

LAVORAZIONI PER DEFORMAZIONE PLASTICA

➤ GENERALITÀ

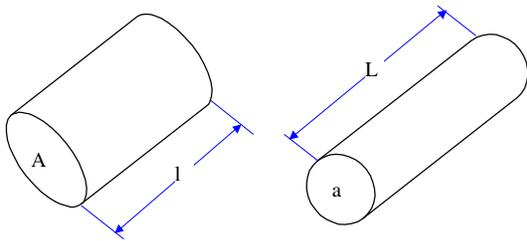
È un metodo di lavorazione in cui si imprime al materiale metallico la forma voluta sfruttandone le proprietà plastiche, cioè la **capacità di deformarsi in modo permanente**, sia a caldo che a freddo, quando è sottoposto ad appropriate forze.

La deformazione plastica a caldo richiede l'impiego di forze più piccole rispetto a quella a freddo e si possono avere deformazioni anche notevoli senza rischi di rotture o fessurazioni; mentre quella a freddo richiede l'impiego di grandi forze anche per piccole deformazioni, ma in compenso si ottengono prodotti con maggiore precisione dimensionale.

I materiali sottoponibili a queste lavorazioni devono avere quelle proprietà tecnologiche quali **malleabilità, duttilità, piegabilità** che consente loro di sopportare le forze applicate per deformarli senza né rompersi, né che si vengano a formare dei difetti nel materiale evidenti o nascosti che non ne permetterebbero il successivo utilizzo. Così, ad esempio, le ghise non possono mai essere deformati né a caldo, né a freddo non possedendo tali proprietà.

Queste lavorazioni avvengono a **volume costante**, quindi dal materiale di partenza avente una certa forma e dimensioni, si ottengono pezzi con forme e dimensioni diverse, ma con volume di materiale uguale a quello di partenza. In realtà parte del materiale viene perduto per le ossidazioni che subisce il materiale, soprattutto alle alte temperature, ma è una piccola percentuale rispetto al volume iniziale del materiale trattato.

Così, ad esempio, per una barra nella quale viene ridotta la sezione si deve verificare:



$$V_{\text{iniziale}} = V_{\text{finale}}$$

$$A \cdot l = a \cdot L$$

Da cui è possibile calcolare la lunghezza finale

$$L = \frac{A \cdot l}{a}$$

Le più comuni lavorazioni per deformazione plastica sono:

LAMINAZIONE, TRAFILATURA, ESTRUSIONE, FUCINATURA, STAMPAGGIO.

➤ LAMINAZIONE

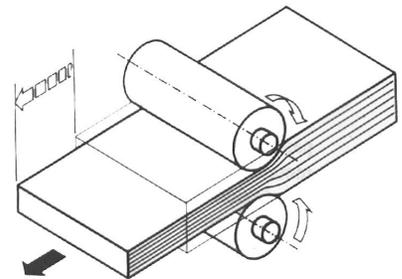
Consiste nella trasformazione dei **lingotti** (o **masselli**), ottenuti in acciaieria, in prodotti commerciali utilizzabili per le successive lavorazioni, chiamati semilavorati. La laminazione sfrutta la proprietà tecnologica di **malleabilità**, ovvero sono laminabili i materiali malleabili.

Questa lavorazione plastica ha una duplice funzione:

1. riduce progressivamente la sezione dei lingotti, allungandoli e trasformandoli in semilavorati;
2. uniforma le dimensioni e l'orientamento dei cristalli, migliorando così la resistenza del materiale.

La riduzione di sezione è ottenuta facendo passare più volte il lingotto o la barra, opportunamente riscaldati (per gli acciai a circa $1000 \div 1300 \text{ } ^\circ\text{C}$), attraverso l'azione di due cilindri lisci o sagomati, ruotanti in senso contrario.

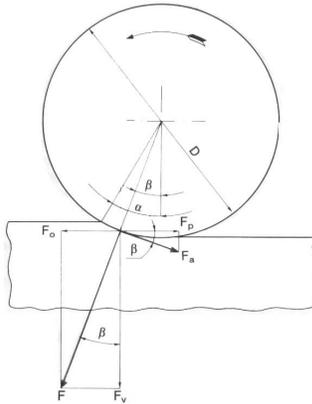
La laminazione può avvenire a caldo in un intervallo di temperatura in cui il metallo da laminare presenta la massima plasticità (temperatura maggiore dei $2/3$ della temperatura di fusione), così da ottenere notevoli riduzioni di sezione per ogni passata. In genere, questo tipo di laminazione serve per ottenere pezzi lavorati di grossa taglia (lamiera, profilati, e tondi di medio e grosso spessore).



La laminazione a freddo, praticamente a temperatura ambiente, viene effettuata su lamiere di piccolo spessore, per ottenere lamierini sottili con spessori precisi. In questo caso le riduzioni di spessore sono molto piccole, poiché a freddo diminuisce di molto la plasticità del materiale.

Principio della laminazione

L'effetto dei cilindri sul materiale si esplica con delle forze che tendono a schiacciare il materiale riducendone lo spessore e da altre forze che spingono il lingotto facendolo avanzare nella direzione di laminazione.



La forza F è la risultante delle azioni del cilindro sul pezzo lungo l'arco di contatto che sottende l'angolo α

Dalla scomposizione di tale forza nelle direzioni perpendicolare e parallela alla direzione di laminazione si ottengono le due forze

F_v che tende a schiacciare il materiale

F_o che ostacola l'avanzamento del lingotto

Sempre lungo l'arco di contatto agisce la forza d'attrito

$$F_a = f \cdot F \quad (f \text{ coefficiente d'attrito})$$

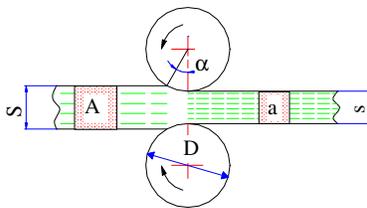
tangente all'arco; dalla sua scomposizione si nota che la componente

F_p nella direzione della laminazione, tende a fare avanzare il pezzo.

Il coefficiente d'attrito f dipende dalla temperatura, dalla finitura superficiale e dalla velocità dei cilindri; nel caso di laminazione a caldo degli acciai con cilindri d'acciaio $f \approx 0,36$.

