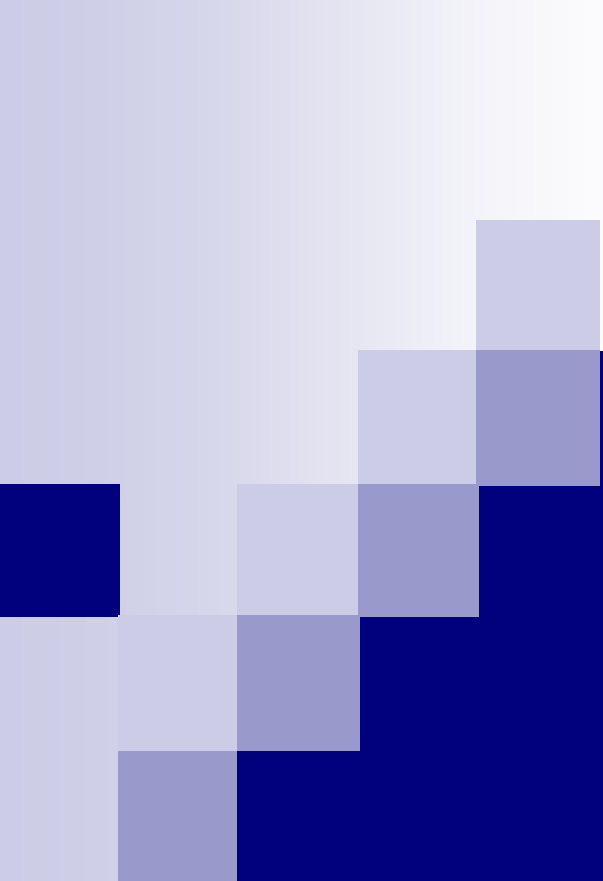
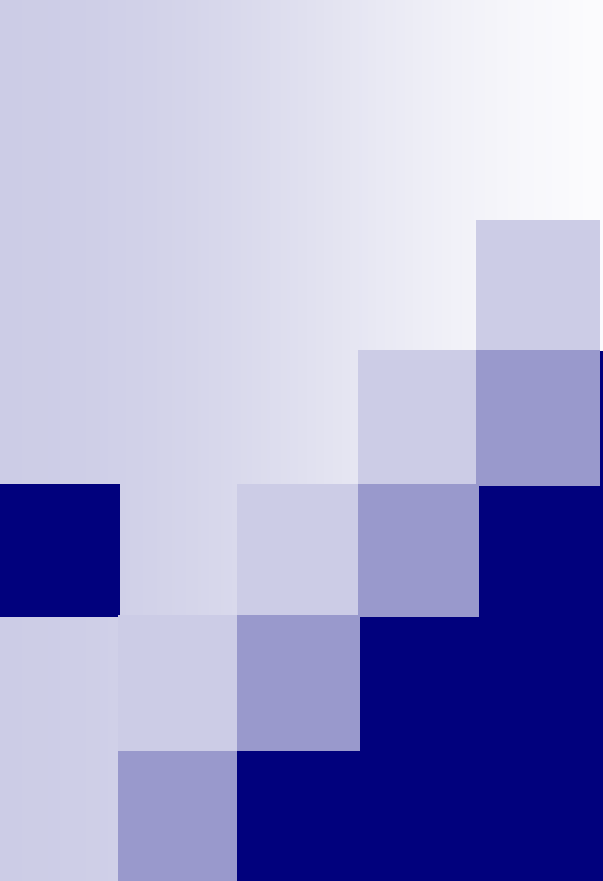




Corso di Tecnologia Meccanica

Modulo 3.2

Deformazione plastica

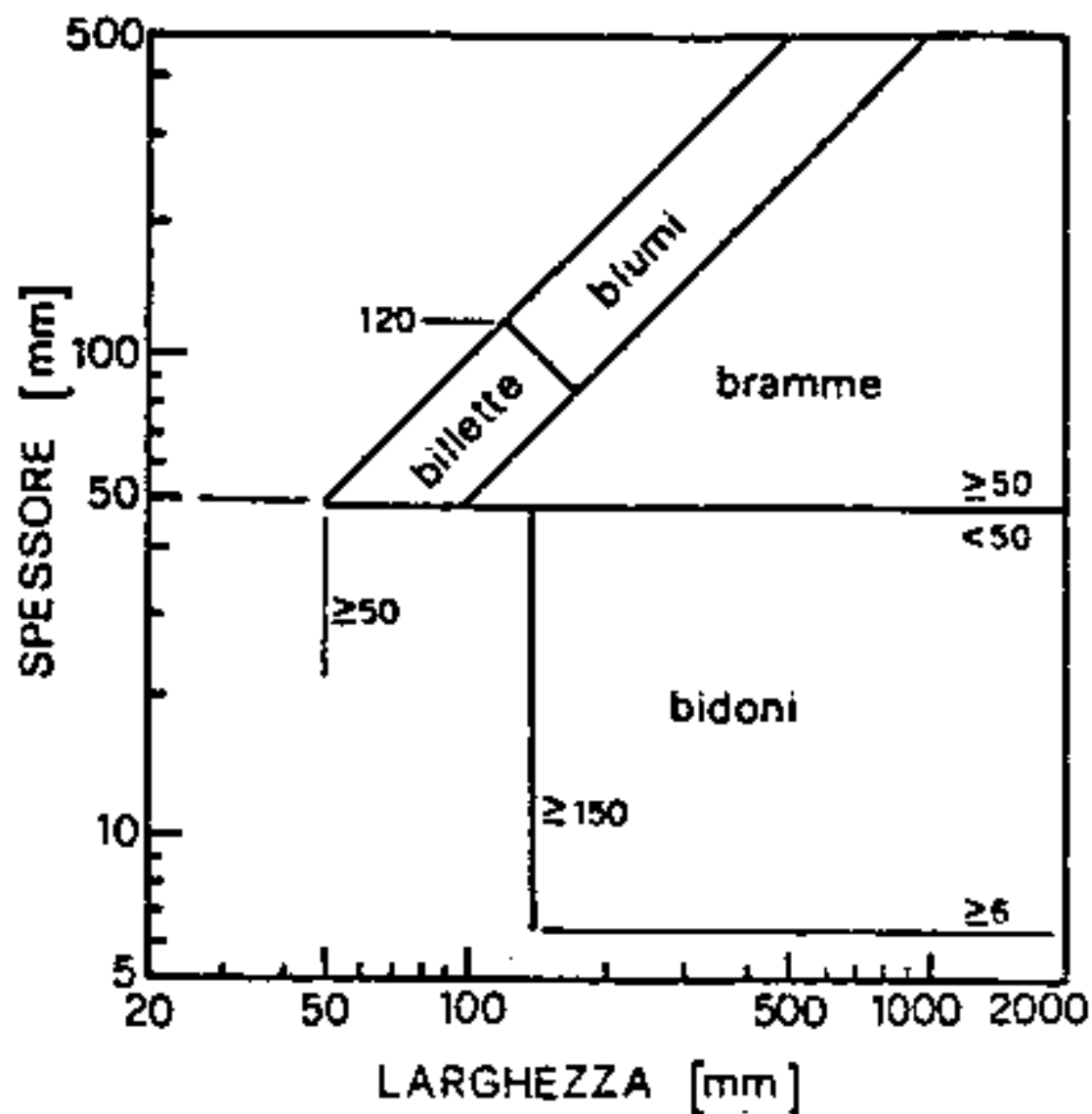


Laminazione

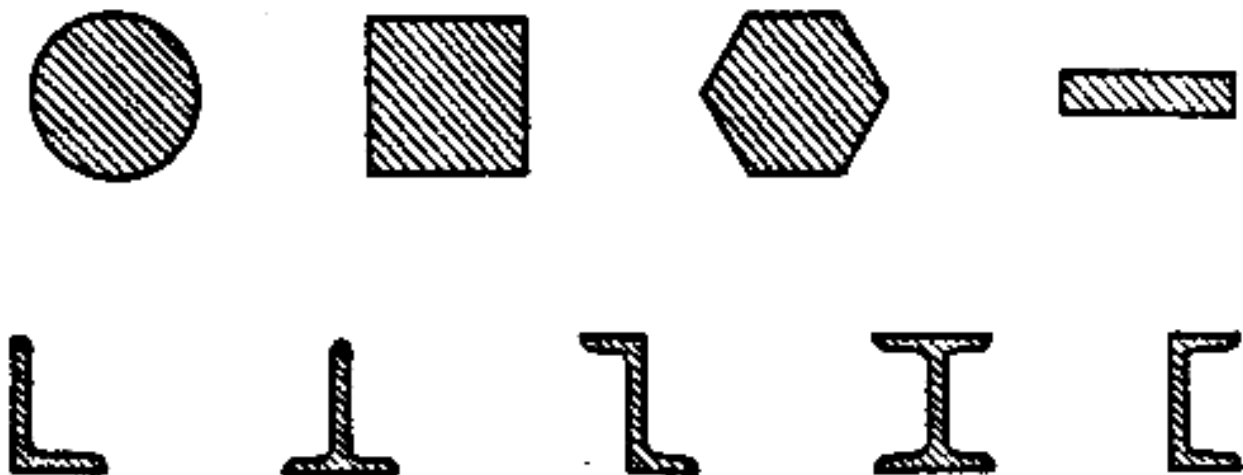
Laminazione

- 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, ottagonale e piatti
 - Lamiere: in tutti i formati, sottili (<3 mm) e grosse (>3 mm) in fogli
 - Vergella: tondino con diametro nominale > 5 mm in rotoli
 - Travi: ad I, H, U, T, L
 - Nastri: avvolti in rotolo, larghi (>600 mm) o stretti (<600 mm)
 - Materiale ferroviario

Classificazione dei
semilavorati.



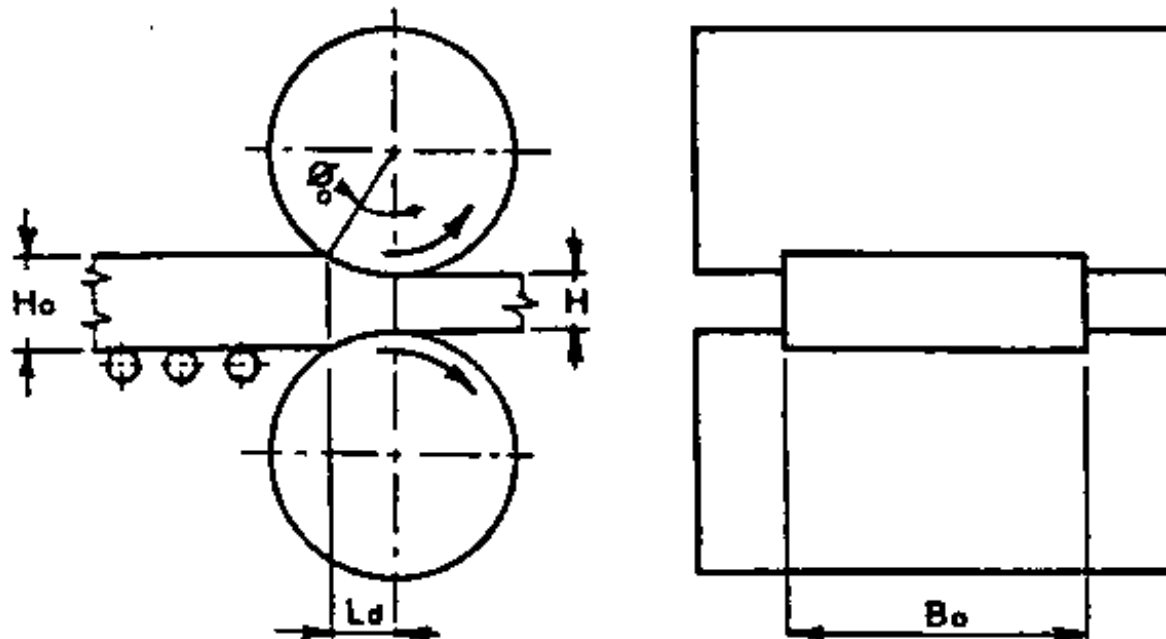
Principali forme
dei laminati com
merciali.



Laminazione

- La laminazione viene effettuata a caldo tranne che nel caso di lamiere di spessore inferiore ad 1 mm.
- La struttura cristallina disomogenea del metallo viene trasformata in una struttura a grani allungati
- Consiste nel passaggio di un pezzo di sezione rettangolare attraverso due cilindri laminatori ruotanti in senso opposto, subendo uno schiacciamento, un allungamento ed un allargamento

Schema di laminazione



Schema della laminazione.

H_0, H = spessore iniziale, finale del laminando,
 B_0 = larghezza iniziale del laminando,
 L_d = lunghezza della zona di deformazione,
 ϕ_0 = angolo di primo contatto.

Calibratura

- E' lo studio delle sezioni delle incisioni sui cilindri (calibri) al fine di realizzare le forme dei laminati
- Conoscendo:
 - ☐ la sezione di partenza e quella di arrivo
 - ☐ le caratteristiche dell'impianto
 - ☐ le condizioni di allargamento e di trascinamento
 - ☐ il coefficiente di riduzione
- Si determina il numero di passaggi per ottenere la sezione voluta nelle tolleranze stabilite cercando inoltre di:
 - ☐ Ottimizzare l'uso dell'impianto
 - ☐ Ridurre i costi di ciclo
 - ☐ Limitare l'usura dei cilindri

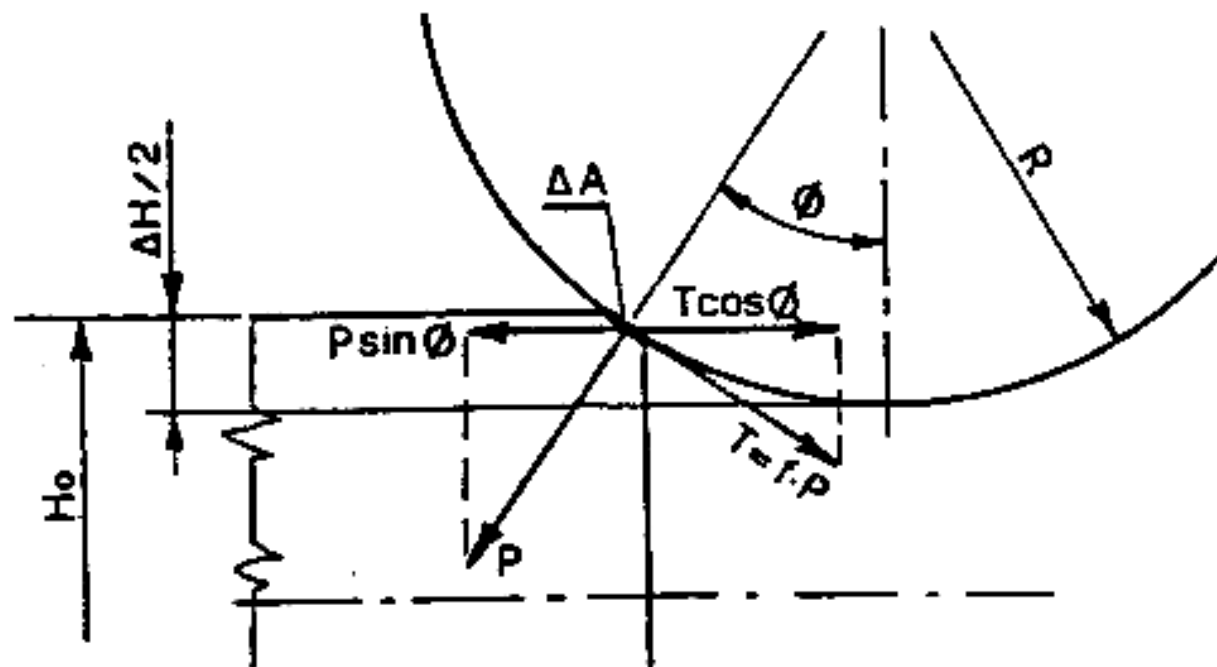
Norme di riferimento

- Sagomando le luci tra i cilindri è possibile ottenere prodotti di varie sezioni:
- La classificazione di tutti i prodotti, se realizzati in acciaio è definita nella tabella UNI 7272 conforme alla EURONORM79

Laminazione piana

- È essenziale approfondire temi quali:
 - La natura del contatto superficie deformante (cilindro) e corpo deformato
 - Gli elementi geometrici del binomio cilindro-laminando:
 - Diametro D del cilindro
 - Zona di contatto L_d con il pezzo
 - Spessore H del laminando
 - Larghezza B del contatto tra cilindro e pezzo

Condizioni di tra-
scinamento nella
laminazione plana.



