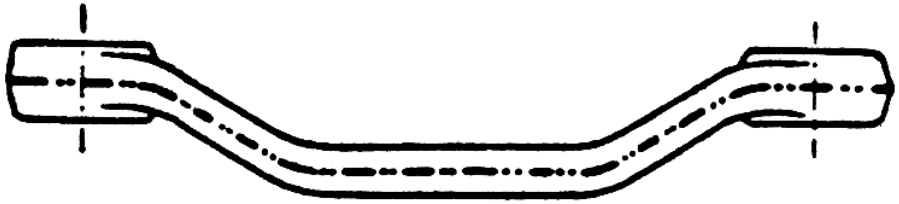
Progettazione degli stampi: piano di divisione

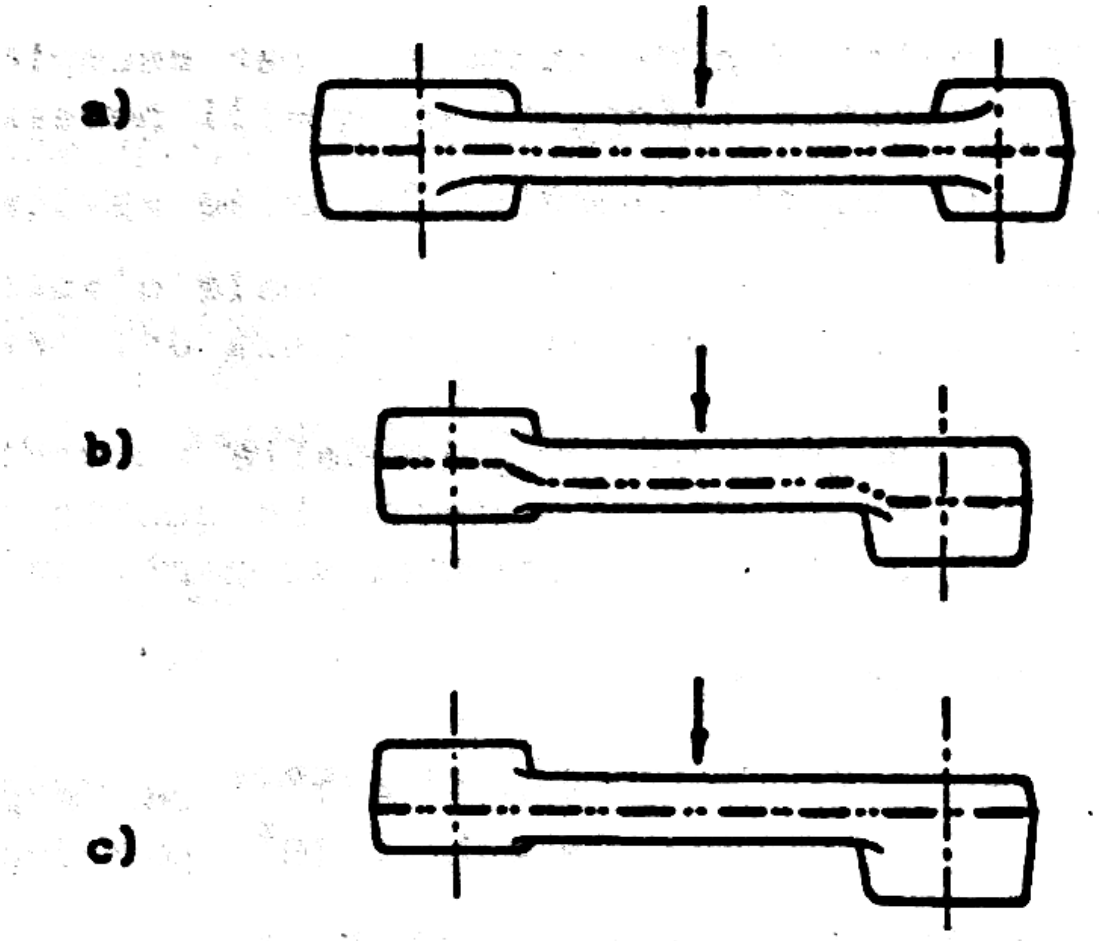
- Scelta del piano di divisione che può coincidere con:
  - Un'asse di simmetria del pezzo
  - La normale all'asse di rotazione nel caso di solidi di rivoluzione
  - Un piano ove non sussistano sottosquadri che possono essere risolti altrimenti con costosi movimenti di tasselli
  - Il piano di bava considerando la natura fibrosa del reticolo cristallino

Esempi di piani di divisione

Esempio di un pezzo con linea di bava su piu' piani.

— .. — linea bave





Esempi di scelta della linea delle bave nel caso di bielle.

— .. — linea delle bave

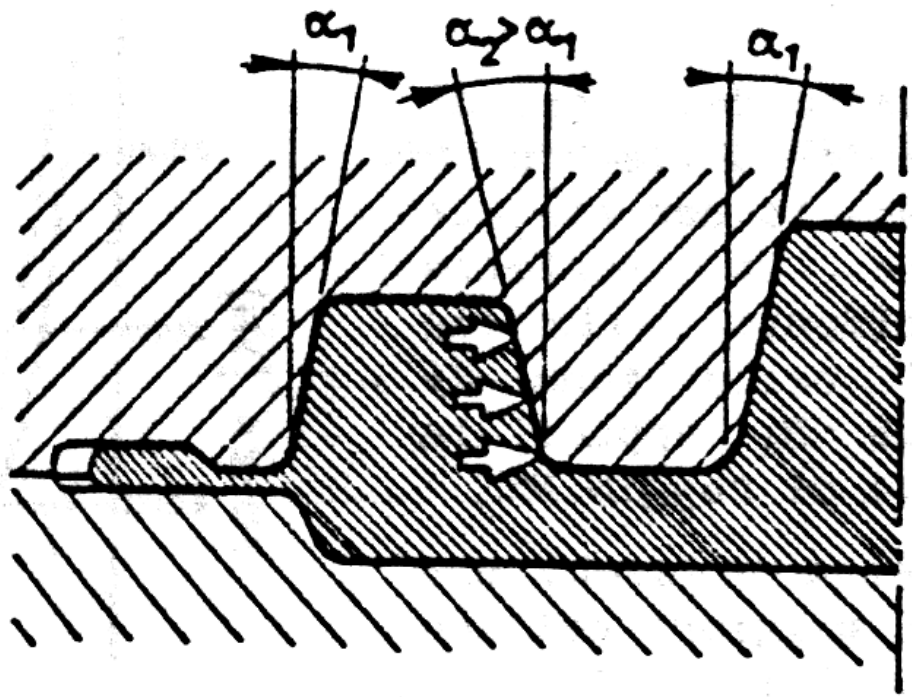
Progettazione degli stampi: sovrametalli