Dal confronto di tali forze, l'avanzamento del pezzo dovuto alla rotazione dei cilindri si ha solo se

$$F_p > F_o$$



Per il rispetto di tali condizioni, è opportuno che l'angolo di afferraggio α indicato in figura non superi i 24° ; per gli acciai si assume, di solito $\alpha = 20^\circ \div 21^\circ$.

Ciò avviene quando il diametro dei cilindri è almeno uguale a quindici volte la riduzione di spessore della barra in una passata.

$$D \geq 15 (S-s)$$

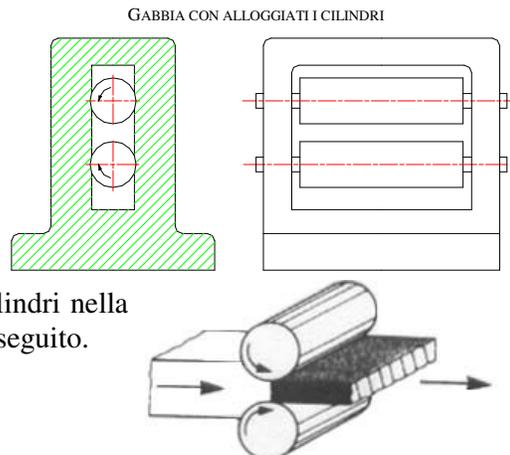
Si chiama **rapporto di laminazione** R il rapporto tra la sezione finale a e la sezione iniziale A della barra laminata:

$$R = \frac{\text{sezione finale}}{\text{sezione iniziale}} = \frac{a}{A} \quad R < 1$$

Impianti di laminazione

Il più semplice impianto è composto da un forno di riscaldamento, da una gabbia dove sono alloggiati i cilindri, da un motore con i relativi organi di trasmissione, da un sistema di trasporto, generalmente a rulli, da un sistema di raffreddamento dei cilindri.

Per quanto riguarda il numero e la disposizione dei cilindri nella gabbia si hanno i tipi principali di laminatoi indicati di seguito.

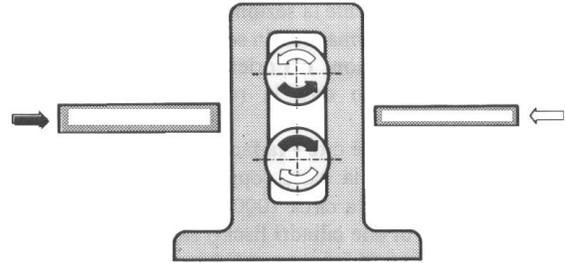


✓ Laminatoio duo

È il più elementare essendo costituito da due soli cilindri. Può essere:

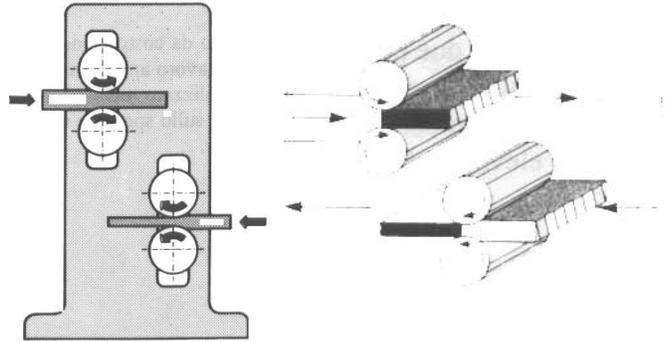
⇒ **irreversibile** quando non è possibile invertire il senso di rotazione. Questo tipo di laminatoio è poco usato da solo, ma è diffuso nei treni di laminazione costituiti da diverse gabbie disposte una di seguito all'altra;

⇒ **reversibile** quando si può invertire il senso di rotazione dei cilindri; in questo caso, su comando dell'operatore, dopo ogni passaggio del massello metallico s'inverte il senso di rotazione e si avvicinano fra di loro i cilindri per permettere ulteriori diminuzioni di spessore.



✓ Laminatoio doppio duo

È costituito da due coppie di cilindri disposti a differente altezza, su piani verticali diversi e ruotanti in modo da ottenere i due sensi di laminazione. Il massello passa prima tra una coppia di cilindri e, successivamente, invertendo il suo movimento, tra i cilindri della seconda coppia. I cilindri di ogni coppia ruotano sempre nello stesso senso e, dopo ogni passata, i cilindri di ognuna delle coppie vengono avvicinati.

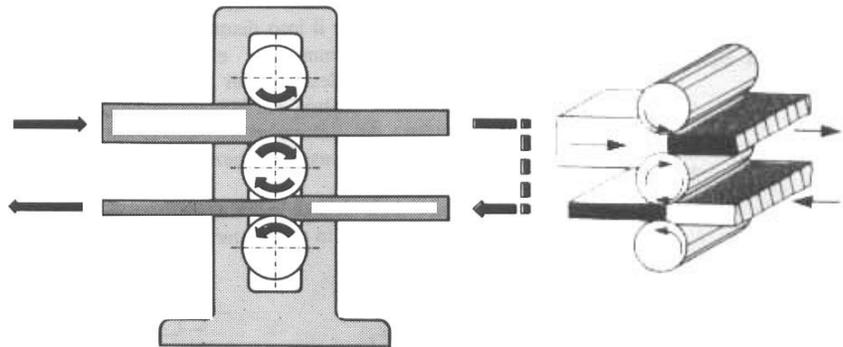


✓ Laminatoio trio

È costituito da tre cilindri disposti uno sopra l'altro. Il massello da laminare è introdotto prima tra il cilindro superiore e quello intermedio e successivamente tra quello intermedio e quello inferiore. Occorrono banchi elevabili o carrelli elevatori per spostare ai due livelli i pezzi da lavorare.

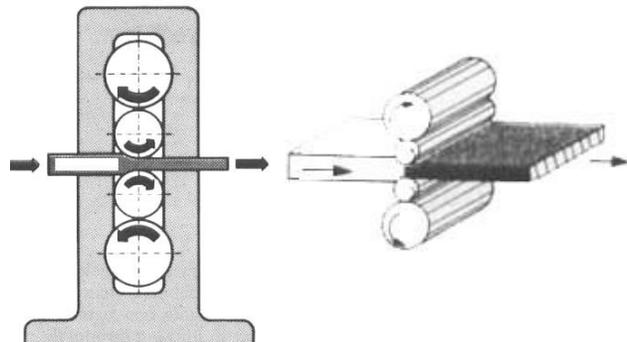
Per questo motivo si usa per la

laminazione a caldo di barre, tondi e profilati di medie dimensioni e quindi non troppo pesanti.