Condizione di trascinamento

- Dallo schema precedente si evidenzia la condizione di trascinamento:

$$-P \sin \phi + T \cos \phi \geq 0$$

$$T / P \geq \operatorname{tg} \phi$$

$$T / P = f$$

$$f \geq \operatorname{tg} \phi$$

$$\cos \phi \cong \cos \phi_0 = \frac{R - \Delta H / 2}{R}$$

Trascinamento

- Se la condizione individuata viene soddisfatta permangono le condizioni di trascinamento e tutto il materiale viene ad attraversare i rulli
- Il coefficiente di attrito viene ad assumere esigenze contraddittorie:
 - Deve essere elevato per agevolare il trascinamento
 - Il fatto che sia elevato comporta un aumento di P e dunque della potenza necessaria per la lavorazione

Coefficiente di attrito

- Il coefficiente di attrito è calcolato sperimentalmente e nel caso di laminazione a caldo di acciai è dato dall'espressione:

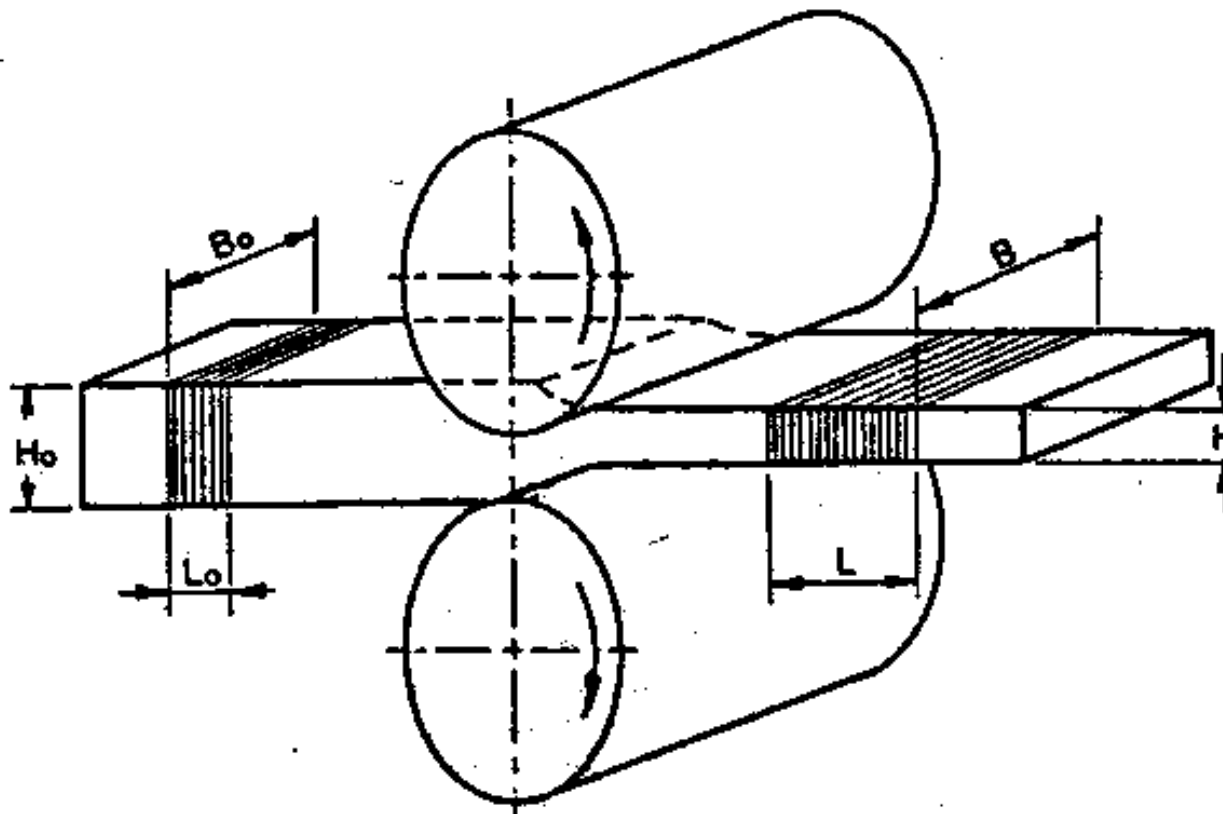
$$f = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot (1,05 - 0,0005T)$$

$$\lambda_1 = \begin{cases} 1,00 & \text{per cilindri in acciaio} \\ 0,80 & \text{per cilindri in ghisa dura} \\ 0,55 & \text{per cilindri in acciaio rettificati} \end{cases}$$

$$\lambda_2 = 0,4 + 0,6 \cdot e^{[-0,2 \cdot (v-2)]}$$

$$\lambda_3 = \begin{cases} 0,82 & \text{per acciai per utensili legati} \\ 1,00 & \text{per acciai a basso tenore di carbonio} \\ 1,10 & \text{per acciai rapidi} \\ 1,40 & \text{per acciai austenitici} \end{cases}$$

Stato di deformazione



Laminazione piana: costanza del volume.

Stato di deformazione

- Dalla figura precedente è facile intuire che in ogni caso sarà:

$$H \leq H_0$$

$$L \geq L_0$$

$$B \geq B_0$$

- Il comportamento del laminato sarà tuttavia diverso a seconda che:

$H_m / L_d < 1$ ovvero sezione sottile

$H_m / L_d \cong 1$ ovvero sezione media

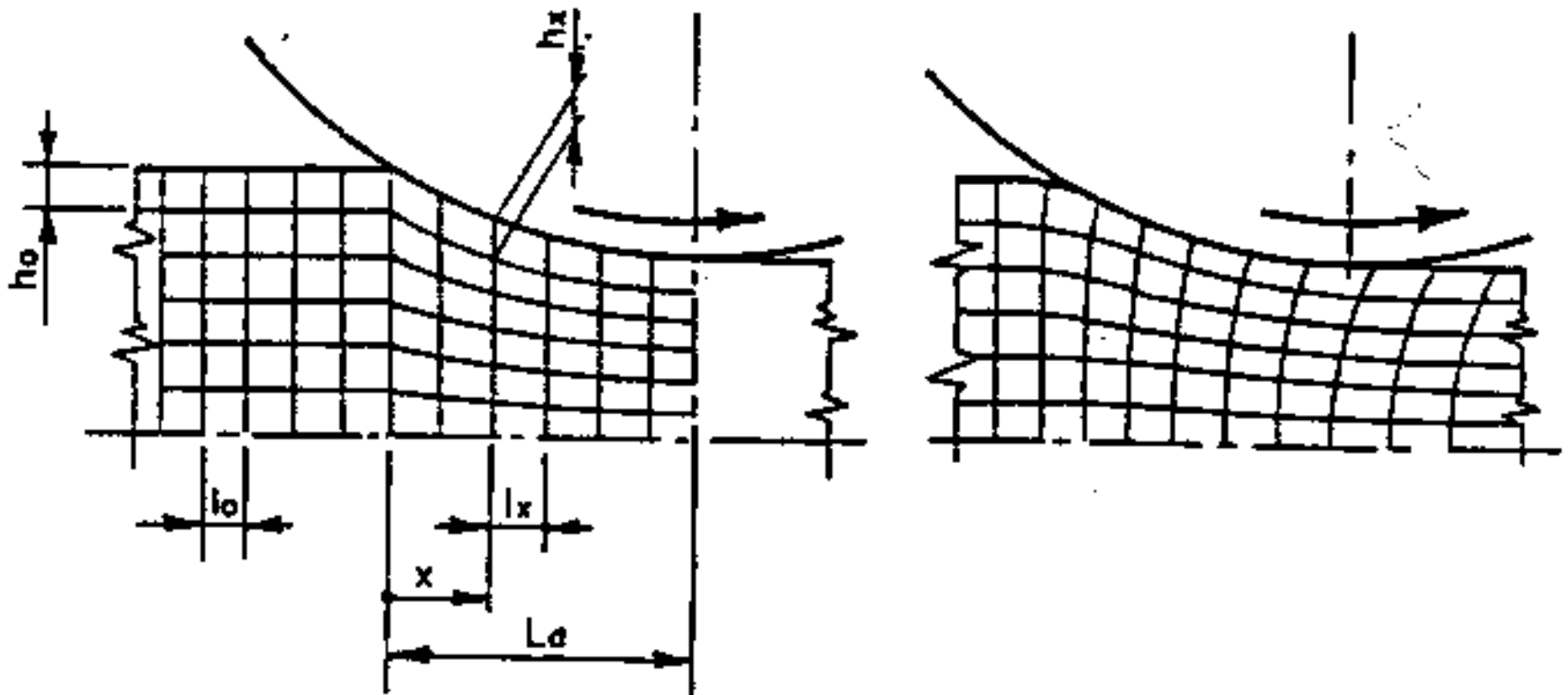
$H_m / L_d > 1$ ovvero sezione spessa

ove

L_d = lunghezza della zona di deformazione

H_m = spessore medio tra ingresso e uscita

Deformazione teorica ed effettiva

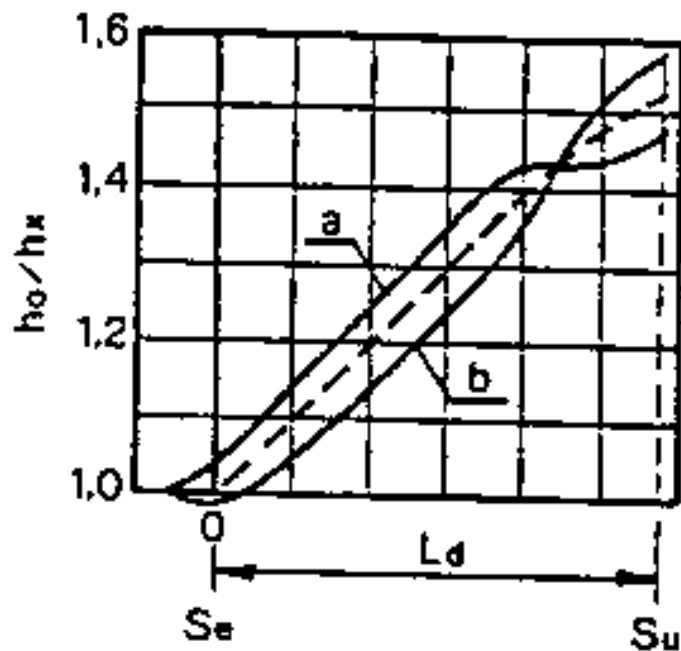


deformazione teorica (omogenea)

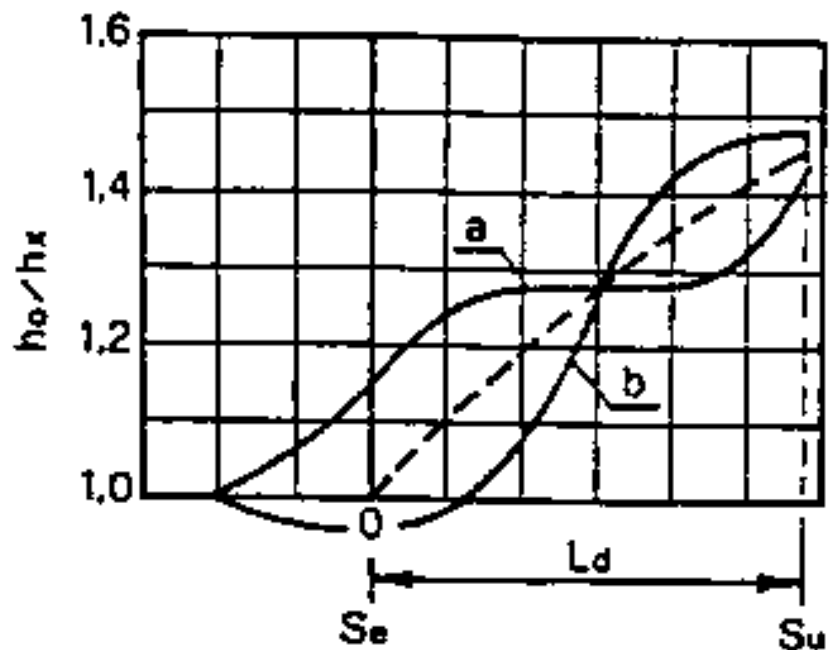
deformazione effettiva

Deformazione del reticolo nella laminazione piana.

Grafici di deformazione



$$H_a/L_d \ll 1$$

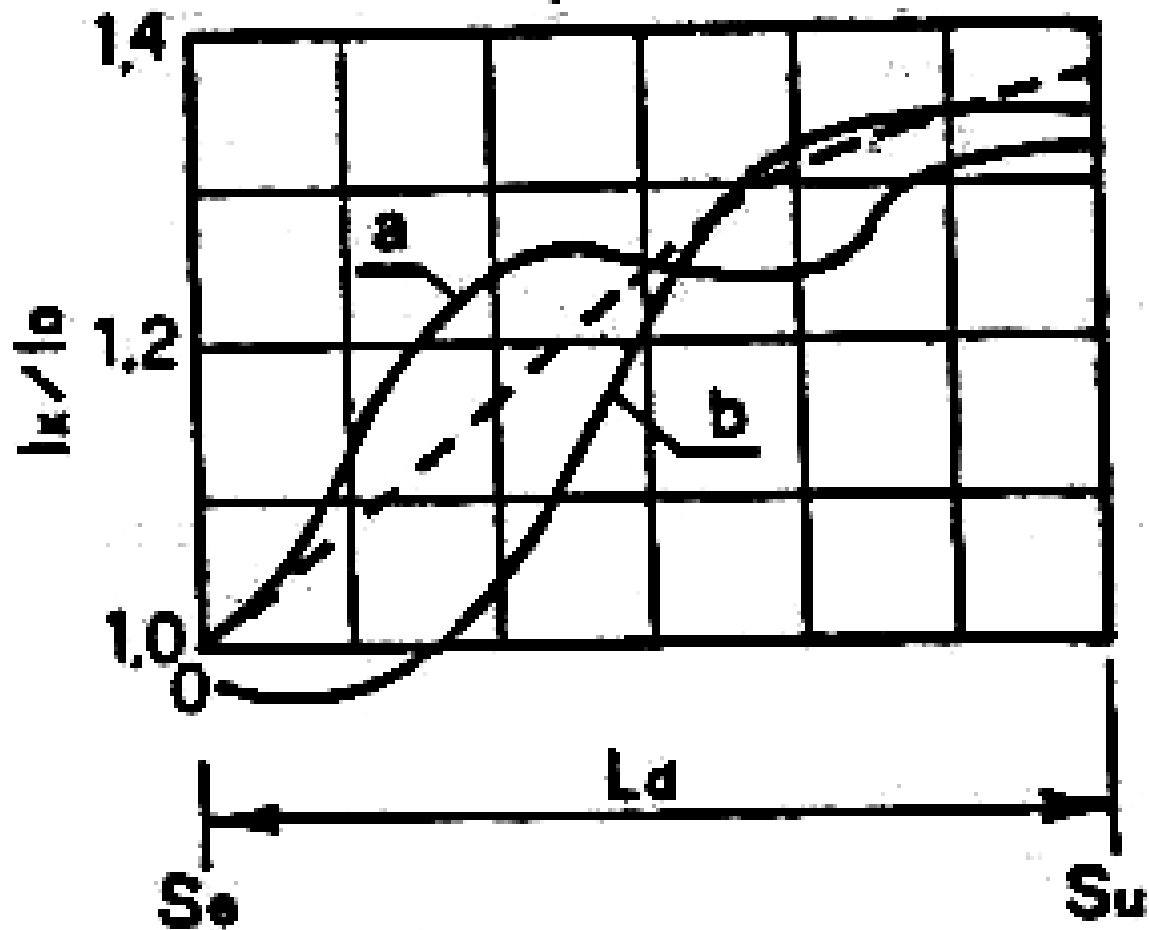


$$H_a/L_d \approx 1$$

Andamento della deformazione del reticolo
 curve a: strati a contatto col cilindro,
 curve b: strati centrali,
 - - - -: deformazione omogenea.