- Dimensionamento dei sovrametalli nel caso di successiva lavorazione su macchine utensili
- Lo spessore è da valutarsi in funzione di:
  - Dimensioni del pezzo
  - Ossidazione del materiale con la temperatura
  - Potenziali difetti superficiali
  - Eventuale irregolarità di riempimento
  - Tolleranze dimensionali
  - Problemi di ritiro
  - Tipo di macchina utilizzata per lo stampaggio
  - Tipo di lavorazioni successive (fresatura, tornitura, …)

Progettazione degli stampi: angoli di sformo

- Occorre evitare pareti di sformo perpendicolari al piano di bava mediante opportuni angoli di sformo:
  - 7-9 gradi nei casi più normali
  - 10-12 gradi nel caso di nervature con elevato rapporto altezza/spessore
- Le difficoltà maggiori esistono sulle superfici interne che sono oggetto di ritiro che, a differenza di quelle esterne, tendono ad “aggrapparsi” allo stampo

Angoli di sformo



Angoli di spoglia esterni α1
ed interni α2.

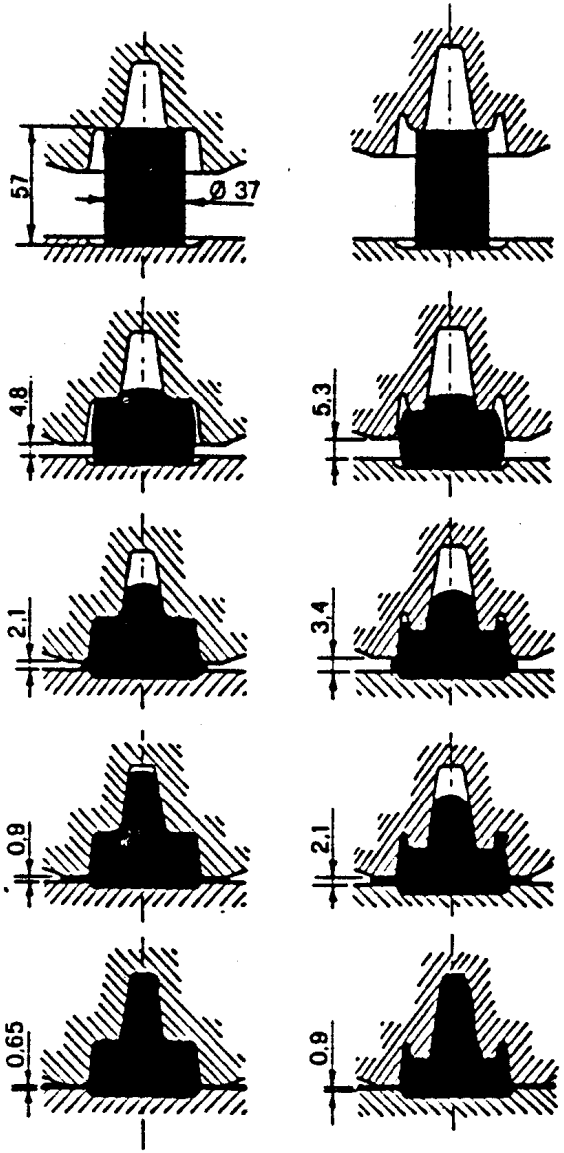
Progettazione degli stampi: raggi di raccordo

- Occorre evitare spigoli vivi ed introdurre ampi raggi di raccordo per più ragioni:
  - Diminuire i punti di concentrazione di tensioni con il rischio di cricche specie in concomitanza a fenomeni di raffreddamento
  - Facilitare il riempimento delle cavità dello stampo riducendo dunque la forza necessaria
  - Evitare distacchi del materiale dalle pareti dello stampo che possono dar luogo a difetti
  - Uno spigolo vivo nello stampo è sempre soggetto a fenomeni di usura sia meccanica sia termica

Progettazione degli stampi: il canale di bava

- Il canale di bava è una ‘appendice’ tra le due metà dello stampo di forma opportuna atta a più funzioni:
  1. Raccogliere il materiale in eccedenza previsto per poter riempire con certezza tutta la forma
  2. Favorire il completo riempimento dello stampo
  3. Formare un cuscinetto di materiale che impedisce l’urto tra stampi durante la chiusura

Due esempi di riempimento di stampi dotati di camera scartabava.



Progettazione degli stampi: fori e cavità

- Fori e cavità passanti non possono essere ottenuti direttamente per stampaggio. Occorre prevedere una fase successiva di tranciatura, di fatto già necessaria per l'eliminazione delle bave