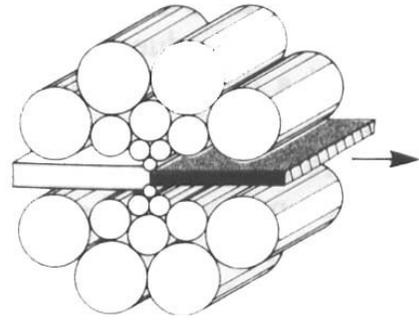
✓ Laminatoio quarto

È costituito da due grandi cilindri folli che sostengono i due cilindri di lavoro (o motori) di diametro più piccolo. In tal modo vengono ridotte le deformazioni per flessione dei cilindri. Questo tipo di laminatoio è utilizzato prevalentemente nel campo della laminazione a freddo.



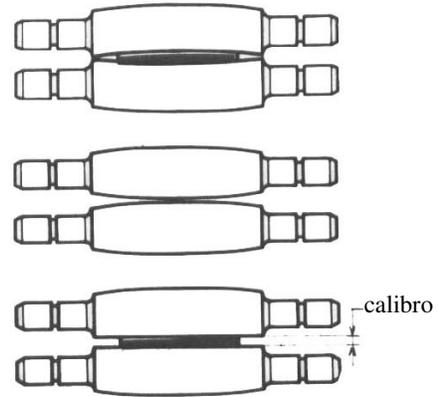
✓ Laminatoio Sendzimir

È costituito da una gabbia in acciaio da costruzione nella quale sono montati due piccoli cilindri di lavoro appoggiati a due o tre file di cilindri di sostegno. È utilizzato per lavorazione di laminati molto sottili con tolleranze sullo spessore molto strette e gradi elevati di finitura superficiale.

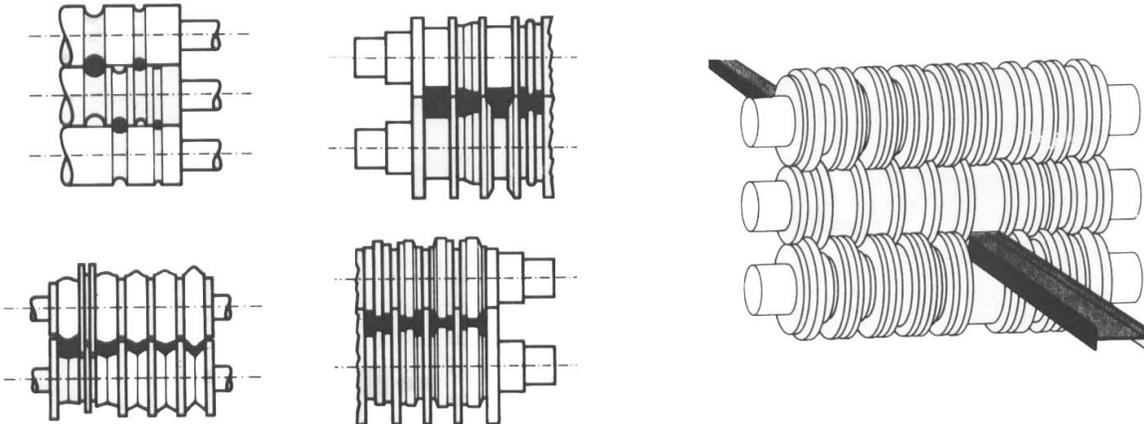


Cilindri

I cilindri dei laminatoi hanno forma e dimensioni variabili in funzione del prodotto che si deve ottenere. La loro lunghezza è circa 3 volte il loro diametro. In genere sono **bombati** (0,1 ÷ 0,2 mm) per eliminare gli effetti deformanti dovuti all'inflessione dei cilindri. La distanza tra i cilindri si chiama **calibro**. Per la lavorazione di tondi e sagomati si usano dei particolari cilindri conformati in modo che, in successive passate, il pezzo grezzo assuma la forma voluta. Sono costruiti in ghisa sferoidale con colata in conchiglia o in terra o in acciaio fucinato trattato termicamente.



Alcuni esempi di cilindri sagomati sono riportati nelle sottostanti figure



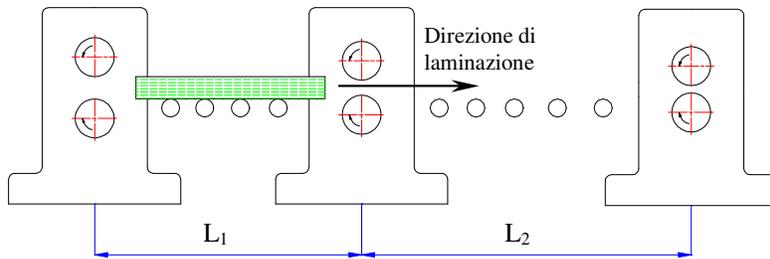
Chiaramente le deformazioni avvengono in modo progressivo per ogni passata. Un esempio di deformazione in vari passaggi, per la fabbricazione di un profilato a doppio T è riportato nella sottostante figura.

profilato	billetta	1° passaggio	2° passaggio	3° passaggio
I NP 300				

Treni di laminazione

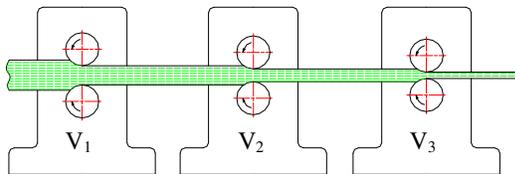
Un insieme di gabbie di laminazione costituisce un treno di laminazione. A seconda della disposizione delle varie gabbie, i treni di laminazione possono essere semicontinui o continui.

Sono **semicontinui** quando le gabbie sono disposte una di seguito all'altra a conveniente distanza in modo che il materiale che esce dalla prima gabbia può passare alla seconda e così via.



È da notare che la distanza tra le varie gabbie è sempre maggiore della lunghezza del laminato, così che sullo stesso si ha l'azione deformante di una sola coppia di cilindri per volta.