Osservazioni

1. Per sezioni sottili le curve a (strati a contatto con i cilindri) e b (strati centrali) si discostano poco dalla deformazione teorica (linea tratteggiata)
2. Al crescere dello spessore delle sezioni le curve a e b si discostano molto dall'andamento teorico
3. La deformazione del laminando comincia prima dell'ingresso della sezione nei cilindri



**Deformazione longitudinale
del reticolo.**

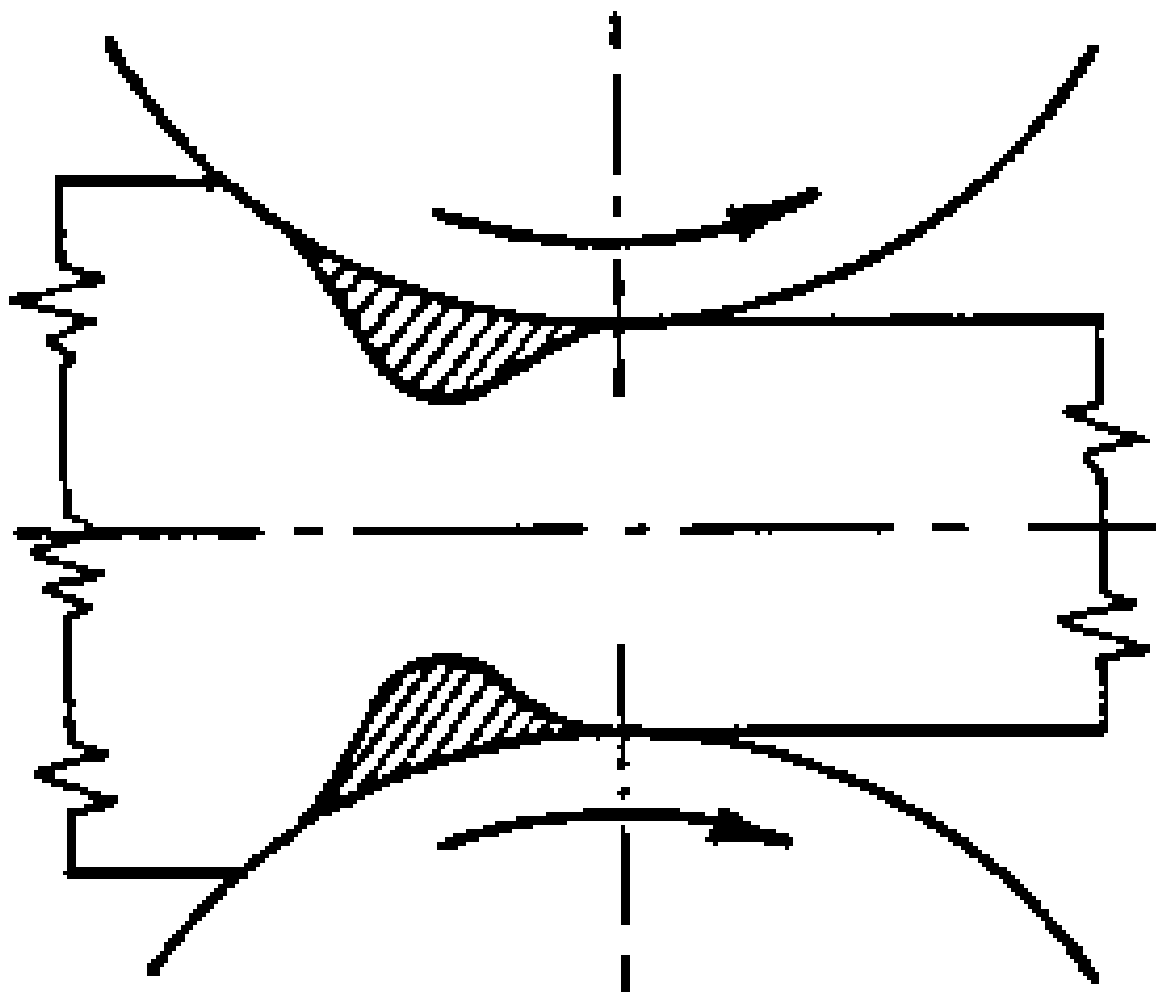
Considerazioni

1. Per sezioni sottili la deformazione del materiale tende ad essere omogenea
2. Lo strato aderente al cilindro tende, al crescere dello spessore della sezione e dopo una rapida deformazione iniziale, ad aderire al cilindro stesso e non subire deformazioni nella parte centrale. Tale aderenza decresce e svanisce all'avvicinarsi agli strati centrali
3. Il comportamento longitudinale del materiale è del tutto simile a quello visto per la singola sezione

Considerazioni sull'aderenza

■ L'aderenza quindi:

- Aumenta al crescere della sezione ed è tanto maggiore per sezioni spesse
- Aumenta, a parità di altezza media del laminando, al decrescere del diametro dei cilindri
- Aumenta al crescere del coefficiente di attrito tra cilindro e laminando



Zone di aderenza.

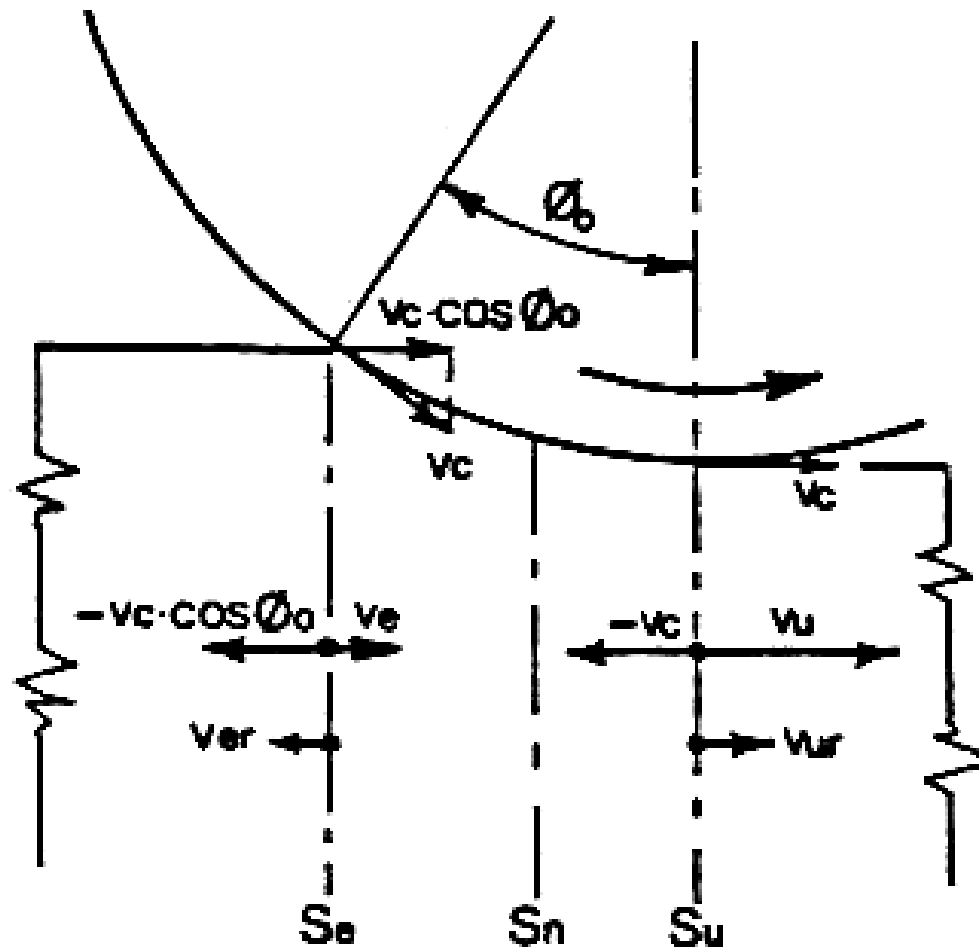
Velocità del materiale nella zona di deformazione

- Per ogni particella vanno considerate più componenti:
 - Longitudinale: nella direzione della laminazione
 - Verticale: nella direzione della compressione
 - Trasversale: nella direzione normale al piano definito dalle altre 2 componenti (ha un valore limitato e normalmente trascurabile)

Definizione della velocità

- A tal fine è possibile fare delle osservazioni di tipo sperimentale, sulla singola particella di materiale che:
 - Possiede, prima della sezione di ingresso nei cilindri, una velocità inferiore alla velocità periferica dei cilindri stessi v_c
 - Aumenta la sua velocità al progressivo ingresso nella zona di plasticizzazione
 - All'uscita dai cilindri possiede una velocità superiore a v_c

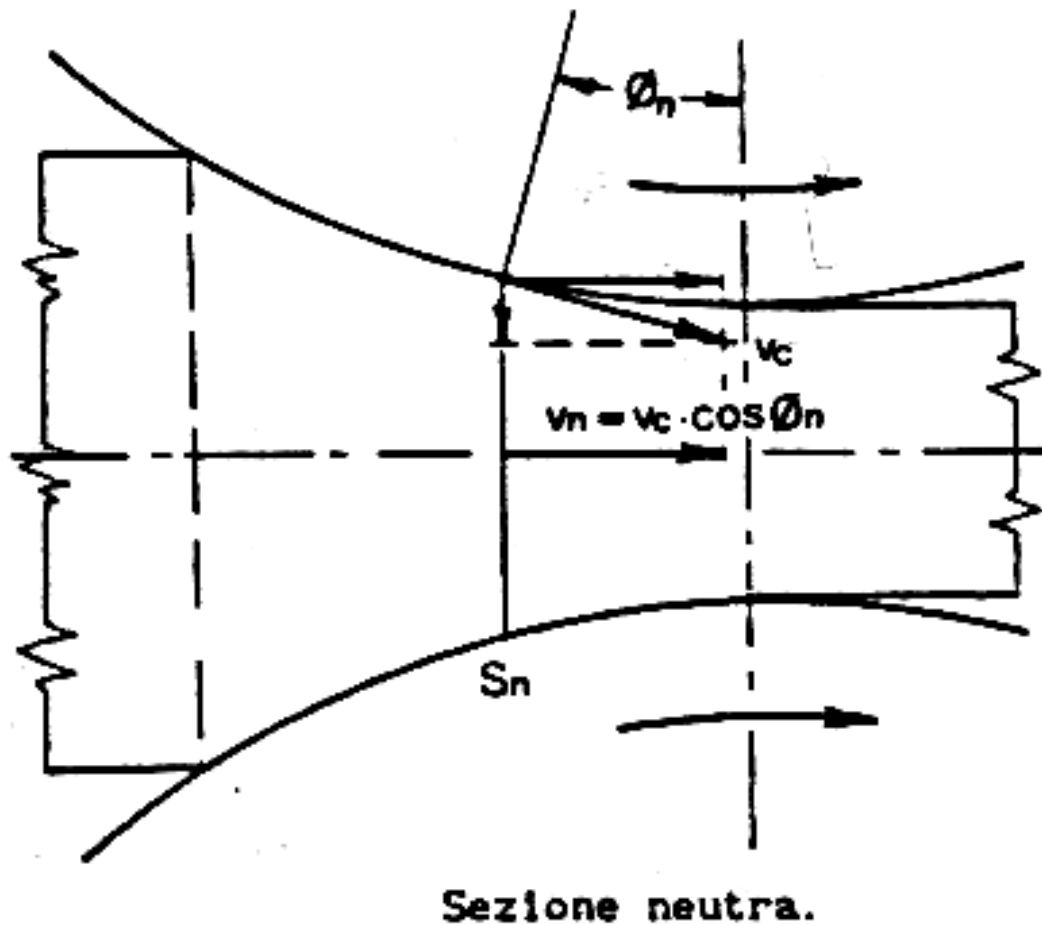
Velocita' relative laminan=
do-cilindro.



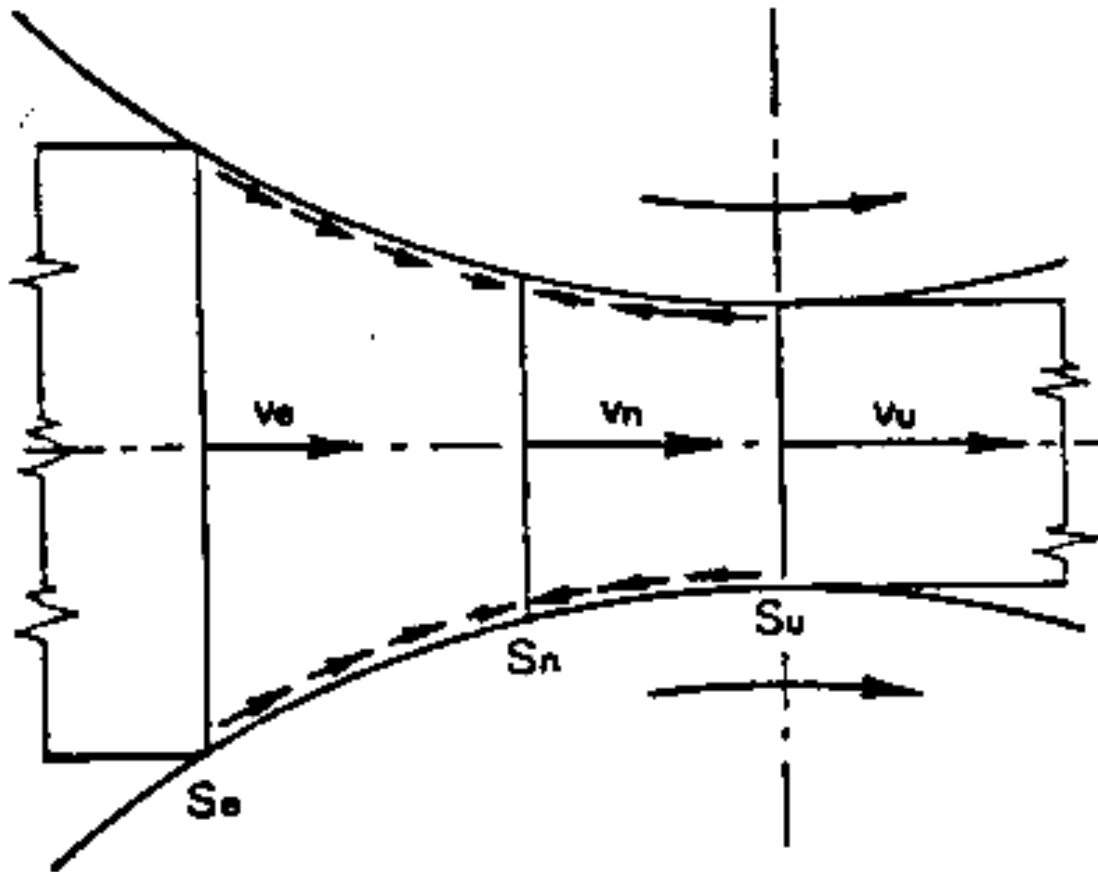
1° caso: sezione sottile

- La deformazione è omogenea e la deformazione risulta piana
- Esiste solo la componente longitudinale
- Si può in tal caso supporre che esiste una sezione neutra S_n tra S_e ed S_u ove la velocità del laminando è uguale a quella dei cilindri
- In tal caso si avranno 2 situazioni:
 - tra S_e ed S_n la velocità del materiale è inferiore a quella del rullo e quest'ultimo esercita un'azione positiva nel senso di accelerare la velocità del materiale
 - tra S_n ed S_u la velocità del materiale è superiore a quella del rullo e quest'ultimo esercita un'azione positiva nel senso di decelerare la velocità del materiale

1° caso: sezione sottile



2° caso: sezione media



Sollecitazioni di attrito.