Sbavatura e generazione di fori e cavità passanti

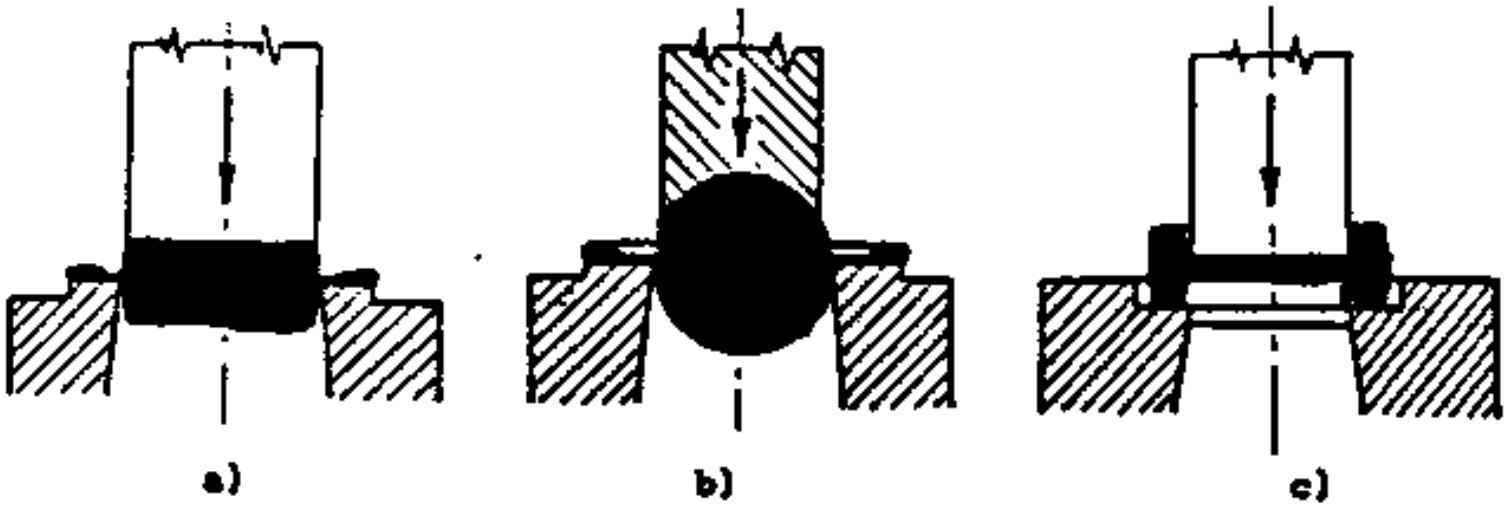


Fig. 8.28 - Esempi di tranciatura di bave esterne ed interne.

Progettazione degli stampi: passaggi intermedi

- Raramente è possibile realizzare un pezzo finito partendo dal materiale grezzo in una sola operazione; molto più spesso è necessario operare con passaggi successivi
- Ciò comporta studiare le operazioni che è necessario compiere in successione per arrivare al prodotto desiderato

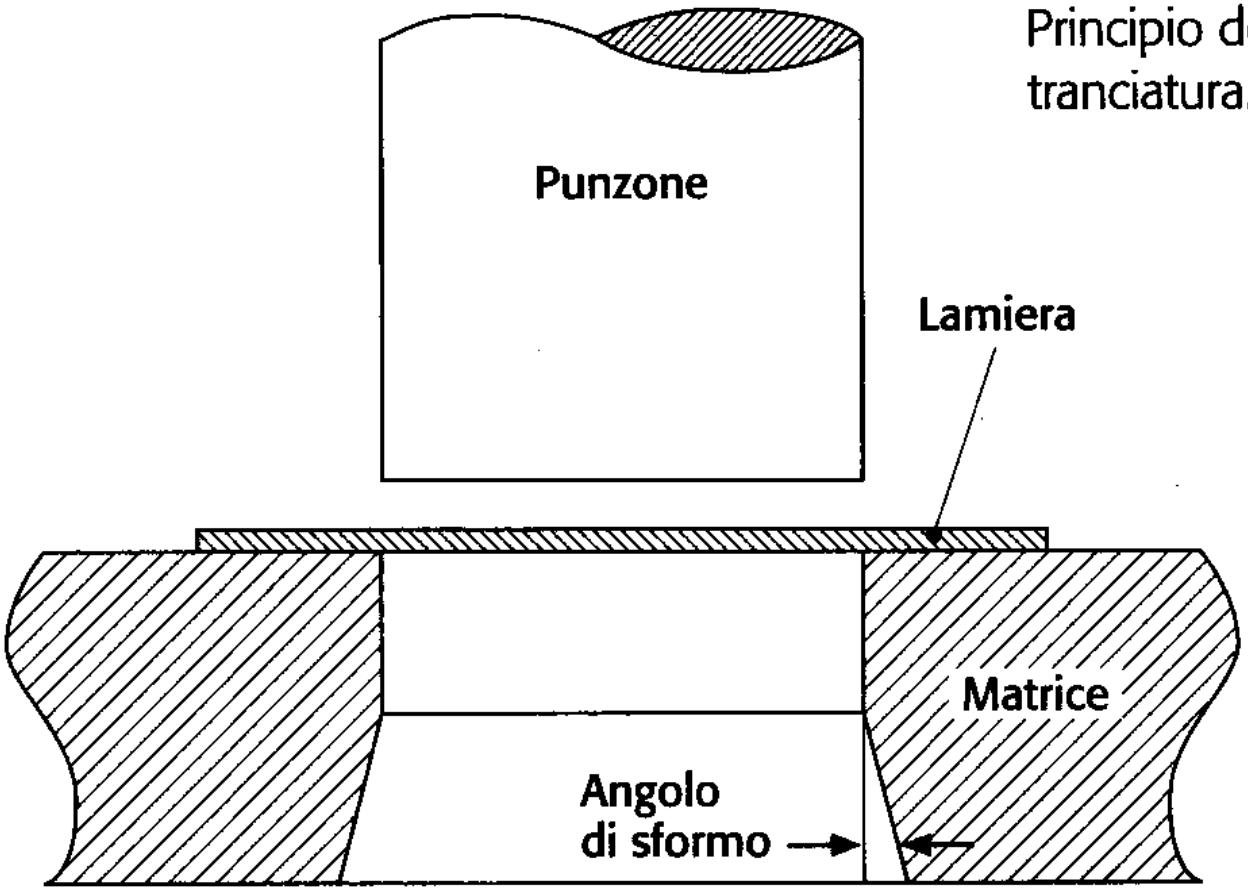
Lavorazione a freddo delle lamiere

- È il processo più diffuso per la produzione di grande serie di componentistica metallica tipica del settore automobilistico, degli elettrodomestici e delle attrezzature in generale.
- Più in dettaglio, le lavorazioni delle lamiere sono di:
  - Tranciatura o punzonatura
  - Piegatura
  - Imbutitura
  - Curvatura o calandratura
  - Profilatura

Tranciatura

- È un'operazione in grado di tagliare sezioni piane prefissate di lamiera in quadrotti o nastri
- Viene eseguita su una pressa grazie ad uno stampo composto da due parti:
  - Matrice vincolata alla parte fissa della pressa
  - Punzone solidale con la slitta
- Il punzone penetra nella lamiera e la attraversa asportando un profilo di materiale di sagoma pari alla sezione del punzone

Tranciatura



Principio della tranciatura.