Sono **continui** quando il materiale è deformato contemporaneamente da più cilindri, per cui la



velocità di rotazione di ogni coppia di cilindri va scrupolosamente calcolata: essa dovrà aumentare in proporzione all'allungamento subito dalla barra per ogni passaggio di laminazione. Infatti deve essere rispettata la condizione che fra una gabbia e la successiva non vi sia accumulo o mancanza di

materiale. Ciò equivale a dire che la portata di materiale, ovvero il volume che passa nell'unità di tempo, deve essere costante

$$\text{Portata} = \frac{\text{volume}}{\text{tempo}} = \frac{\text{area sezione} \times \text{lunghezza}}{\text{tempo}} = \text{area sezione} \times \text{velocità} = \text{costante}$$

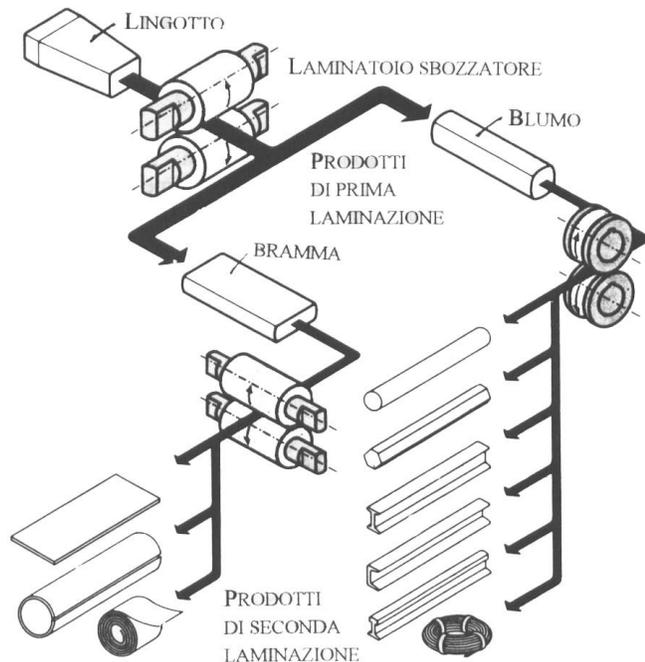
La velocità di laminazione è bassa ($V = 3 \div 4$ m/s) durante le prime fasi di sbozzatura, ma diventa molto elevata negli ultimi passaggi di finitura ($V = 20 \div 30$ m/s e anche più).

Prodotti della laminazione

I SEMILAVORATI di prima laminazione, prodotti con grossi laminatoi sbozzatori, possono essere a sezione rettangolare (**BRAMME**) o a sezione quadrata (**BLUMI**).

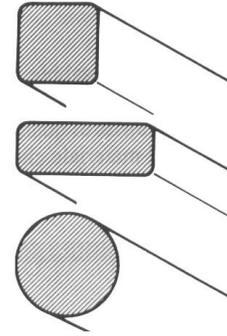
Attraverso ulteriori laminazioni, utilizzando cilindri lisci o sagomati, bramme e blumi vengono trasformati in PRODOTTI COMMERCIALI da utilizzare per le lavorazioni meccaniche. I tipici prodotti commerciali, prodotti per laminazione, si presentano sotto forma di

LAMIERE,
PROFILATI,
BARRE,
NASTRI,
TUBI,
FILI.



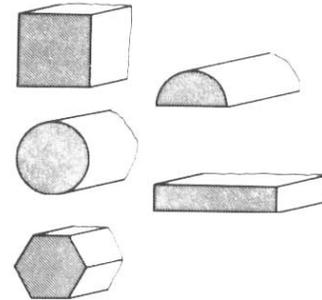
I prodotti di *prima laminazione*, in base alla forma e alla dimensione della sezione, assumono la seguente denominazione.

- **Blumi:** barre a sezione quadrata con lato fino a 400 mm.
- **Billette:** barre a sezione quadrata con lato da 40 a 12 mm.
- **Bramme:** barre a sezione rettangolare con lato maggiore variabile da 130 a 400 mm.
- **Tondi:** barre a sezione circolare con diametro maggiore o uguale a 70 mm.

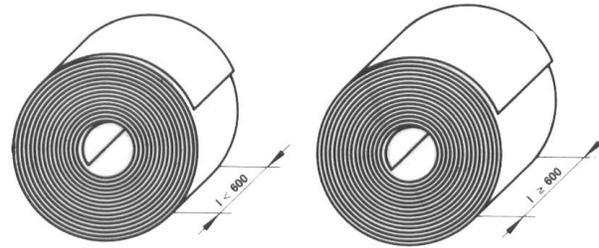


I prodotti di *seconda laminazione* sono:

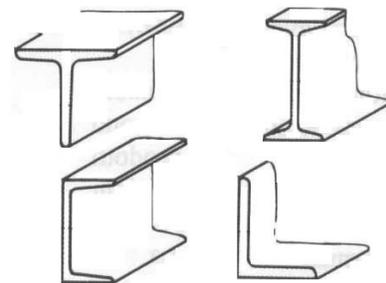
- **barre**, ovvero solidi con sezioni di forma diversa: quadrata, rettangolare, tonda, semitonda, esagonale ecc., normalmente fornite in verghe (**vergelle**) o in rotoli;



- **nastri**, ovvero laminati piatti a caldo che dopo il passaggio finale di laminazione vengono arrotolati a spire regolarmente sovrapposte, in modo da formare un rotolo a facce laterali piane: sono chiamati nastri **stretti** quando la loro larghezza è inferiore a 600 mm, **larghi** quando è maggiore;



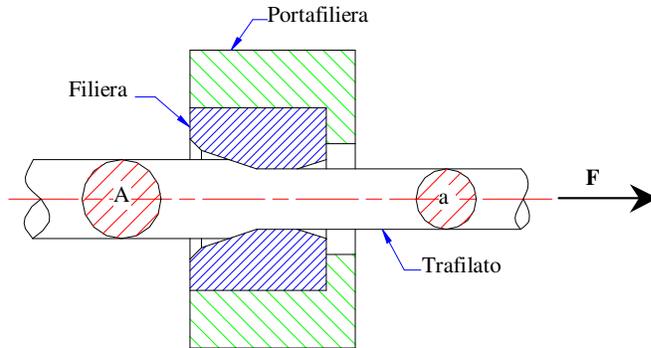
- **profilati**, ovvero solidi rettilinei a sezione sagomata a T, a L, a C, a Z, ecc. con le dimensioni di uso corrente riportate in tabelle unificate;



- **lamiere**, ovvero fogli rettangolari di spessore compreso tra 3 e 12,5 mm;
- **lamierini**, ovvero fogli rettangolari di spessore inferiore ai 3 mm.