2° caso: sezione media

- La deformazione non è più omogenea e bisogna considerare le componenti della velocità nella direzione longitudinale

2° caso: sezione media

- Nella sezione S_e il materiale possiede, rispetto al cilindro una velocità relativa rivolta verso sinistra pari a:

$$V_{er} = V_e - V_c \cdot \cos \phi_0$$

- Nella sezione S_u il materiale possiede, rispetto al cilindro una velocità relativa rivolta verso destra pari a:

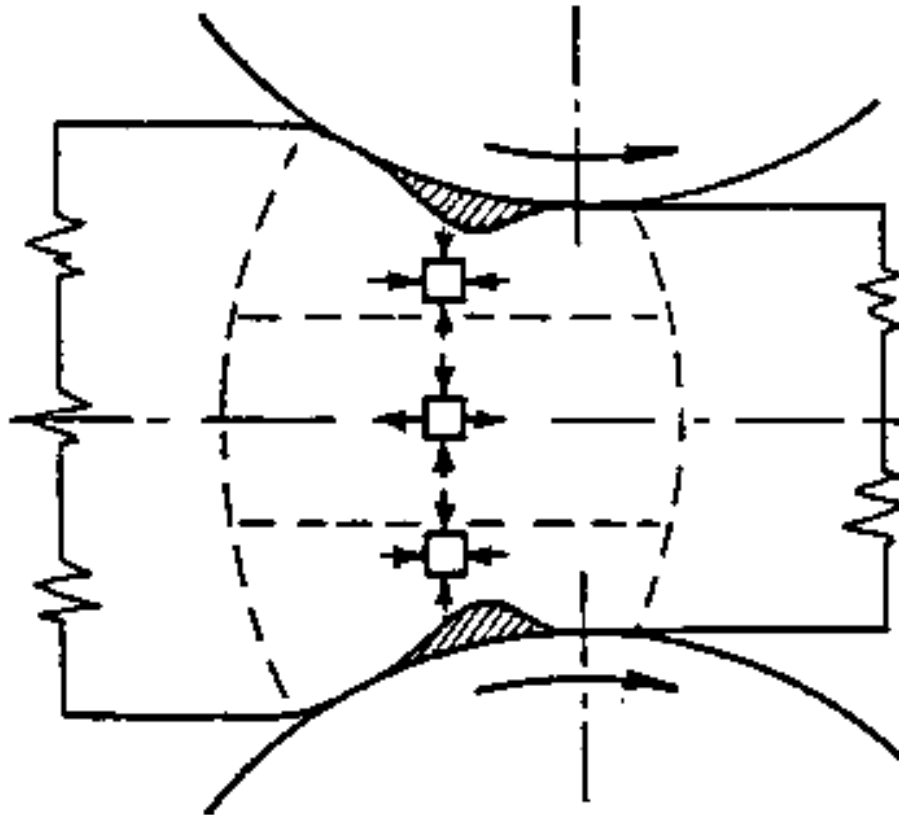
$$V_{ur} = V_u - V_c$$

- Nella sezione S_n non sussiste alcuna velocità relativa

3° caso: sezione spessa

- In tale caso il materiale fluisce anche in direzione trasversale
- I vari strati di materiale si deformano in modo diverso
- L'aderenza del materiale al cilindro è estesa a quasi tutta la lunghezza del contatto
- La zona di plasticizzazione è estesa ben oltre le sezioni di ingresso ed uscita

3° caso: sezione spessa



Stato di sollecitazione e zona di plasticizzazione in un laminando a sezione spessa.

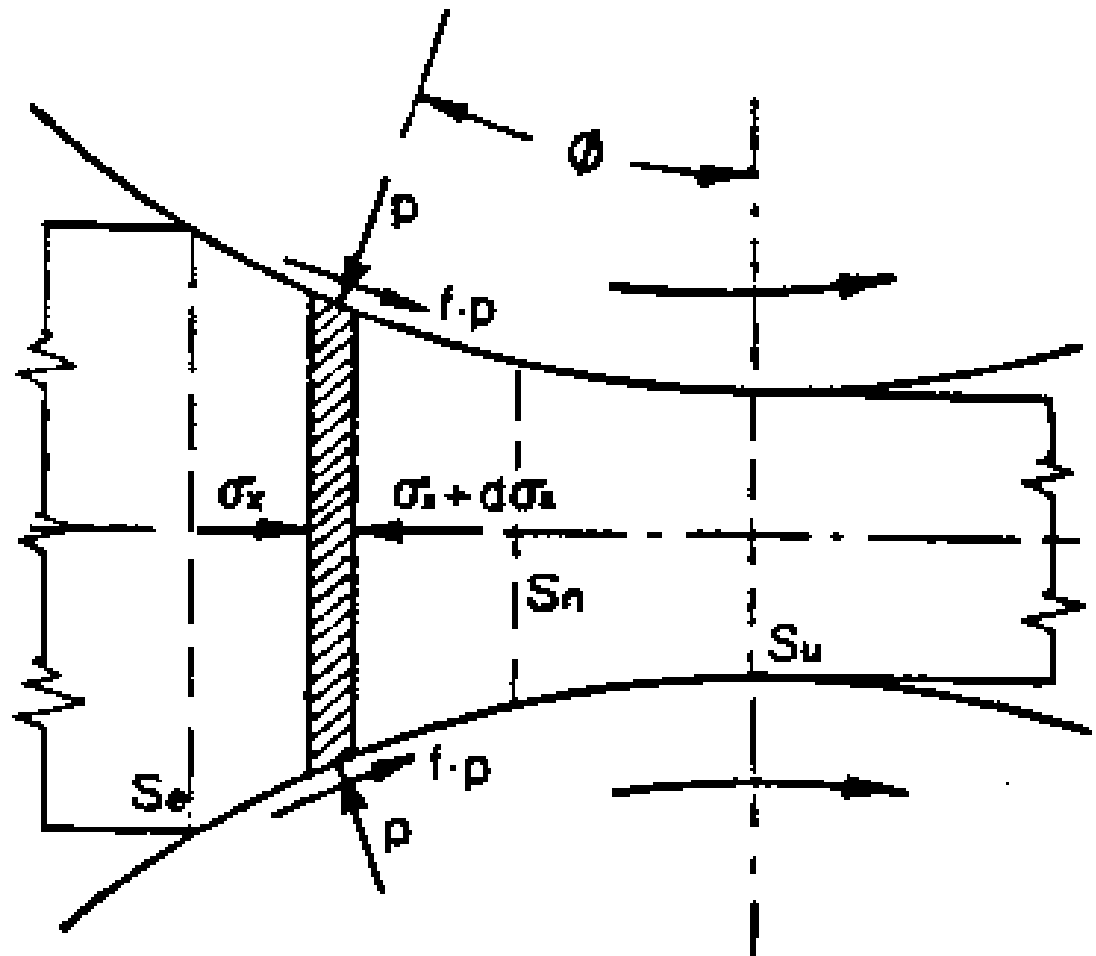
Sollecitazioni

- Procedendo alla verifica delle sollecitazioni cui il laminando è sottoposto è possibile giungere ad una distribuzione delle pressioni che:
 - presenta valori minimi in corrispondenza delle sezioni di ingresso ed uscita e precisamente pari a

$$P_m = 2 \cdot \sigma_0 / \sqrt{3}$$

- presenta valori massimi in corrispondenza della sezione neutra

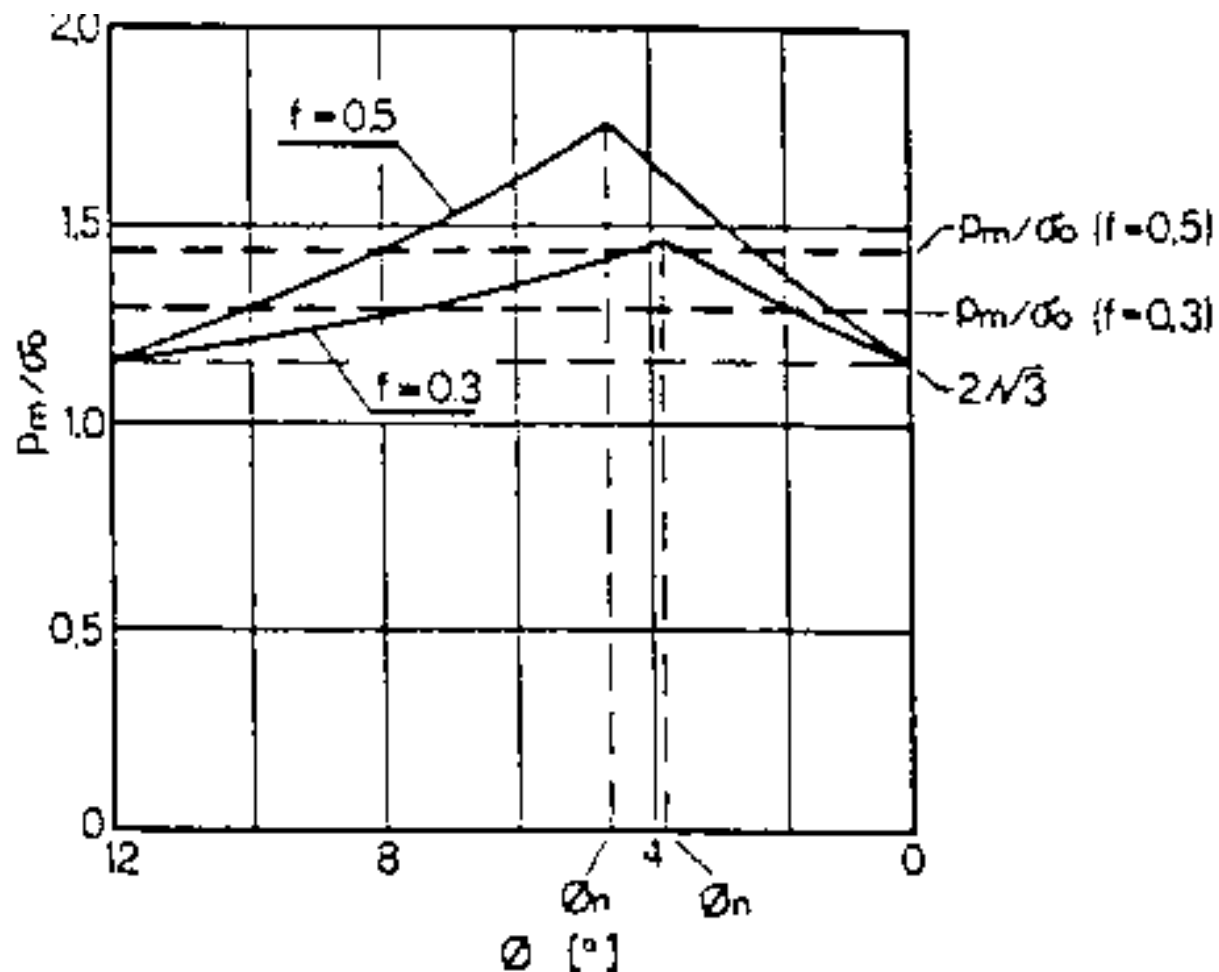
Laminazione piana: stato di sollecitazione nella zona di attrito positivo (ipotesi di deformazione omogenea).



Andamento della pressione

Andamento della pressione (riferita a σ_0) nella zona di contatto per due differenti valori del coefficiente di attrito.

ϕ = angolo di contatto generico.



Sollecitazioni

■ Ulteriori considerazioni:

- Il valore massimo è tanto maggiore quanto più grande è l'attrito
- La sezione neutra è dislocata più vicina alla sezione di uscita che alla sezione di entrata
- La sezione neutra si avvicina alla sezione di uscita al diminuire del coefficiente di attrito

Forza di laminazione

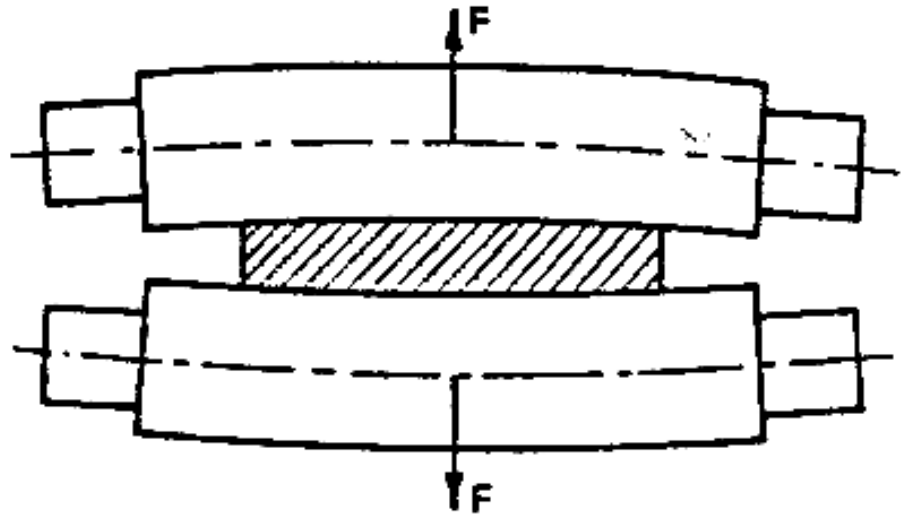
- La forza di laminazione è esprimibile come integrale delle pressioni esercitate sulla superficie totale del laminando
- Ipotizzando tale pressione p_m esercitata sempre e solo in direzione verticale, la forza è esprimibile con la formula:

$$F = B \cdot L_d \cdot p_m$$

ove $B = B_0$ è la larghezza del laminando

Problemi

Deformazione dei cilindri
e conseguente errore di
forma del laminato.



- La forza di laminazione tende a flettere i cilindri come in figura determinando un errore di forma sul laminato

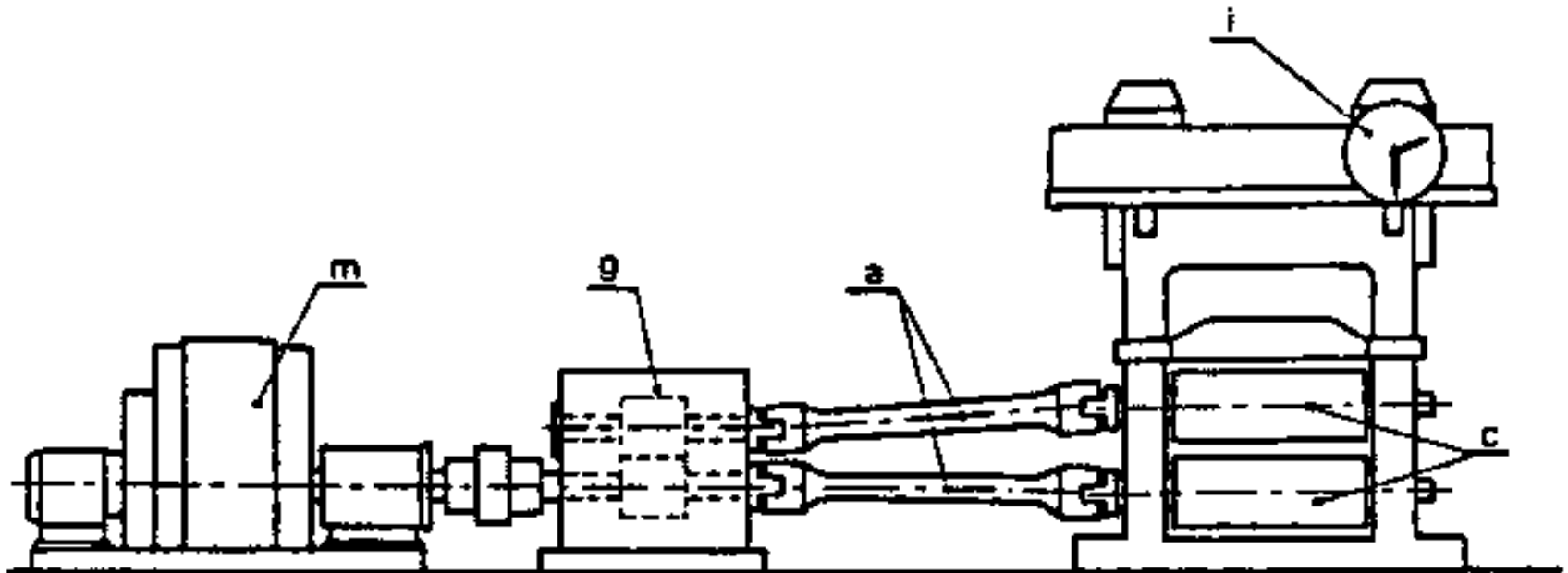
Coefficiente di stiramento

- Supponendo la costanza del volume del materiale durante il processo di laminazione e dette S_0 ed S nonché L_0 ed L rispettivamente le sezioni e le lunghezze all'istante iniziale e generico, viene definito coefficiente di stiramento il rapporto:

$$\lambda = L / L_0 = S_0 / S$$

- Generalmente la laminazione richiede più passaggi nei quali il coefficiente si riduce (a partire di un valore massimo di circa 1,8 per gli acciai) a causa del progressivo raffreddamento del materiale che comporta un processo di incrudimento e dunque maggiore resistenza alla deformazione

Linee o treni di laminazione



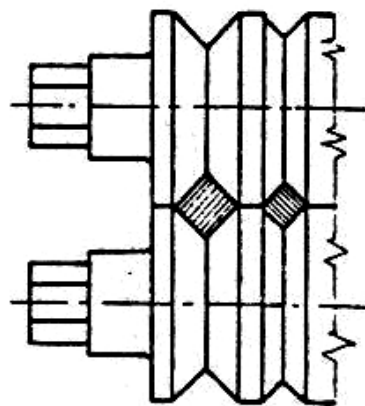
Gabbia di laminazione

c: cilindri,
i: indicatore della distanza
fra i cilindri,

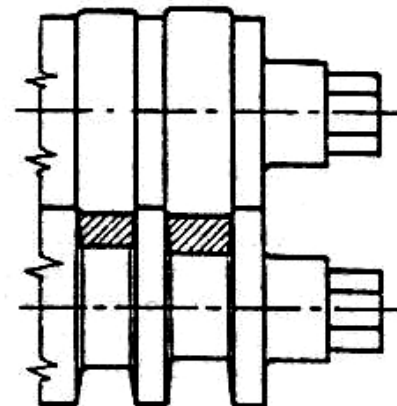
a: allunghe,
g: gabbia a pignoni,
m: motore.