Punzonatura e tranciatura

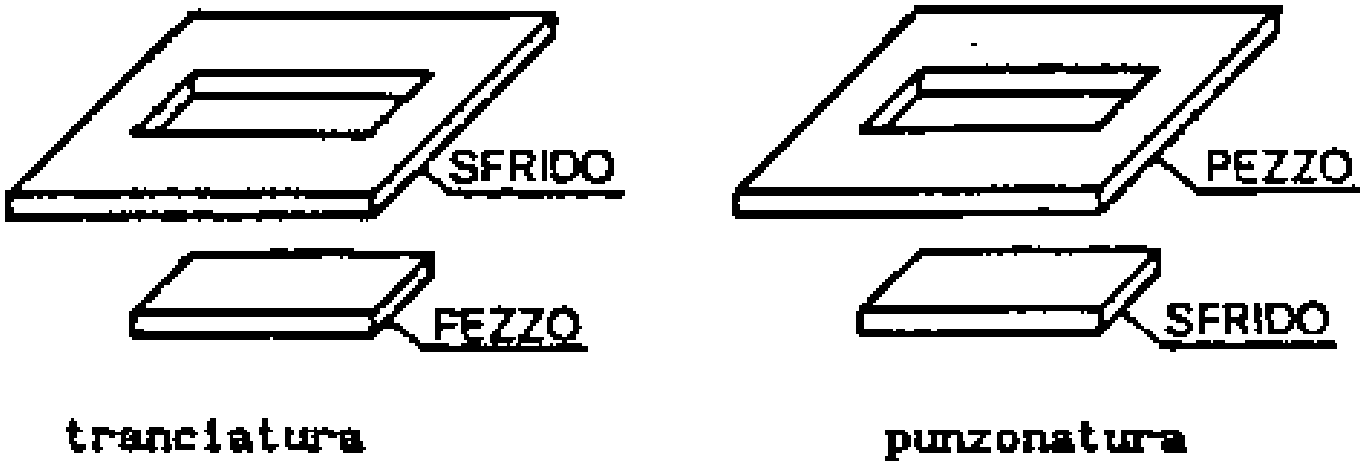
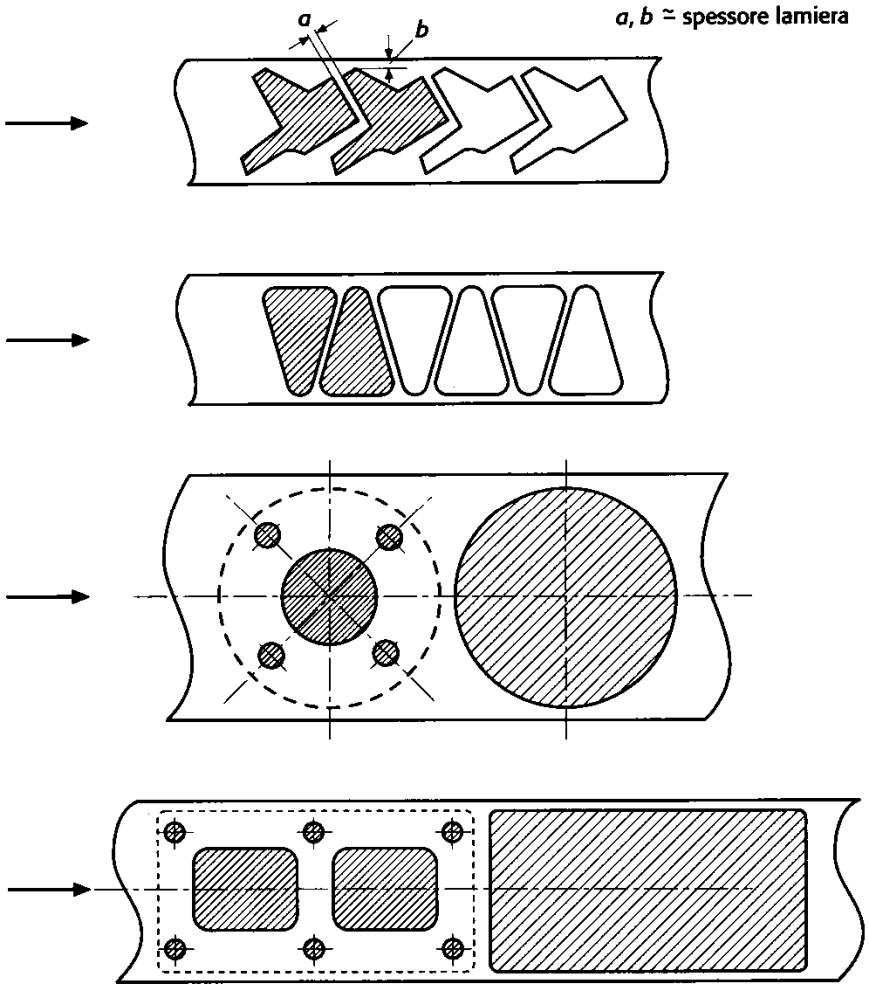


Fig. 9.14 - Differenza fra tranciatura e punzonatura.