➤ TRAFILATURA

È un'operazione di deformazione plastica che sfrutta la **ductilità** (o **trafilabilità**) di alcuni materiali metallici. La lavorazione si esegue costringendo il materiale, mediante **trazione**, a fluire attraverso un foro calibrato di forma opportuna, chiamato **filiera** o **trafila**, di sezione trasversale più piccola della sezione del materiale.



Il materiale da trafilare viene ridotto di sezione alla sua estremità, affinché possa imboccare nel foro della filiera.

Si chiama rapporto di trafilatura **R** il rapporto tra l'area della sezione finale e quella iniziale dopo il passaggio in una trafilatura

$$R = \frac{\text{sezione finale}}{\text{sezione iniziale}} = \frac{a}{A} \quad R < 1$$

La **velocità di trafilatura** dipende, oltre che dal tipo di materiale da lavorare anche dal diametro e dal tipo di filiera usata; normalmente varia dai **10 ai 30 m/s**.

Principio della trafilatura

Poiché la barra viene tirata attraverso il foro con la forza di trazione F , l'operazione di trafilatura è effettuata generalmente **a freddo**; infatti solo a temperatura ambiente il metallo possiede resistenza sufficiente per non rompersi in seguito alle notevoli sollecitazioni di trazione cui viene sottoposto.

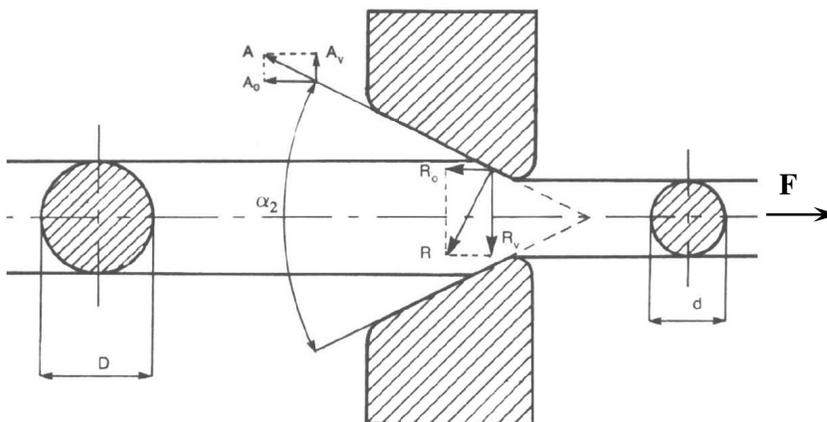
La forza di trazione da applicare dipende sia dalla sezione resistente del trafilato, sia dal materiale che si sta lavorando

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot F_1$$

essendo F_1 la forza unitaria in N/mm^2 necessaria per permettere la deformazione; il valore di F_1 assume indicativamente i valori riportati in tabella

MATERIALE	F_1 (N/mm^2)
Acciaio dolce	60
Ottone	30
Rame	20

In figura sono evidenziate le forze in gioco durante la lavorazione.



La forza **R** produce lo schiacciamento della barra da parte della filiera.

Per lo scorrimento della barra nel cono d'entrata avente angolo α_2 (angolo di RIDUZIONE o di TRAFILATURA) si genera la forza d'attrito **A**.

Scomponendo tali forze nelle direzioni parallela e perpendicolare alla direzione di trafilatura, si nota che per l'avanzamento della barra deve essere verificata la seguente relazione:

$$F > R_0 + A_0$$

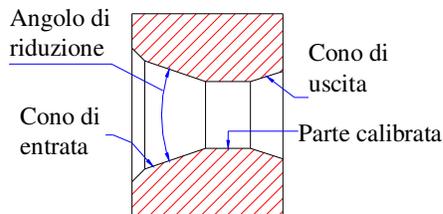
Di fondamentale importanza in questo procedimento è la **lubrificazione** per poter ridurre l'attrito tra il trafilato e le pareti della filiera e poter così diminuire lo sforzo di trazione: si usano a questo scopo lubrificanti come saponi, oli grassi animali e vegetali.

Per effetto della deformazione (schiacciamento dei cristalli), il materiale **incrudisce** diventando molto duro e quindi fragile, soprattutto in superficie, con conseguente **diminuzione della duttilità**. Pertanto dopo alcuni passaggi nella filiera (3 ÷ 4 nel caso di acciai), è opportuno sottoporre il materiale a un particolare trattamento termico, detto di **ricottura**, che lo riconduce ad uno stato più dolce e quindi di nuovo con elevata duttilità.

I prodotti di partenza sono dei semilavorati di seconda laminazione ottenuti, in genere per laminazione a caldo (**vergelle**), oppure semilavorati ottenuti per estrusione.

Filiera

È l'utensile impiegato nella trafilatura. La filiera è costruita con materiali di elevata durezza, per resistere all'usura cui è sottoposta: acciai legati temprati e rinvenuti (X200Cr13), carburi metallici sinterizzati (i più usati), diamante industriale per fili molto sottili.



La filiera ha una **parte calibrata** (a sezione costante) compresa fra due superfici coniche chiamate **cono di entrata** che ha lo scopo di facilitare l'imbocco del materiale, **cono di uscita** che serve ad interrompere lo spigolo vivo della parte calibrata per evitare rigature del trafilato o rotture per fragilità.

L'angolo del cono d'entrata, chiamato **angolo di riduzione**, assume valori compresi tra 40° e 60°.