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 di laterali devono presentare angoli di spoglia di almeno 1° - 2°



calibri aperti



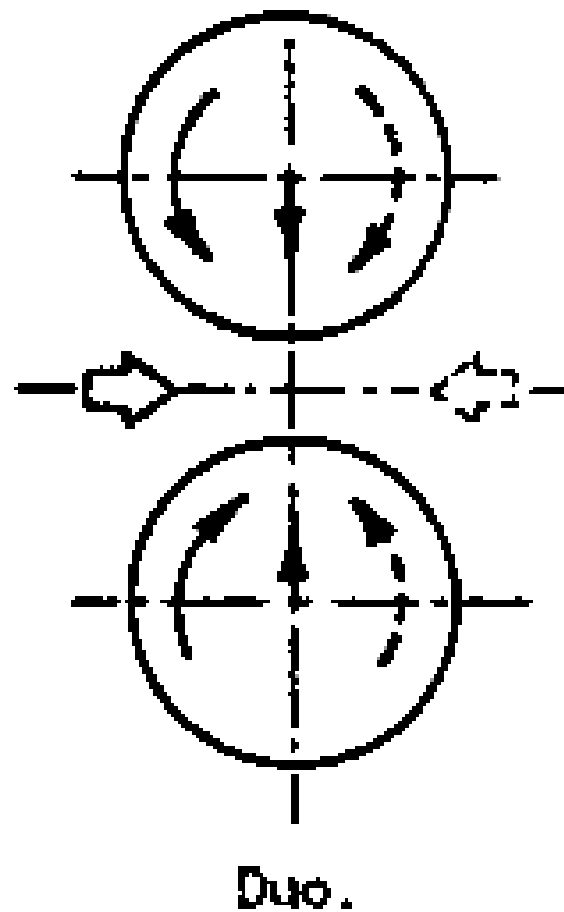
calibri chiusi

Tipi di cilindri scanalati.

Disposizione dei cilindri

■ Possibili disposizioni:

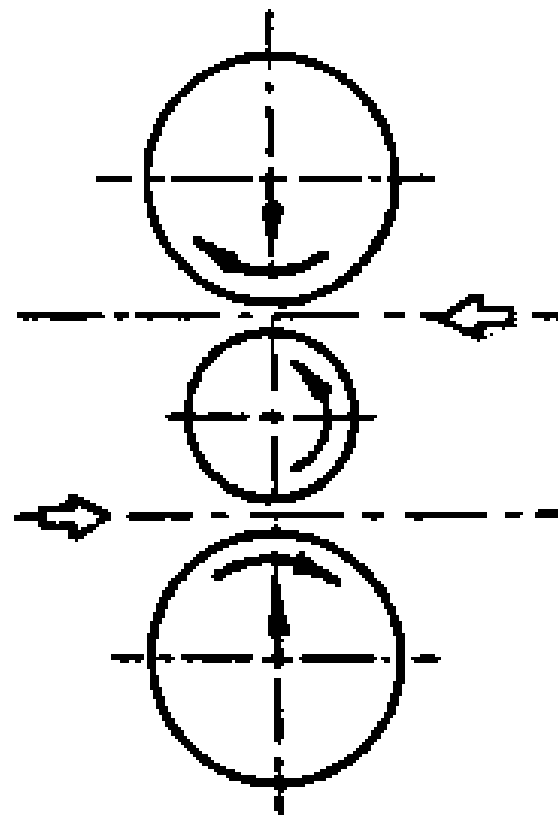
- Duo: formato da due cilindri con verso di rotazione reversibile, utilizzato per la sbazzatura



Disposizione dei cilindri

■ Possibili disposizioni:

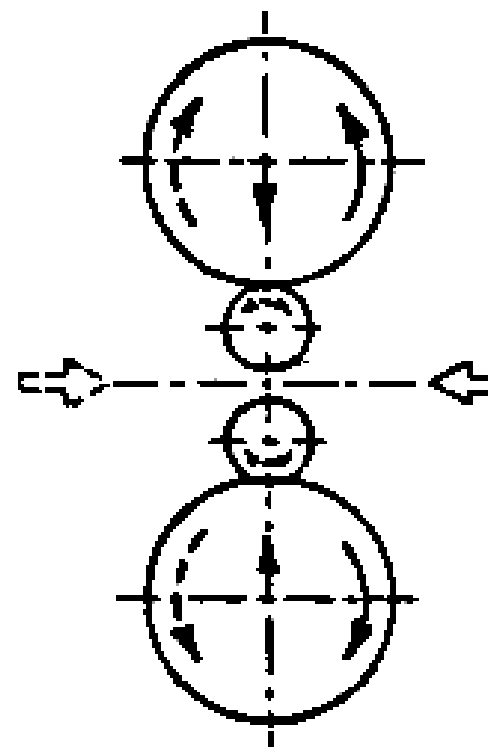
- Trio: formato da tre cilindri con verso permanente utilizzando le luci alternativamente, anch'esso utilizzato prevalentemente per sbazzatura



Trio.

Disposizione dei cilindri

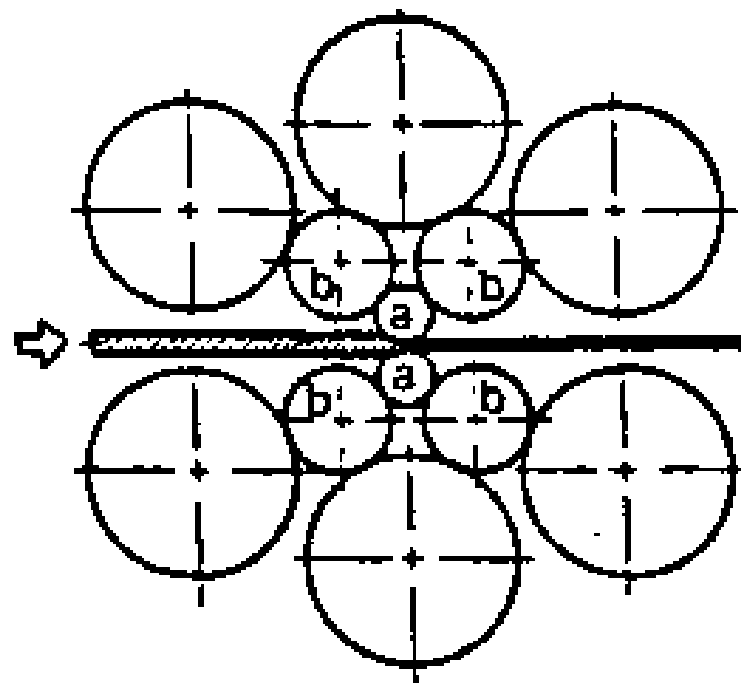
- Possibili disposizioni:
 - Quattro: gabbia di 4 cilindri di cui 2 interni motorizzati, gli esterni solo per irrigidimento anti-deformazione. Reversibili utilizzati per lamiere e nastri



Quarto.

Disposizione dei cilindri

- Possibili disposizioni:
 - Multiplo: formato da più cilindri per laminazione di prodotti piani di precisione

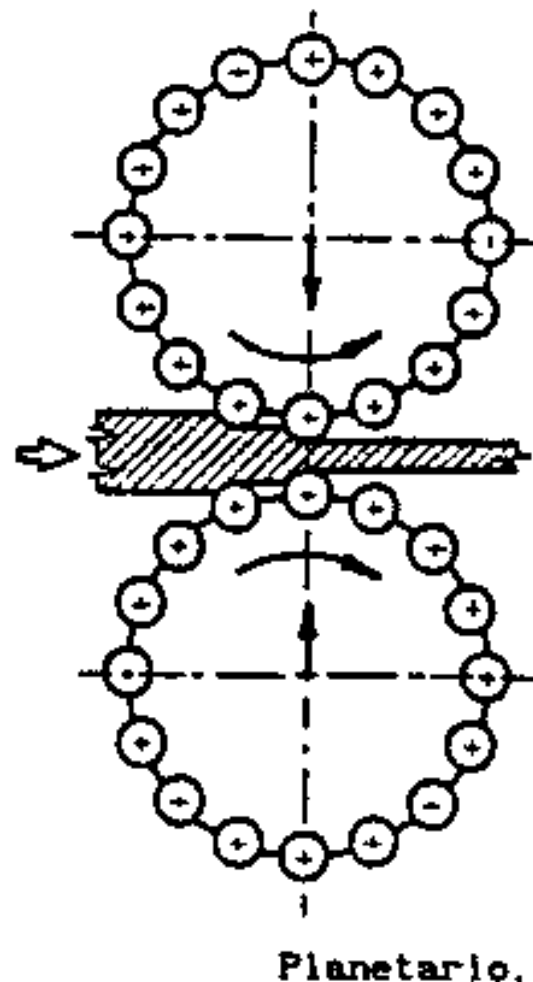


Multicilindro.

a: cilindri di lavoro,
b: cilindri motori.

Disposizione dei cilindri

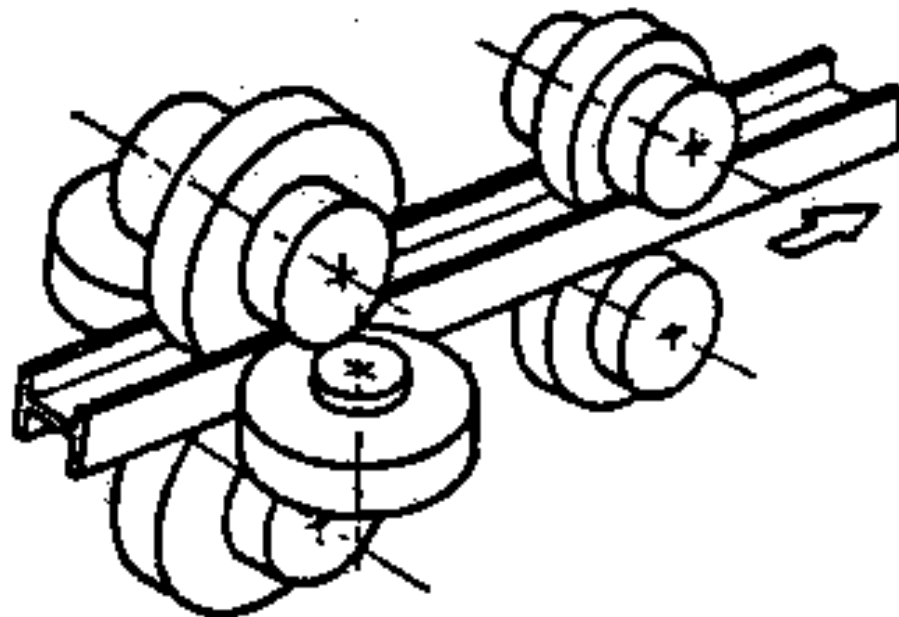
- Possibili disposizioni:
 - Planetario: composta da 2 grandi cilindri con molti piccoli cilindri che procedono per una progressiva e ampia riduzione



Disposizione dei cilindri

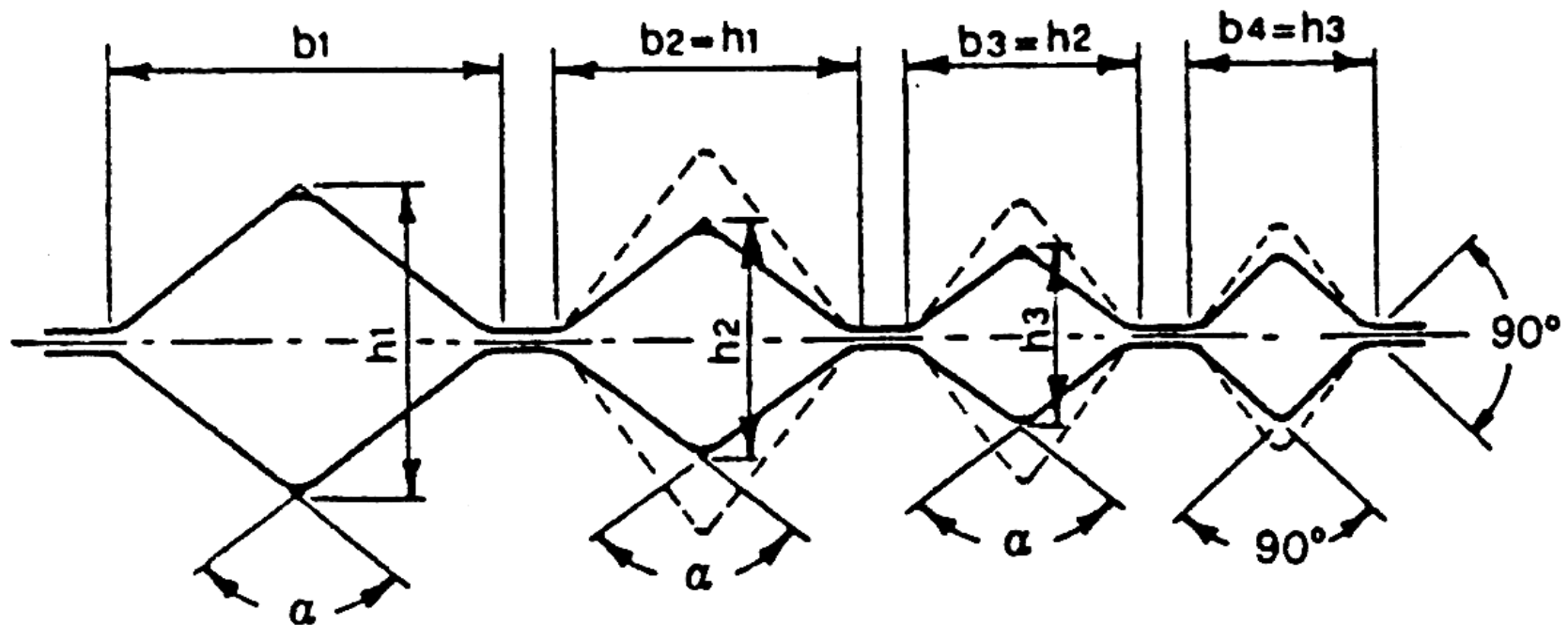
■ Possibili disposizioni:

- Universale: presenta almeno 2 coppie di cilindri che provvedono anche alla sagomatura delle pareti laterali dei laminati