Stampo “progressivo”

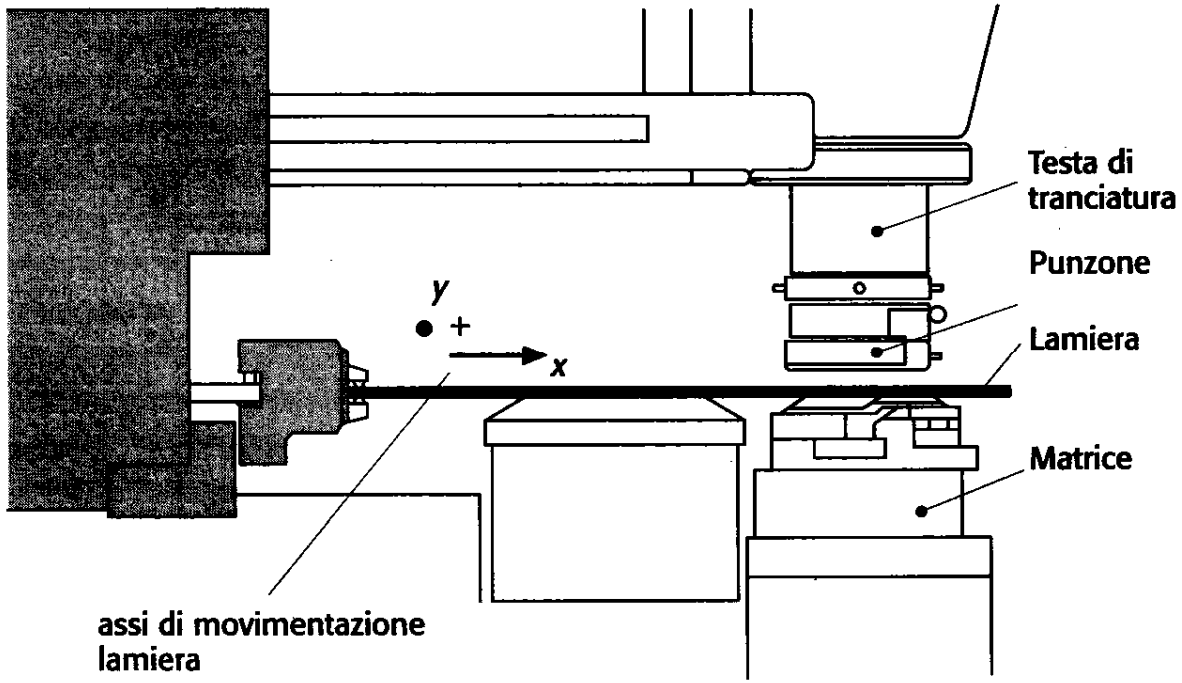


Esempi di tranciatura progressiva.

Tranciatura su centri di lavorazione lamiere

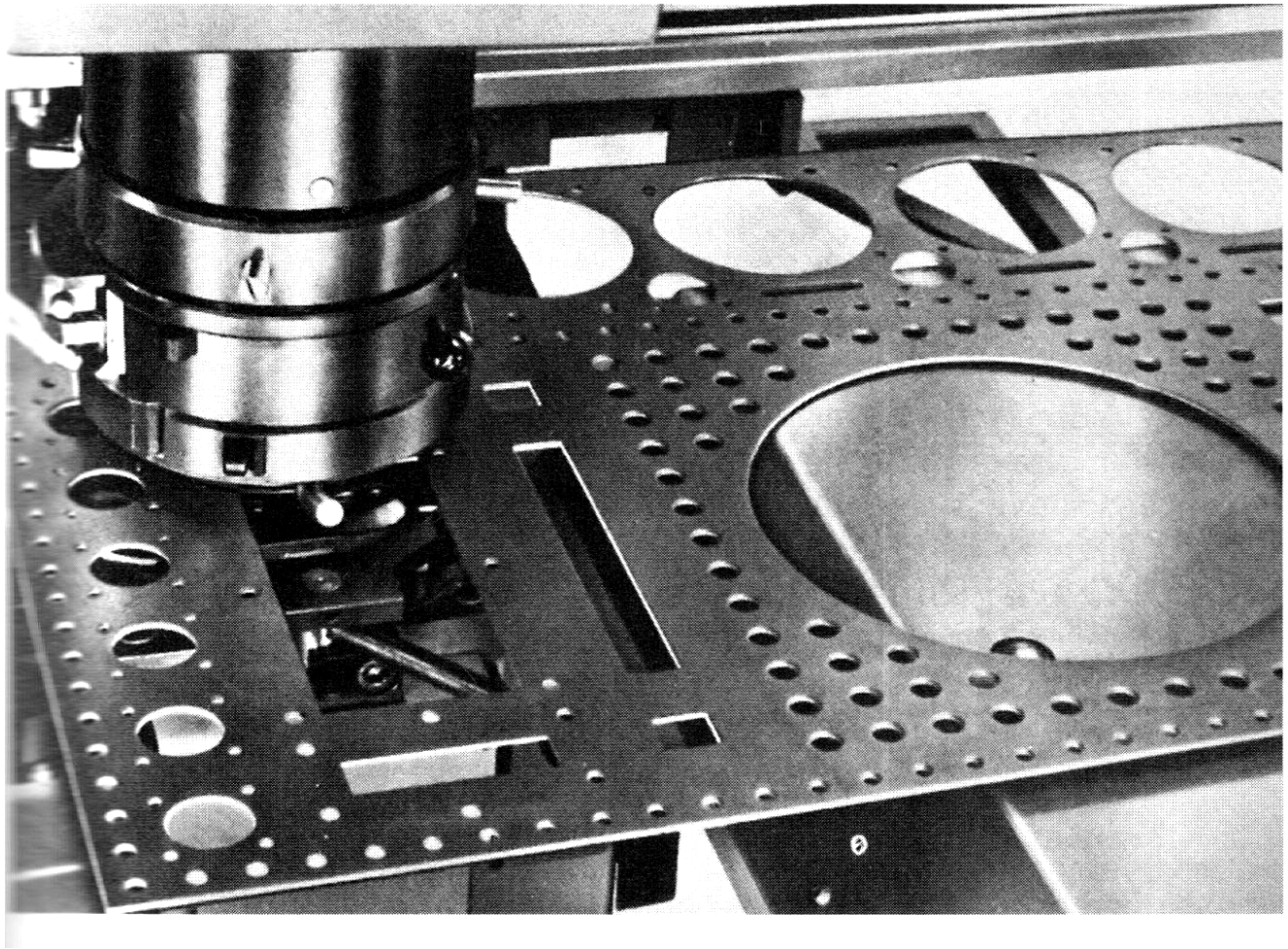
- I centri di lavoro a controllo numerico possono essere utilizzati ove non risulta conveniente un grande investimento in stampi
- Il magazzino di punzoni e matrici del centro di lavoro consente di ottenere con una traiettoria definita punto-punto su un piano x-y una grande varietà di sagome anche complesse di tranciatura.
- Esistono anche teste di taglio laser per sagome molto complesse

Centro di lavorazione lamiera



Schema semplificato di un centro di lavorazione della lamiera a controllo numerico, in fase di tranciatura.