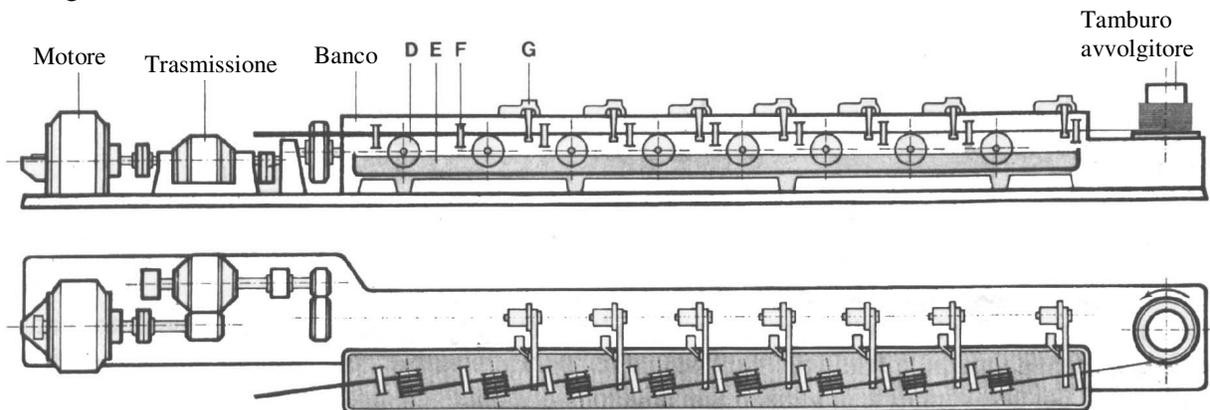
Quando il profilo della filiera non è circolare (per esempio esagonale) vengono costruite in parti componibili da assemblare.

Per limitare il consumo delle filiere, dovuto all'usura provocata dall'attrito che si manifesta per lo sfregamento del materiale trafilato, occorre un'efficiente lubrificazione.

Banchi di trafilatura

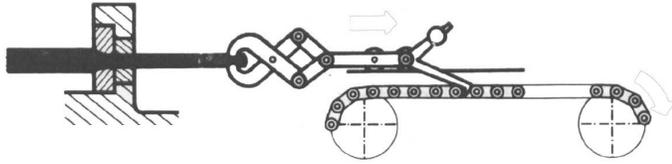
Sono utilizzati per la lavorazione di fili metallici. Sono costituiti (vedi figura) da un banco (A) su cui sono fissate una serie di filiere (F), di diametro sempre più piccolo, seguite da rulli (o aspi) avvolgitori (D) azionati da un motore, attraverso un sistema di trasmissione (C).

Il filo, guidato da supporti (G), viene tirato, su ciascuna filiera, dal rullo avvolgitore successivo. I rulli avvolgitori sono parzialmente immersi in una vasca di lubrificazione (E) con lo scopo di raffreddare e lubrificare il filo tra un passaggio e il successivo. Alla fine del banco, un tamburo avvolgitore arrotola il filo in matasse.



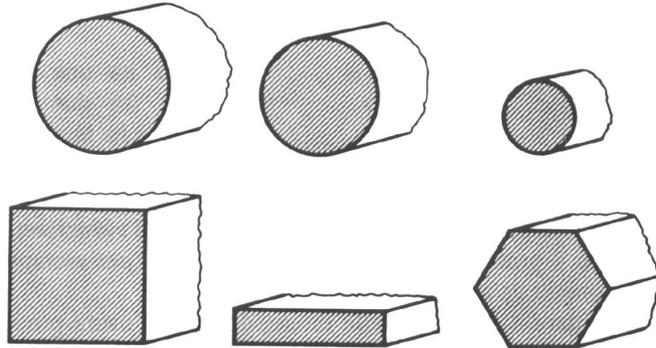
Prima dell'inizio dell'operazione, i prodotti da trafilare sono sottoposti a **pulitura meccanica** (con spazzole metalliche) e **chimica** (per immersione in una soluzione acida) per eliminare ogni traccia di ossido che ricopre la superficie.

Per la produzione di barre, in genere di limitata lunghezza, destinate ad essere lavorate per asportazione di truciolo, si utilizza una trafilatrice a banco. Essa è costituita da un banco in cui scorre, su una catena a rulli, un carrello munito di pinza che afferra la barra da trafilare e la tira lentamente costringendola a passare attraverso la filiera.



Prodotti ottenibili

Sono fili anche di piccolo diametro, barre, profilati, tubi, con **buona finitura superficiale** e **precisione dimensionale**, (toleranze variabili da **h9** ad **h11**) nettamente superiore a quelle ottenibili con la laminazione, poiché la trafilatura avviene a freddo. Sono più **costosi** rispetto ai laminati, ma consentono di risparmiare alcune lavorazioni alle macchine utensili.



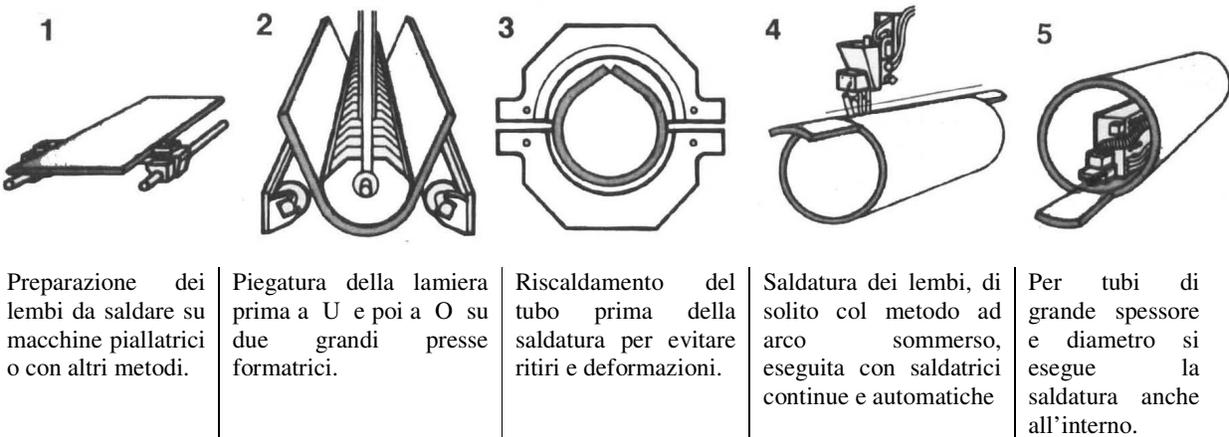
✓ FABBRICAZIONE DI TUBI

Possono essere prodotti **con o senza saldatura**. I tubi saldati si suddividono in tubi con saldatura longitudinale o elicoidale a seconda di come viene piegata la lamiera che viene utilizzata per la fabbricazione del tubo.