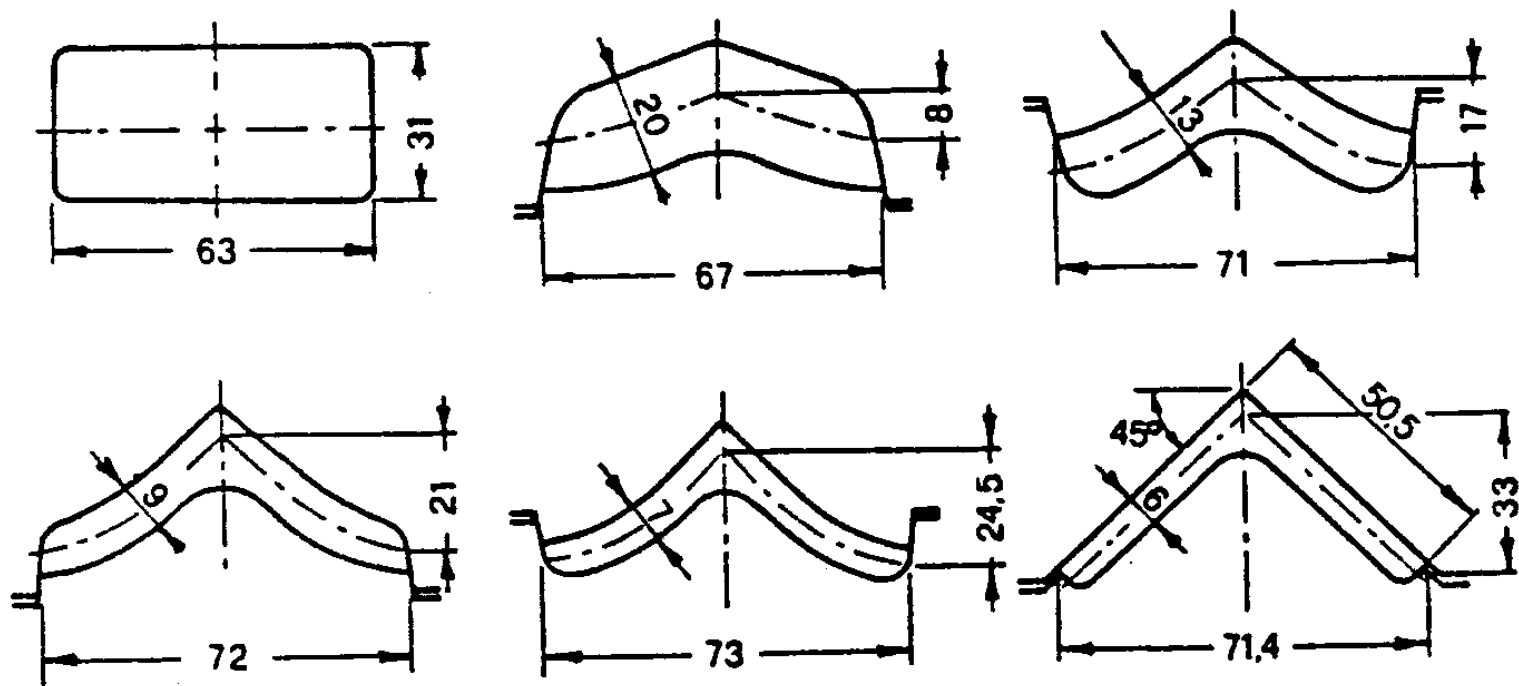
**Laminatoio universale
per travi.**

Calibratura a sezione quadrata



Calibratura per laminati a sezione quadrata.

Calibratura ad "L"

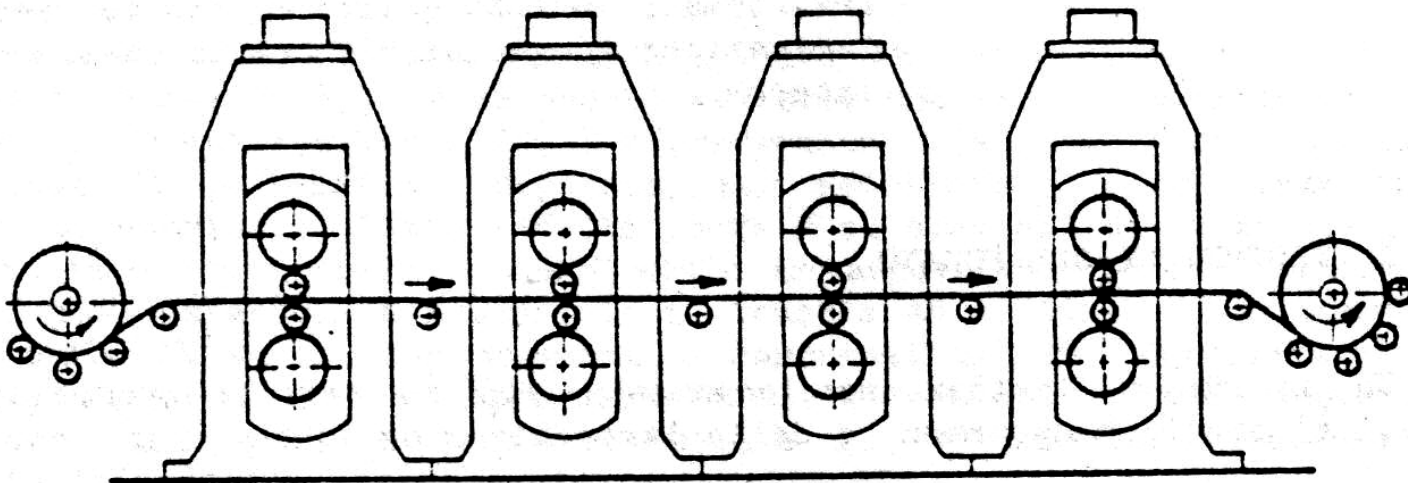


Calibratura per ferri ad L (lato di 50 mm).
 Grezzo di partenza: laminato a sezione rettangolare.

Laminazione a freddo di nastri

- Si applica su nastri già laminati a caldo con l'obiettivo di
 - Ridurre ulteriormente lo spessore (fino 0,5 mm)
 - Migliorare la resistenza meccanica
- È preceduto 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
- È seguita da una laminazione di finitura con processo di ricottura per garantire una superficie idonea a successivi trattamenti di zincatura/verniciatura/smaltatura

Laminazione a freddo di nastri



Laminatoio continuo a freddo per nastri.

Velocità di laminazione

laminazione a caldo {
 treno sbozzatore $v = 3 \div 4 \text{ m/s}$
 treno finitore $v = 6 \div 11 \text{ m/s}$
 treno continuo $v = 20 \text{ m/s}$

laminazione a freddo di nastri $\{v = 25 \div 30 \text{ m/s}$

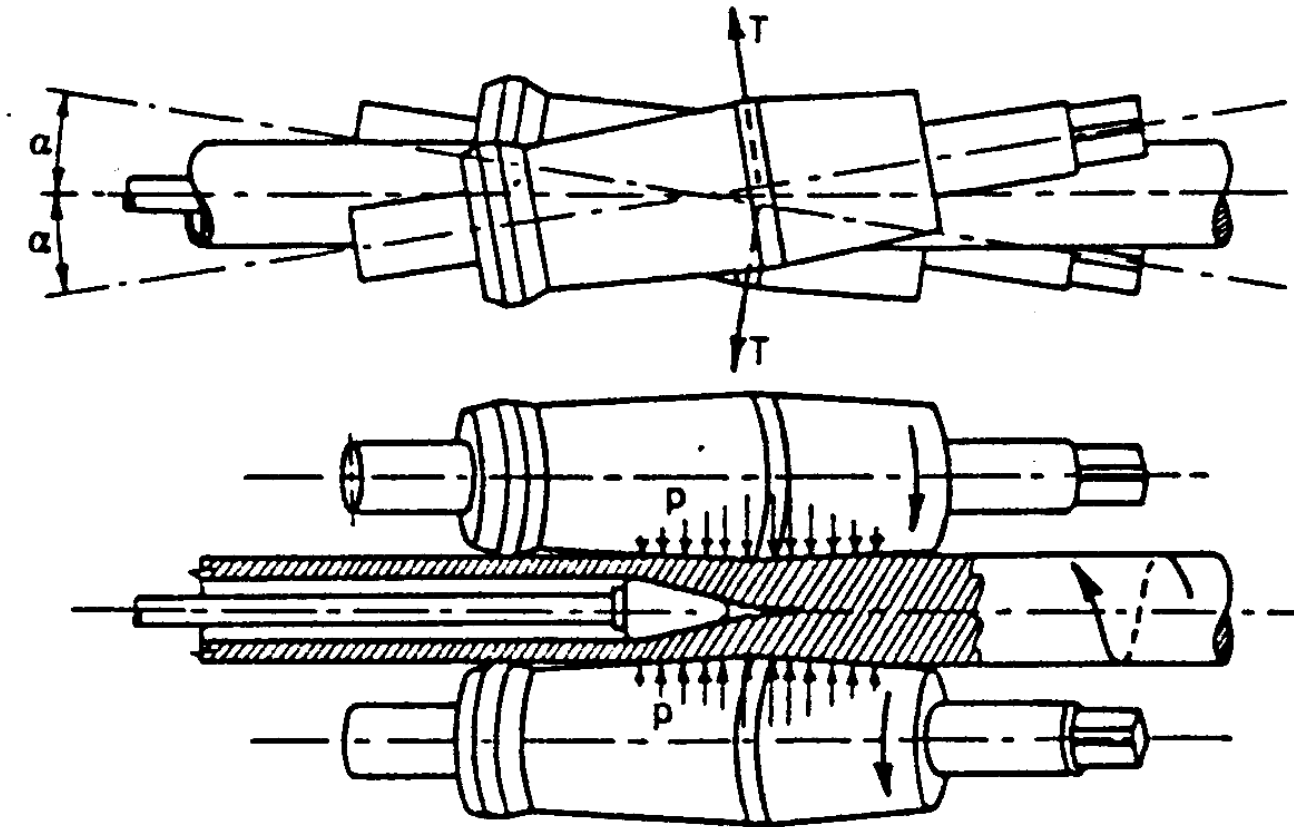
Laminazione di tubi

- Corpi di forma tubolare 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 di Mannesmann o della laminazione obliqua:
 - Tondo in acciaio
 - Lunghezza max 5-6 m
 - Temperatura 1250-1280 C°
 - Cilindri a tronco di cono con assi obliqui
 - Azione di pressione P progressivamente crescente
 - Azione tangenziale T che sviluppa un a componente assiale $A = T \sin \alpha$ che consente l'avanzamento del pezzo
 - Forza di trazione massima al centro della sezione circolare del pieno che, guidata dalla spina, provoca la crezione del foro centrale

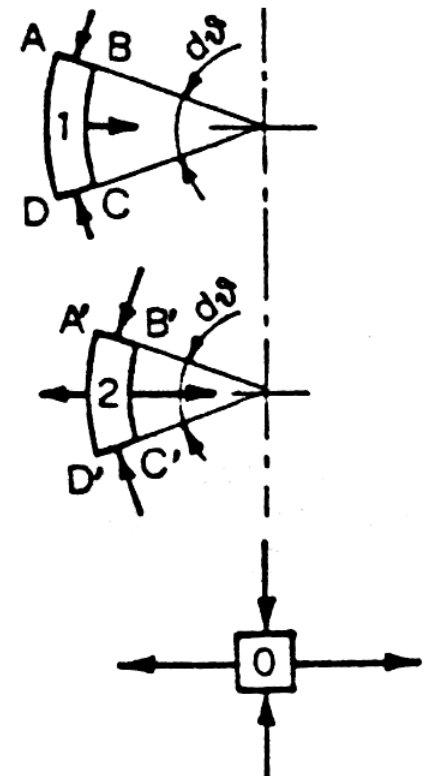
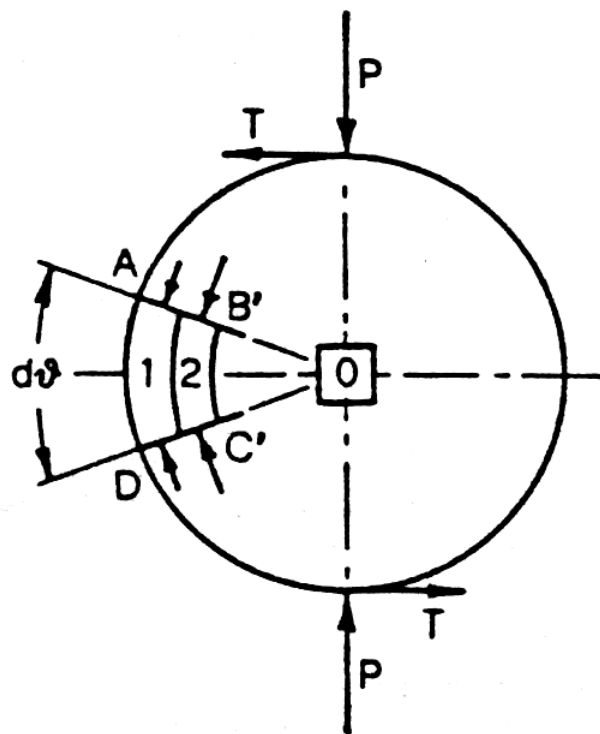
Metodo di Mannesmann



Laminatoio obliquo (Mannesmann).

Stato di sollecitazione

Stato di sollecitazione
nella laminazione
obliqua.

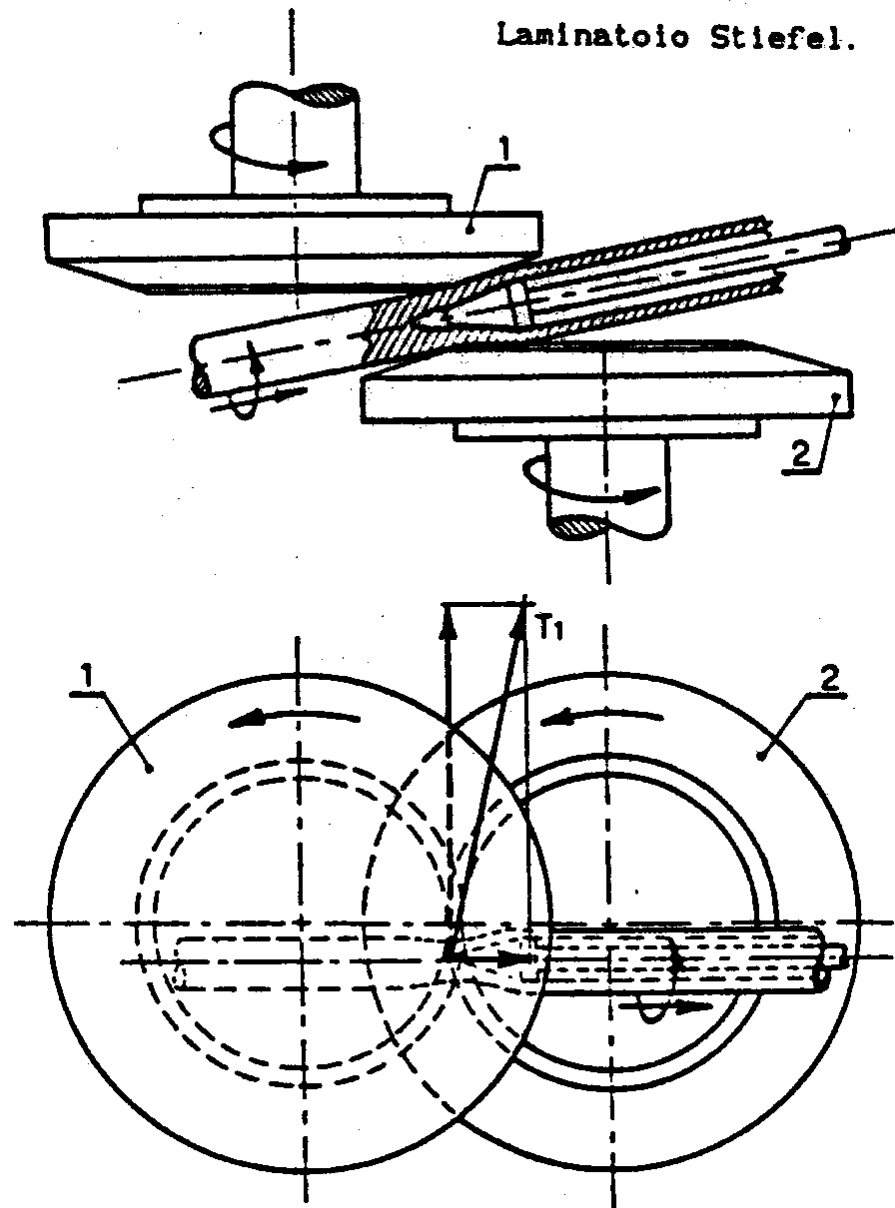


Produzione del forato

■ Metodo di Stiefel:

- È una variante di Mannesmann che prevede l'uso di due dischi di forma piano/conica
- L'asse del pieno è spostato rispetto al piano formato dall'asse dei due dischi così da generare una componente tangenziale della pressione esercitata tale da consentire l'avanzamento del pezzo

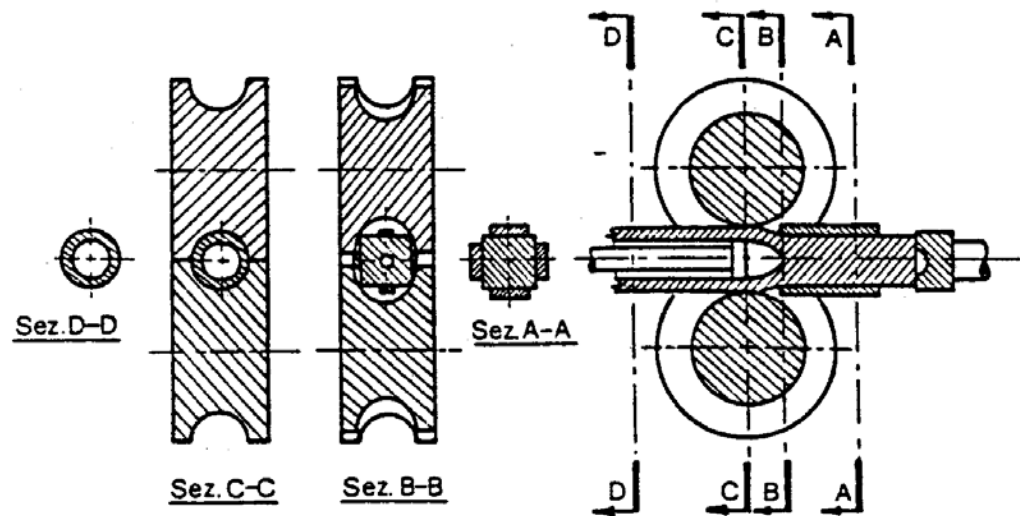
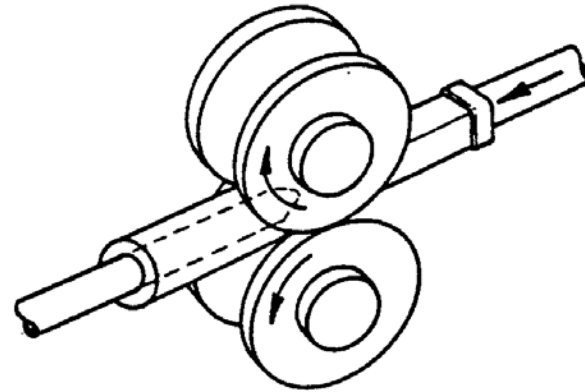
Metodo di Stiefel



Produzione del forato

- Metodo PPM (Press Piercing Mill) o del laminatoio presso-foratore:
 - Uno spintore forza il pieno all'imbocco di due cilindri motori a gola scanalata e quindi contro un mandrino a punta che penetra nel pieno provocando il rigonfiamento esterno dello spessore che occupa le gole dei cilindri assumendone la forma
 - La qualità è generalmente migliore rispetto alle altre tecnologie

Metodo PPM



Laminatoio presso-foratore.

Sez. A-A quadro di partenza,
Sez. B-B fase di imbocco,

Sez. C-C fase di laminazione-foratura,
Sez. D-D forato (con fondello).

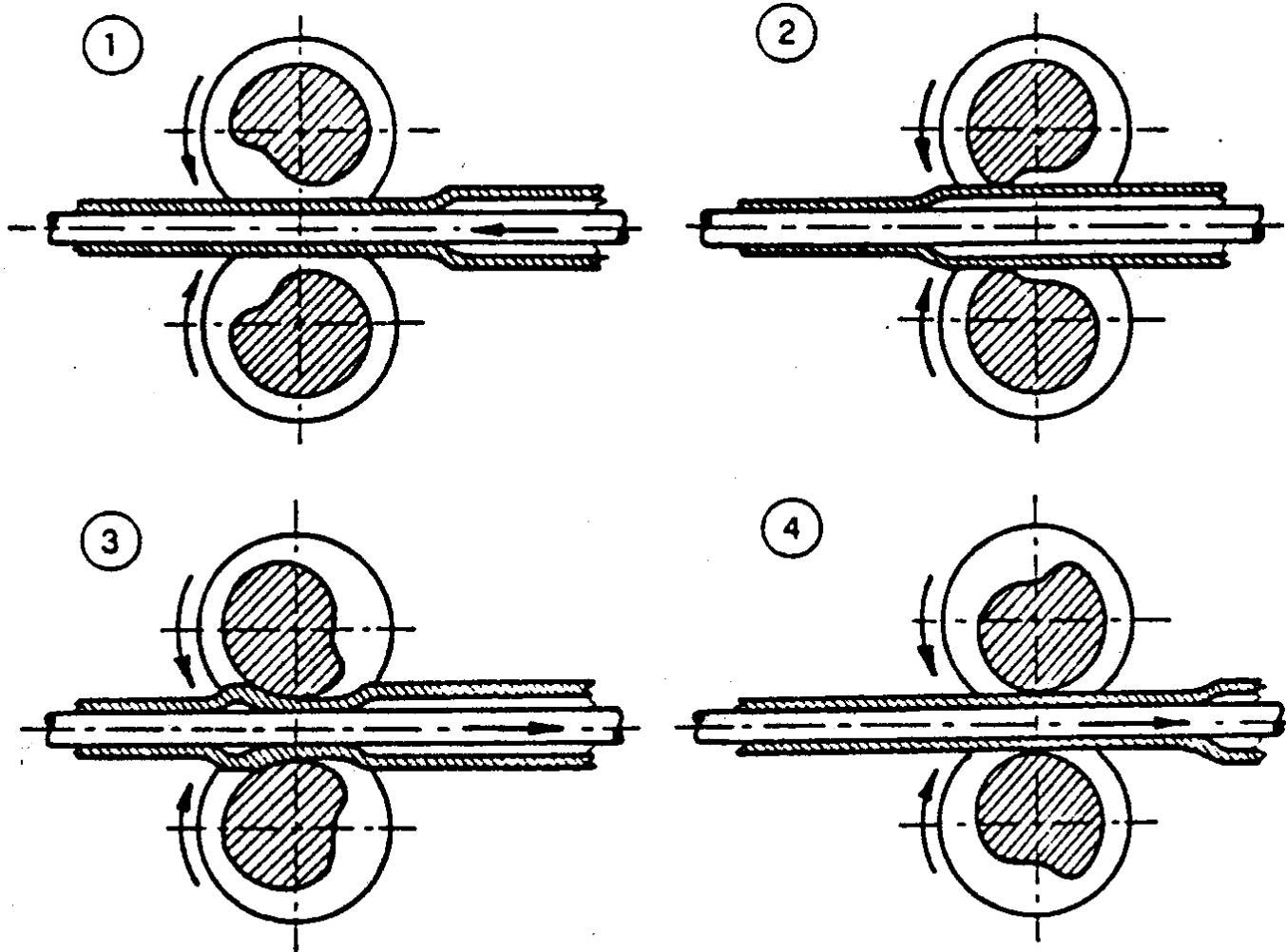
Stiratura e finitura

- A tale scopo esistono diverse tecnologie quali:
 - ☐ Laminatoio a passo di pellegrino
 - ☐ Laminatoio a tappo
 - ☐ Laminatoio continuo
 - ☐ Laminatoio a spinta
 - ☐ Laminatoio riduttore stiratore

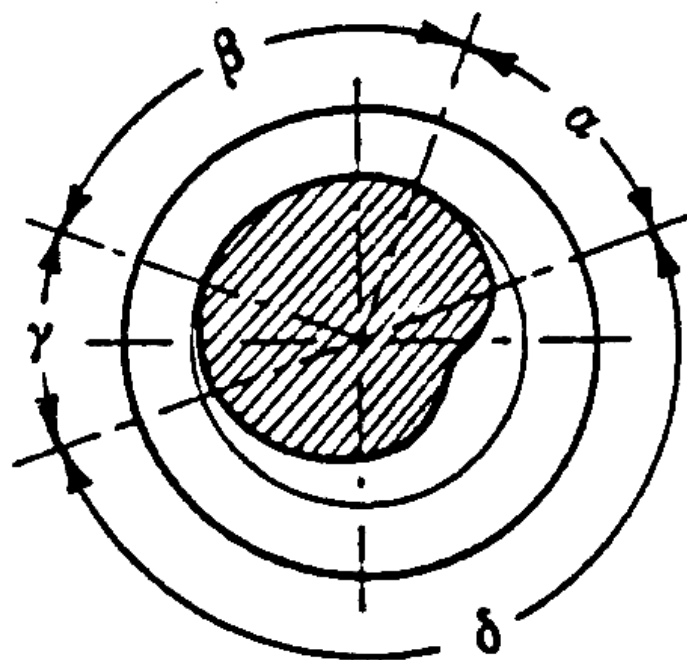
Laminatoio a passo di pellegrino

- Consta di due cilindri sagomati controrotanti in direzione opposta all'avanzamento del forato
- Si alterna una fase di lento avanzamento del forato mosso da un pistone ad una di laminazione effettiva con moto retrogrado del forato

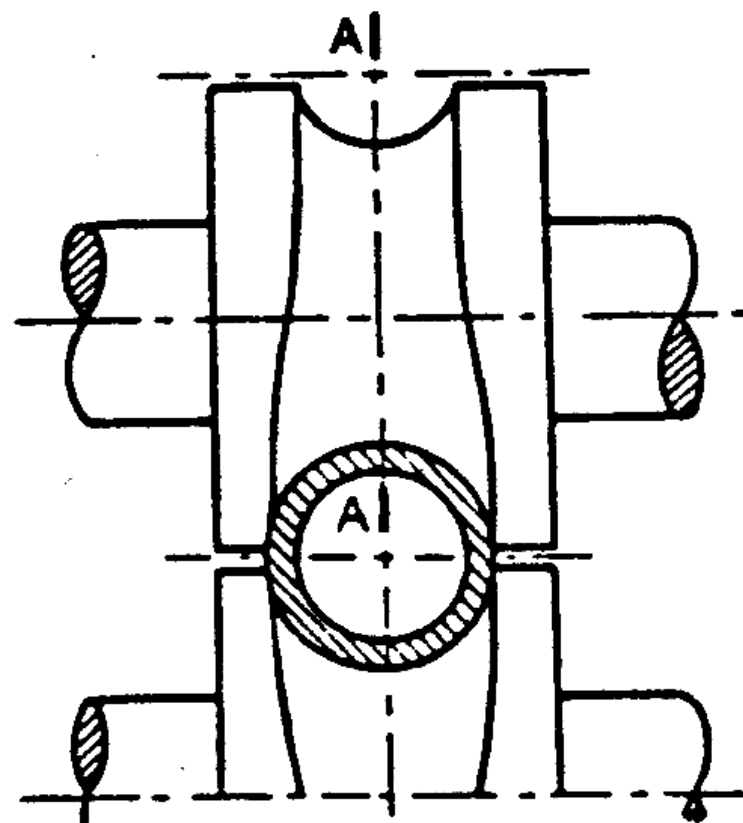
Metodo LP



Sequenza di laminazione nel LPP.



Sez. A-A



Forma dei calibri nel LPP.

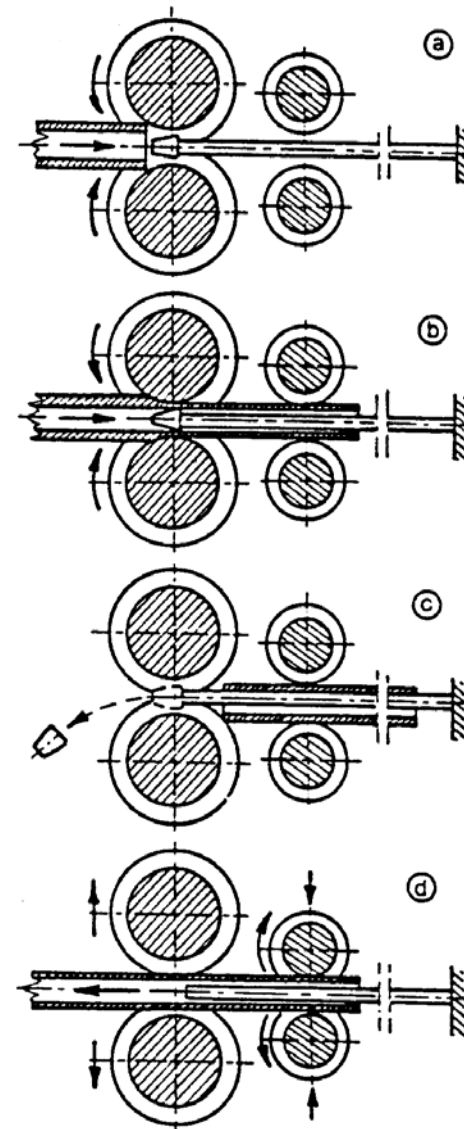
α = angolo di imbocco,
 γ = angolo di uscita,

β = angolo di lavoro,
 δ = angolo di corsa a vuoto.

Laminatoio a Tappo

- Consiste in due coppie di cilindri controrotanti con luce di passaggio variabile
- Un'asta centrale con un "tappo" all'estremità e deputata alla calibratura della superficie interna
- Sono generalmente necessari più passaggi in posizioni diverse per giungere al diametro e spessore richiesti
- E' possibile lavorare tubi di 120/400 mm di diametro e lunghezze fino a 18 m

Laminatoio a tappo



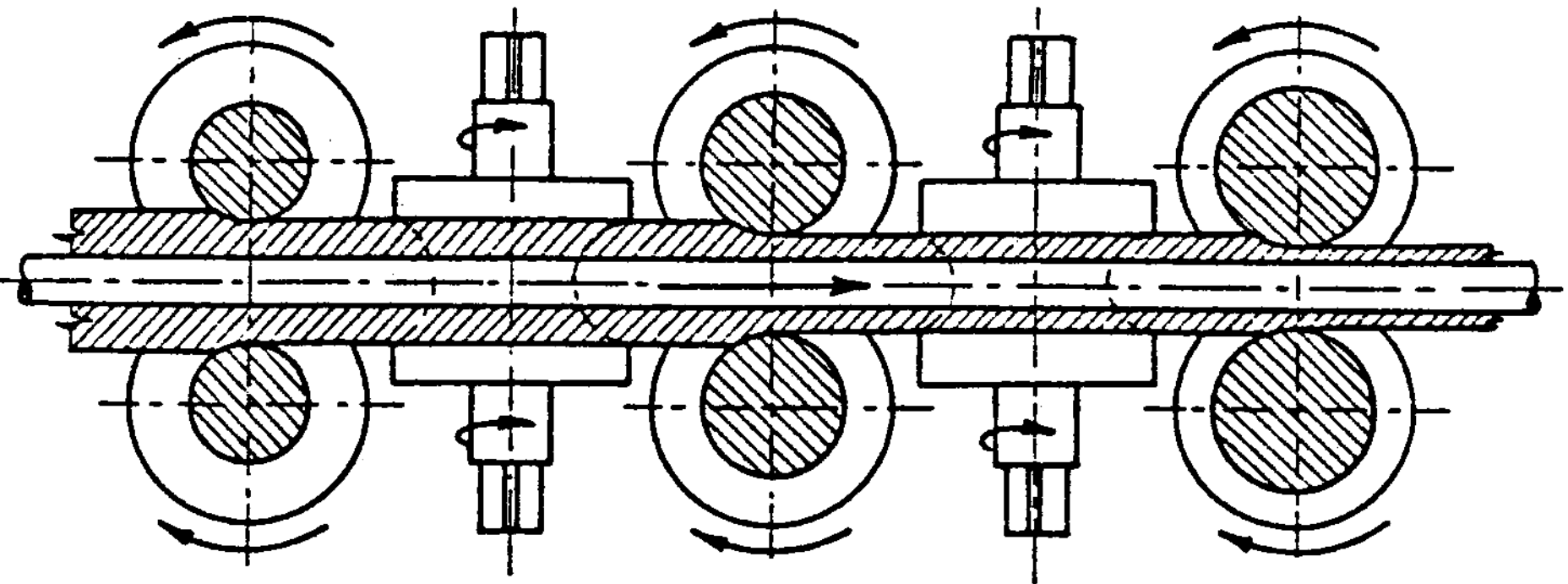
Laminatoio a tappo.

a) imbocco, b) laminazione,
c) espulsione tappo d) ritorno.