Centro di lavorazione lamiera



Imbutitura

- È il processo mediante il quale una lamiera piana viene sagomata secondo rilievi tridimensionali anche complessi
- È un processo utilizzato in gran parte nell'industria automobilistica, degli elettrodomestici e dei contenitori
- Gli stampi prevedono la presenza di un premilamiera ad evitare possibili grinze in corrispondenza di imbutiture profonde
- Vengono generalmente utilizzate presse oleodinamiche

Schema di imbutitura

- Disporre la lamiera piana su una matrice
- Bloccaggio della lamiera mediante l'applicazione di un premilamiera
- Un punzone mobile provvede a deformare il materiale e farlo scorrere entro il gioco previsto tra matrice e punzone
- Gli spigoli devono essere sufficientemente arrotondati

Schema di imbutitutra

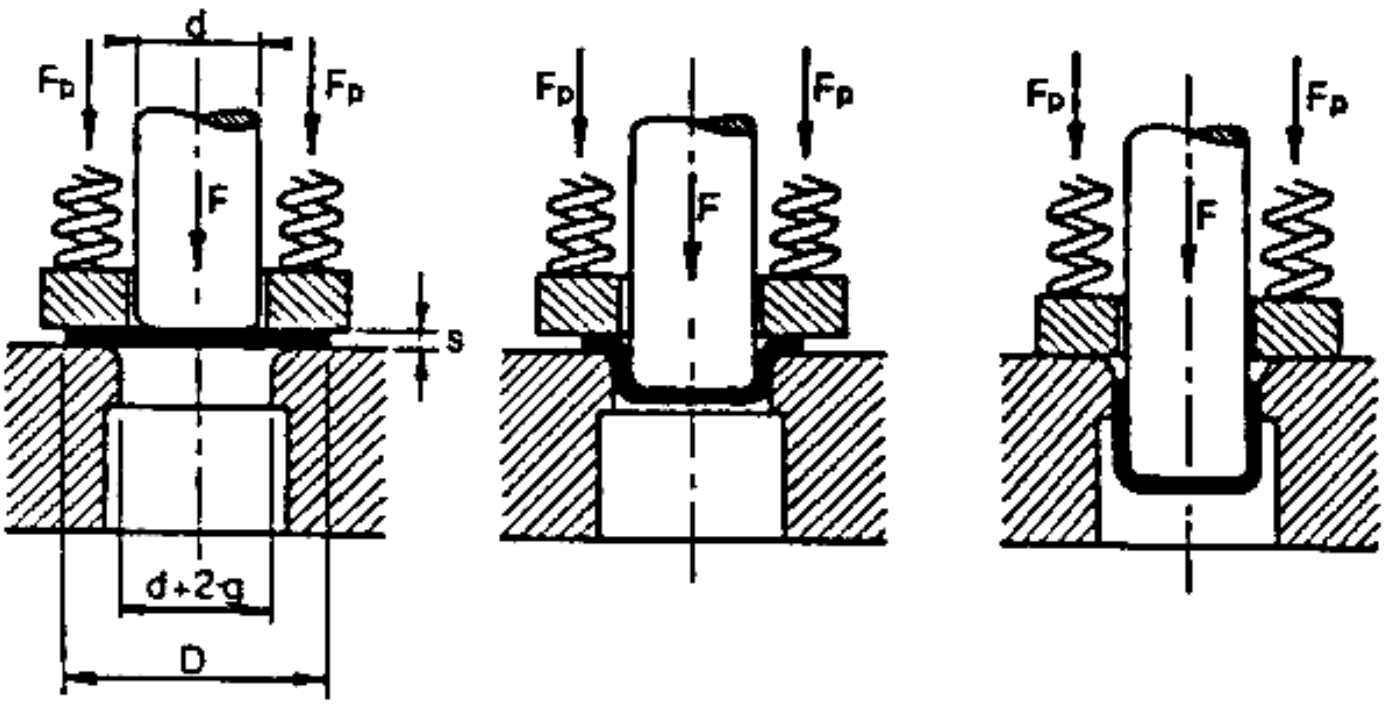


Fig. 9.27 - Schema di un'operazione di imbutitura.

Coniatura

- processo di imbutitura caratterizzato da:
  - Minima profondità di deformazione
  - Costanza dello spessore
- Consente anche di effettuare un'operazione di calibratura, ovvero migliorare la qualità dimensionale del pezzo
- Non sono ammessi giochi per evitare qualunque ritorno elastico del materiale

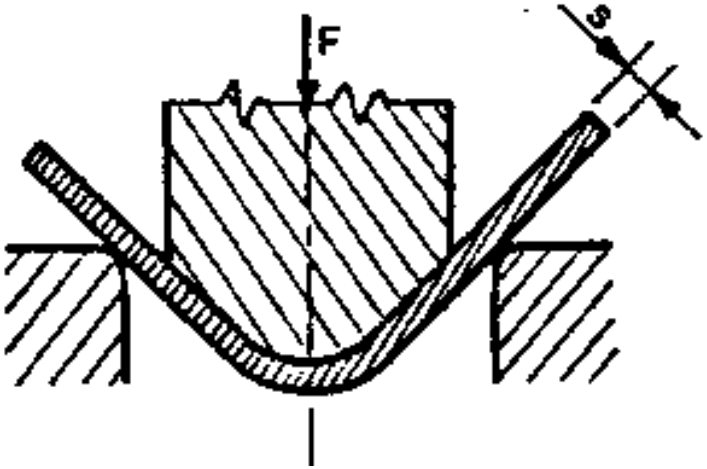
Piegatura

- La lamiera viene piegata localmente mediante stampi, rulli, punzoni
- È normalmente l'operazione che segue la tranciatura quando il pezzo preveda una sagoma non piana
- Esistono due tipi di piegatura:
  - Libera ovvero senza l'uso di uno stampo specifico, bensì solo mediante l'appoggio della lamiera su dei supporti e l'azione deformante di un punzone
  - In stampo quando la sagoma non è banale e necessita di uno stampo vero e proprio composto da matrice e punzone