Si ricorre ai tubi saldati quando questi hanno grande diametro e non devono sopportare pressioni eccessive, mentre negli altri casi vengono fabbricati per laminazione, per trafilatura o, nel caso di tubi di piccole lunghezze con profili esterni particolari, per estrusione.

↳ *Tubi saldati longitudinalmente*

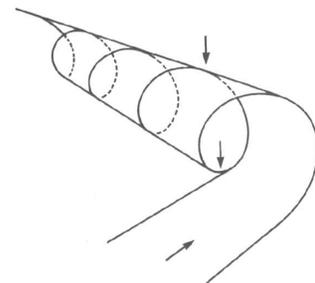
Sono fabbricati a partire da un nastro metallico di larghezza corrispondente allo sviluppo del tubo da produrre e di spessore uguale. Le varie **fasi di lavorazione** sono rappresentate in figura



I tubi così prodotti **non possono essere curvati** perché si aprono facilmente in corrispondenza della linea di saldatura, quindi quando per esigenze di utilizzo si deve ricorrere alla curvatura del tubo si usano i tubi saldati elicoidalmente.

↳ *Tubi saldati elicoidalmente*

Sono fabbricati avvolgendo il nastro di lamiera ad elica intorno a una spina cilindrica, in modo che i bordi si sovrappongano. Viene successivamente eseguita la saldatura elicoidale ad arco sommerso con procedimenti automatici.



Tutti i tubi saldati sono rigorosamente controllati, in particolare vengono sottoposti a scrupolosi esami i giunti di saldatura per la rilevazione di eventuali difetti esterni e soprattutto interni. Le tecniche di controllo più utilizzate sono quelle che fanno uso di ultrasuoni o di raggi **X**.

Inoltre si eseguono delle prove idrauliche di resistenza e tenuta con pressioni fino a 20 ÷ 30 MPa.

↳ Tubi ottenuti per laminazione

Il procedimento più usato è basato sulla **laminazione obliqua** (sistema MANNESMANN). Il processo avviene in due fasi.

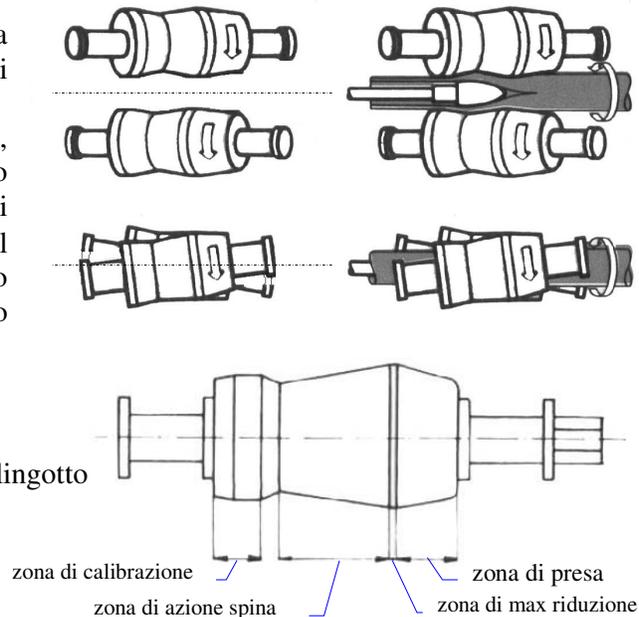
1) Foratura del massello

Il materiale di partenza è un lingotto pieno a sezione circolare portato alla temperatura di massima plasticità (1300°C per gli acciai).

Il lingotto viene trasformato in un tubo grezzo, con le superfici cilindriche irregolari (sbozzato forato), facendolo passare tra due cilindri ad assi sghembi, inclinati di $4^\circ \div 8^\circ$ rispetto all'asse del lingotto. I cilindri hanno un profilo bitroncoconico (sagoma a botte) e ruotano nello stesso senso a $300 \div 500$ giri/min.

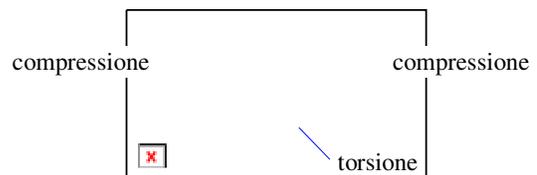
Si distinguono le seguenti zone del profilo:

- zona di presa in cui avviene l'afferraggio del lingotto
- zona di massima riduzione della sezione;
- zona nella quale agisce la spina;
- zona di calibrazione.

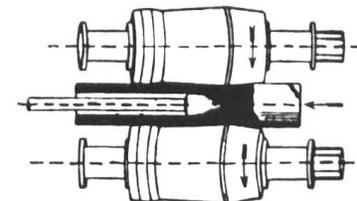


Il lingotto, che si trova allo stato di massima plasticità, è sottoposto nella zona di presa e in quella di massima riduzione a una forte compressione e torsione che tendono a schiacciarlo e a farlo ruotare, imprimendogli un moto di avanzamento elicoidale.

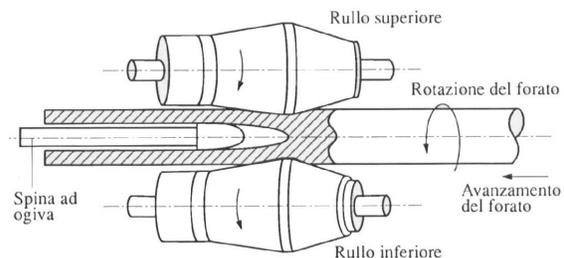
Le parti più esterne del lingotto, spinte dai rulli che ruotano, scorrono rispetto alle parti più interne, provocando una lacerazione delle fibre centrali del materiale.



Nella fase successiva, la lacerazione viene allargata da una spina a punta che si insinua nel vano centrale in formazione.



Mentre il lingotto avanza, spinto dai cilindri, la punta della spina penetra allargando e regolarizzando il foro.



Dopo la laminazione il lingotto è trasformato in tubo grezzo dalle pareti molto spesse e di forma irregolare.

2) Laminazione del forato grezzo

Lo sbozzato forato si trasforma in tubo commerciale attraverso una ulteriore lavorazione che consente di ridurre lo spessore e regolarizzare le superfici cilindriche.