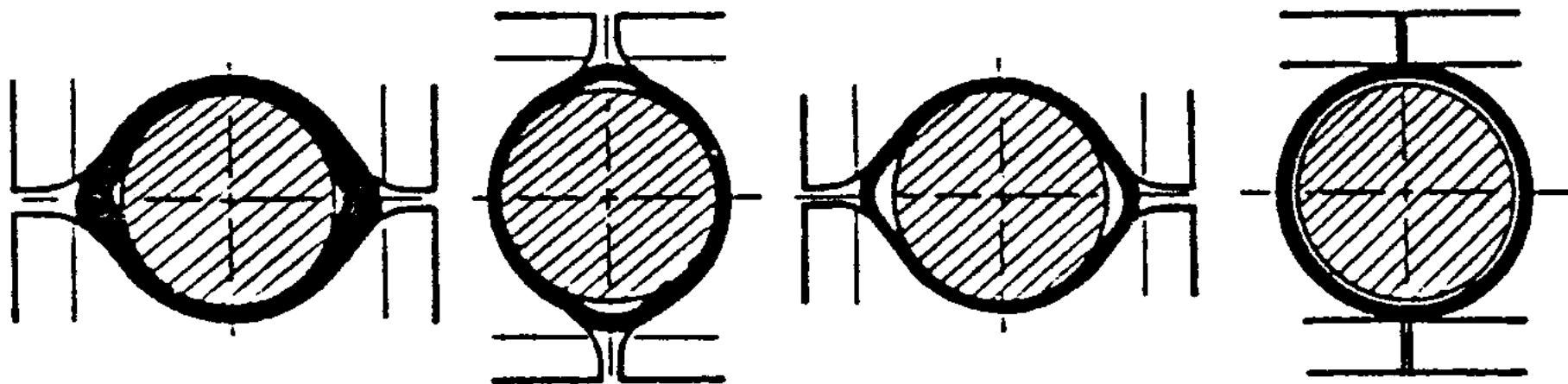
Laminatoio continuo

- Consiste in una sequenza di 8-9 gabbie con assi disposti a 90° in sequenza che operano le operazioni di sbozzatura/laminazione/finitura
- Il diametro esterno viene progressivamente ridotto
- Il diametro interno viene calibrato su un mandrino a sezione costante

Metodo LC



Schema del laminatoio continuo.

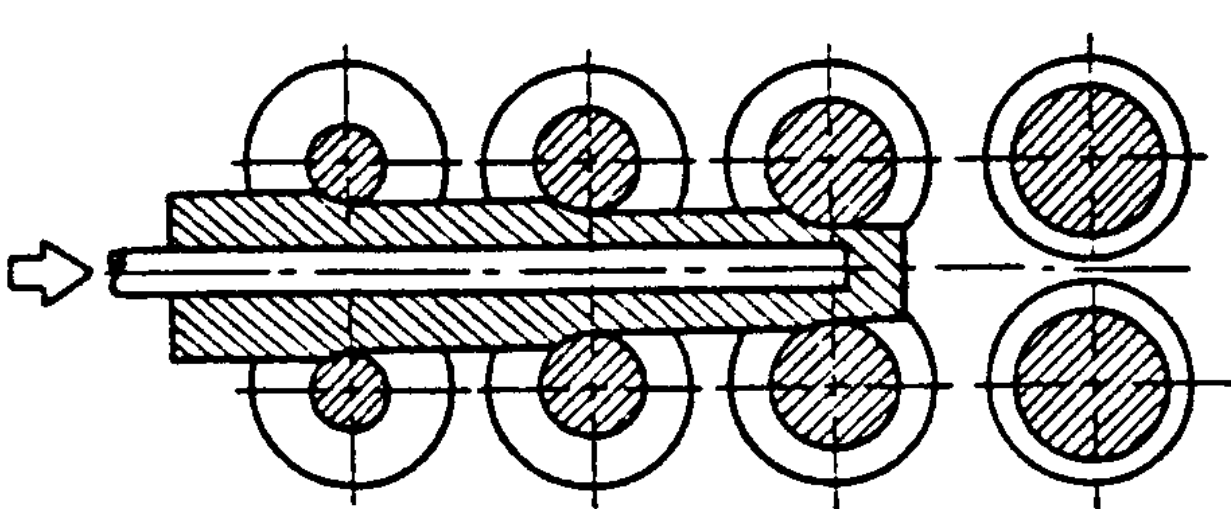


Calibri di un LC a 8 gabbie (1^a, 4^a, 7^a, 8^a gabbia).

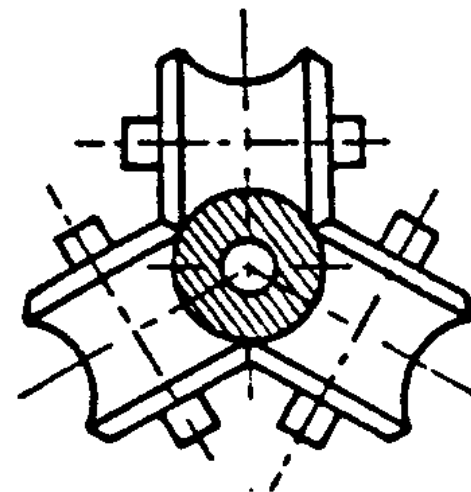
Laminatoio a spinta

- È un impianto di laminazione composto da due attrezzature:
 - Laminatoio obliquo a spalla
 - Composto da tre cilindri obliqui a tronco di cono controrotanti che provvedono alla laminazione del forato provocandone la riduzione dello spessore
 - Treno di laminazione a spinta
 - Composto da più gabbie ciascuna di tre cilindri a 120° che provvedono alla fase di finitura
 - L'avanzamento del forato (a bicchiere) è garantito da una mandrino calibrato interno

Laminatoio a spinta



Schema



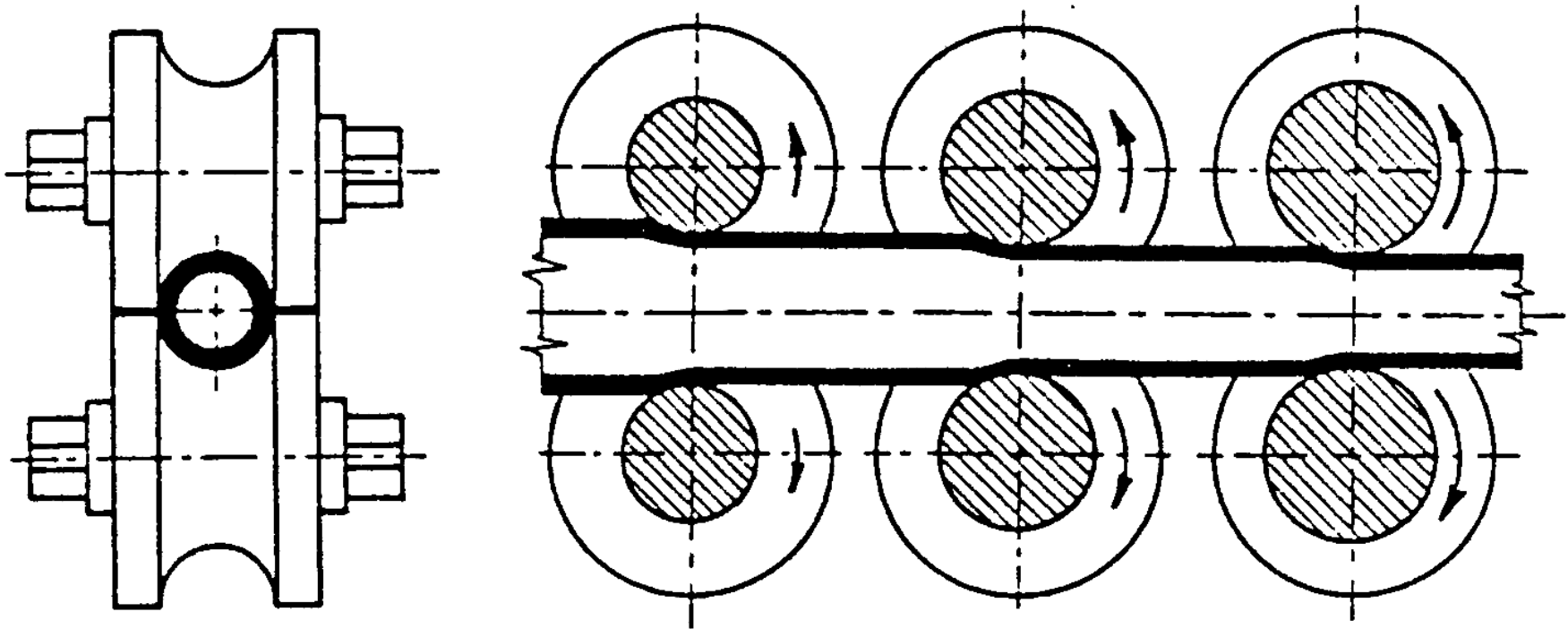
Disposizione dei cilindri

Treno di laminazione a spinta.

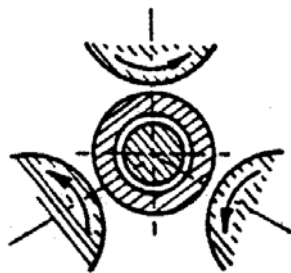
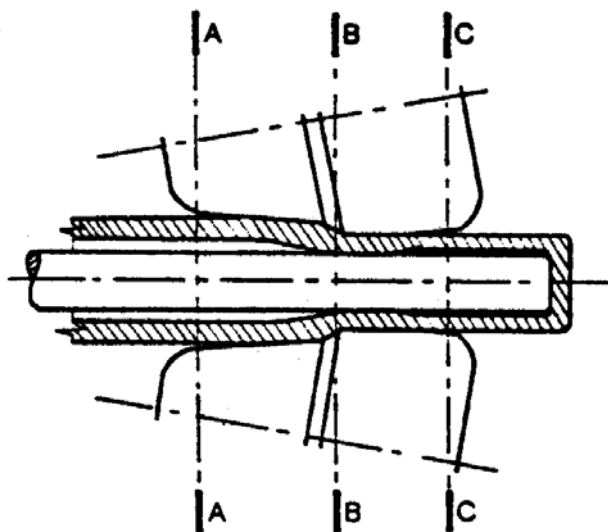
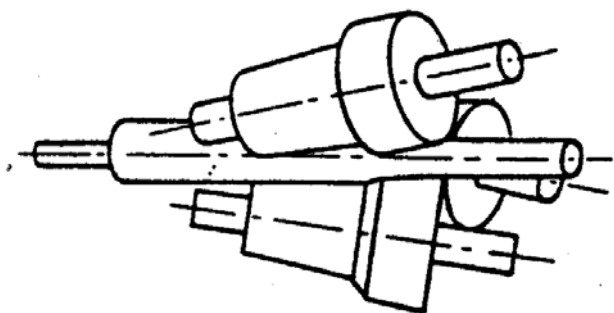
Laminatoio riduttore-stiratore

- Si differenzia dal precedente per il fatto che la successione delle gabbie non presenta solo una sollecitazione di progressiva compressione del forato, bensì anche di progressiva trazione, cosa che consente di non avere alcun mandrino interno
- L'andamento degli spessori e del diametro interno varia dunque in funzione della gabbia attraversata e dello stato di avanzamento della laminazione
- Il tratto iniziale e finale del forato, a causa della variazione di diametro interno e spessore costituiscono generalmente uno sfrido di produzione
- Gli assi dei cilindri di ciascuna gabbia sono ruotati di 90° rispetto a quelli della gabbia precedente, di 60° nel caso di gabbie a 3 cilindri

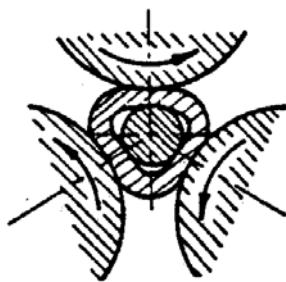
Metodo LRS



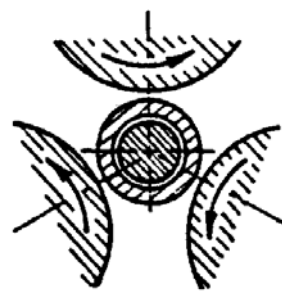
Schema del laminatoio riduttore stiratore.



Sez. A-A

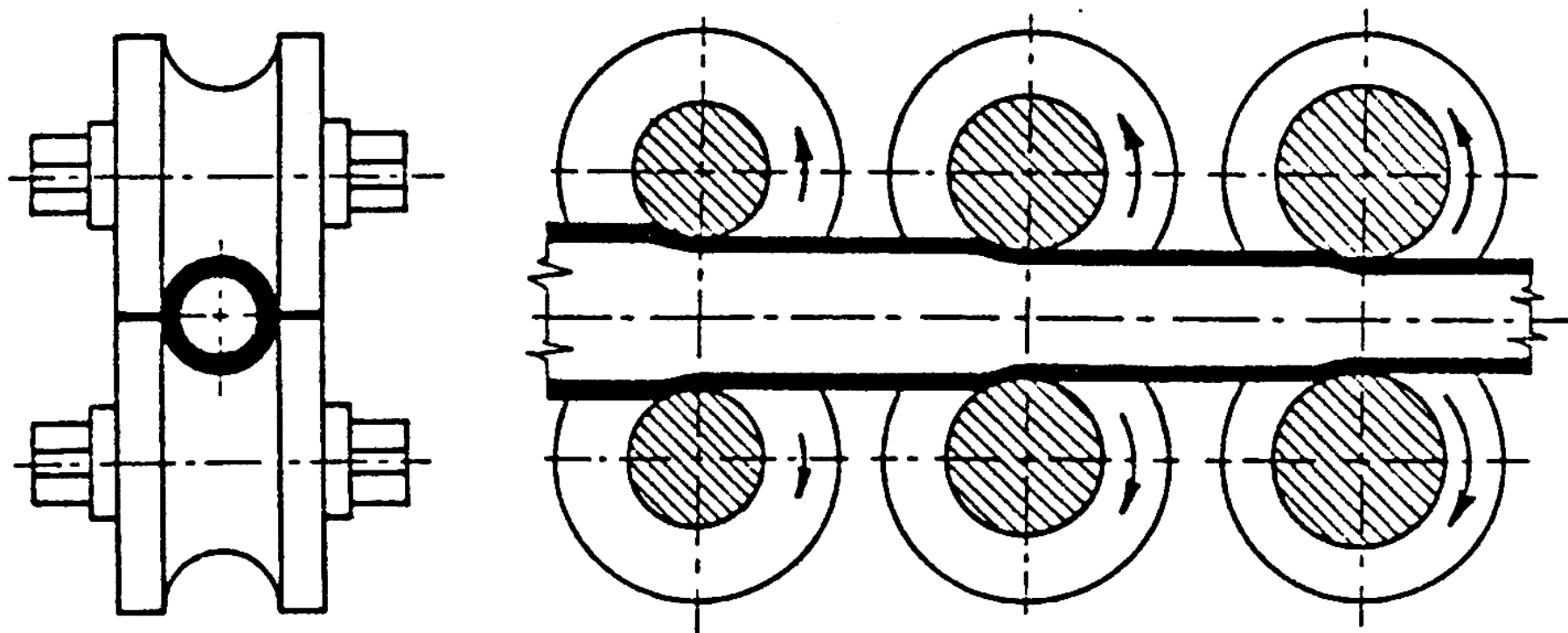


Sez. B-B



Sez. C-C

Laminatoio obliquo a spalla.



Schema del laminatoio riduttore stiratore.

Velocita' delle singole gabbie (*)
e variazione dello spessore del
laminando nel LRS.