Piegatura libera

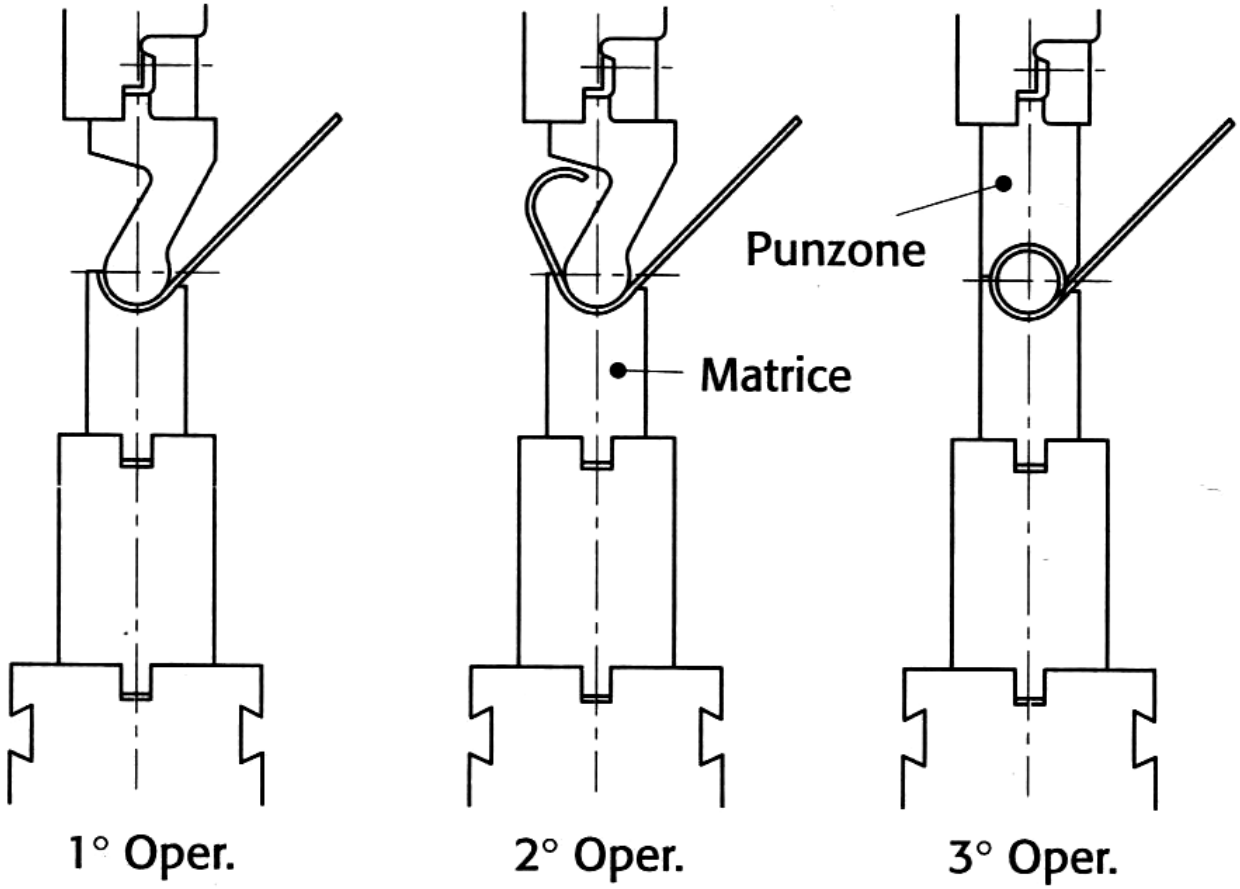
Fig. 9.2

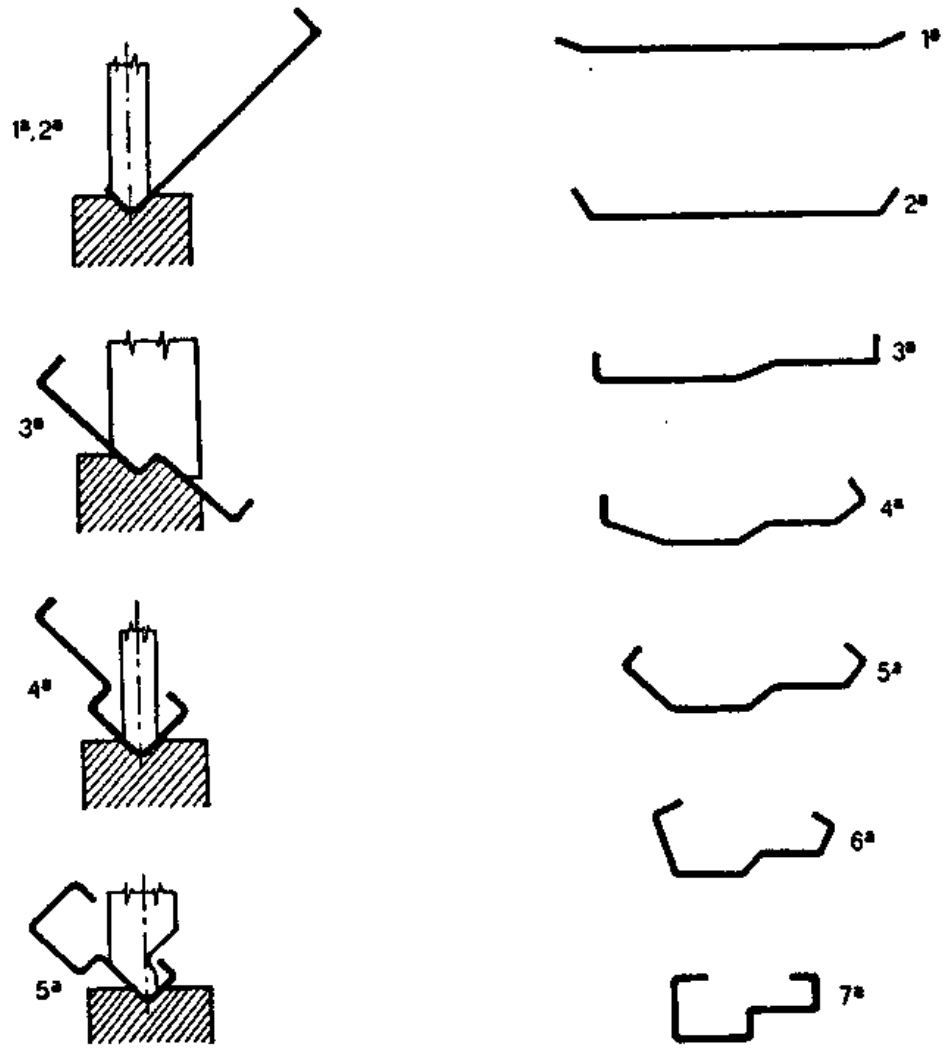
Esempio di piegatura libera.



Piegatura in più passaggi

e)





piegatura alla pressa **profilatura a rulli**

Fig. 9.12 - Sequenza delle fasi nella piegatura alla pressa e nella profilatura a rulli.

(La 3ª operazione di piegatura puo' essere fatta in due passaggi con punzoni analoghi a quelli della 1ª e 2ª operazione).

Curvatura o calandratura

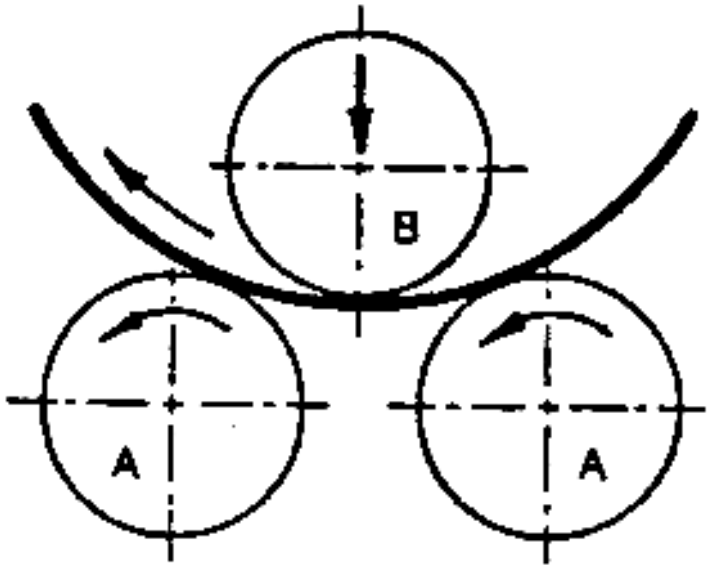
- Consiste nel curvare una superficie piana al fine di ottenere un cilindro
- La lamiera è fatta passare tra gabbie di cilindri a distanze regolabili in modo da definire il raggio di curvatura (diametro del cilindro)

Calandratura

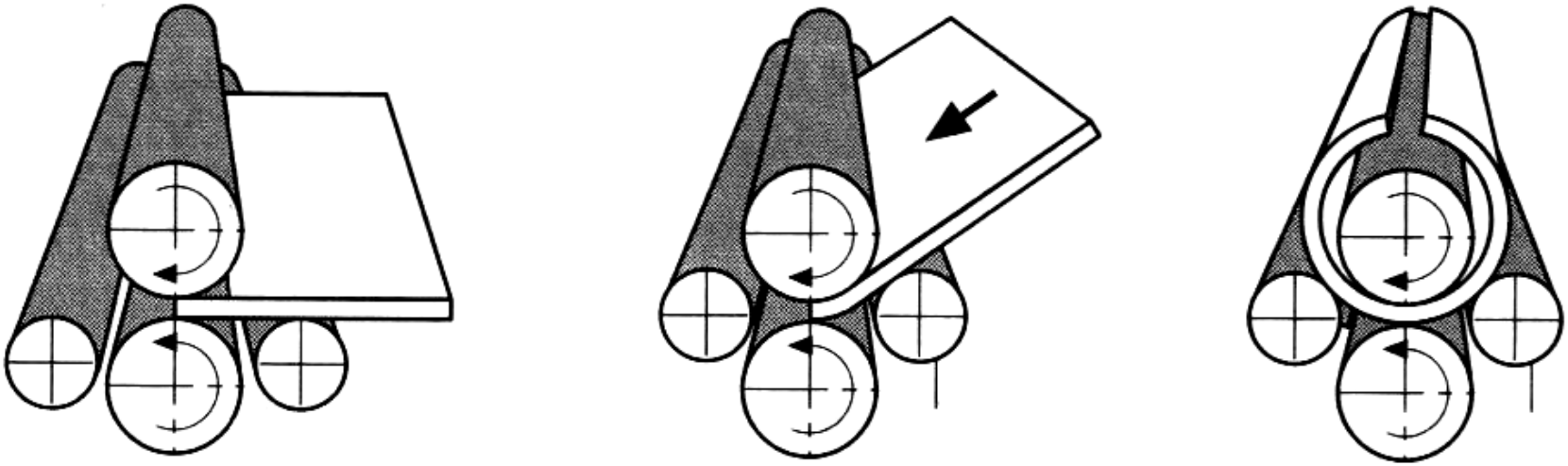
Fig. 9.13

Schema della curvatura.

A) cilindri motori,
B) cilindro con moto verticale.



Calandratura



d)