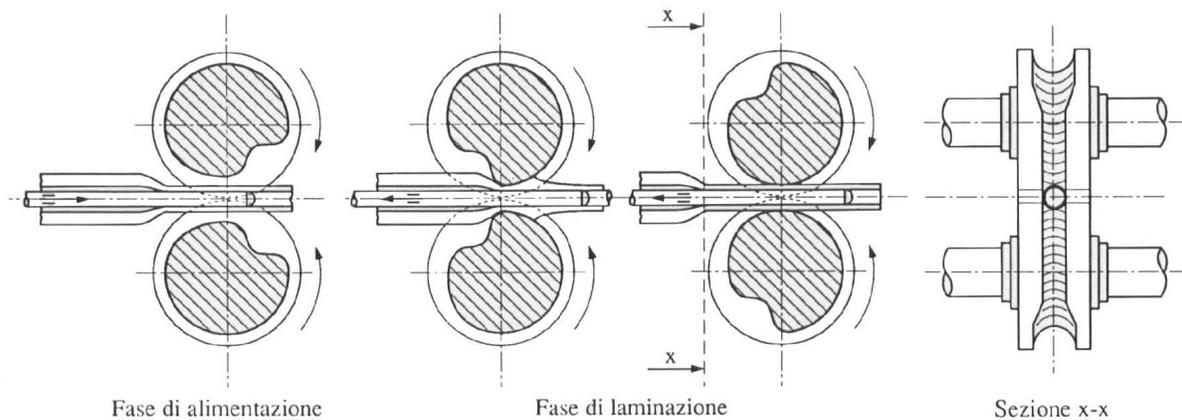
Ciò avviene in uno speciale laminatoio detto “ a **PASSO DI PELLEGRINO**” (due passi avanti e uno indietro).

Tale laminatoio è formato da due cilindri controrotanti, ad assi paralleli, muniti di scanalature (GOLE) il cui profilo varia radialmente sia in larghezza, sia in profondità (tipo CAMMA).

In tal modo la luce di passaggio tra i due cilindri varia ciclicamente da un diametro massimo (poco maggiore di quello del forato grezzo) ad un minimo, pari al diametro esterno del tubo che si vuole fabbricare.

Nel forato da laminare viene inserito un mandrino di diametro uguale al diametro interno del tubo che si sta fabbricando.

Durante la lavorazione il tubo viene fatto avanzare e retrocedere alternativamente attraverso un dispositivo d'avanzamento oleodinamico sincronizzato con la rotazione dei cilindri.



Nella **fase di alimentazione**, lo sbozzato avanza liberamente nella gola più ampia tra i due cilindri.

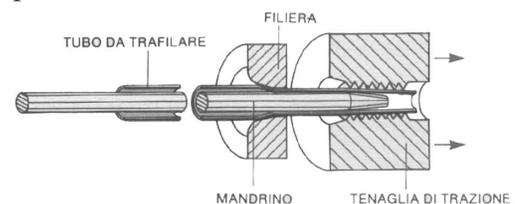
Nella **fase di laminazione**, lo sbozzato incontra la gola nella zona più piccola, viene risospinto all'indietro e durante questa corsa i cilindri operano la deformazione plastica (compressione, stiratura e calibratura), che porta il tubo allo spessore desiderato facendolo allungare.

↳ *Tubi ottenuti per trafilatura*

Di seguito si riporta solo la lavorazione che consente, a partire da un tubo, di ottenere una riduzione del diametro, migliore precisione dimensionale e superficie più liscia.

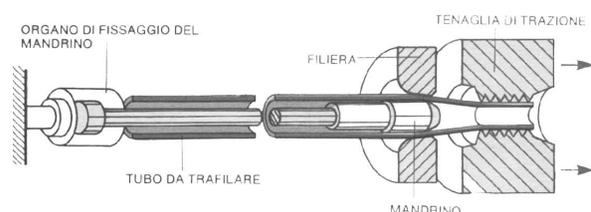
Il tubo infilato in un mandrino viene costretto a passare, per trazione, in una filiera.

Il mandrino può scorrere assieme al tubo nella filiera (TRAFILATURA CON MANDRINO INTERNO LUNGO).



Oppure

il mandrino è fisso e fa da tappo alla filiera (TRAFILATURA CON MANDRINO INTERNO CORTO) permettendo la deformazione del tubo di partenza.



✓ FUCINATURA

È una lavorazione per deformazione plastica, eseguita sempre a **caldo**, attraverso percussioni o pressioni, in modo da dare al materiale di partenza, portato allo stato pastoso, la forma voluta.

I materiali adatti sono quelli **malleabili** ed in particolare quelli che passando dallo stato solido allo stato liquido presentano uno stato intermedio in cui il materiale si presenta allo stato pastoso e quindi facilmente **deformabile per percussione**, applicando delle forze dinamiche con martelli o con MAGLI, o **per pressione**, applicando delle forze statiche con PRESSE idrauliche o meccaniche.

La fucinatura può essere eseguita a mano, nel caso di pezzi di piccole dimensioni, con martello e incudine, o a macchina attraverso magli o presse. Il riscaldamento dei pezzi, prima della lavorazione, viene fatta attraverso la forgia a carbone per la fucinatura a mano, per mezzo di forni per la fucinatura a macchina.

La fucinatura mantiene le migliori caratteristiche di resistenza meccanica a fatica perché non interrompe la struttura fibrosa dei materiali, ma si limita a deformarla. Inoltre migliora ed uniforma, in generale, le caratteristiche meccaniche del materiale, eliminando per l'effetto di schiacciamento che subisce eventuali difetti interni.

Lo schiacciamento dei cristalli non provoca inacidimento del materiale, in quanto la lavorazione avviene ad elevate temperature (per l'acciaio $900 \div 1150$ °C).

I PRODOTTI DI FUCINATURA sono, generalmente, organi meccanici che devono sopportare sforzi ripetuti quali **bielle, manovelle, alberi a gomito**, o pezzi difficilmente realizzabili con altre lavorazioni quali **chiavi inglesi, maniglie, coperchi, posate**.

In figura sono rappresentate le sezioni di uno stesso particolare meccanico fabbricato con procedimenti diversi.

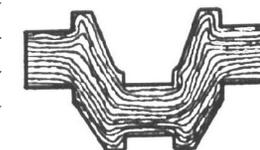
Quando è ottenuto per **fusione**, non si ha alcuna struttura fibrosa, poiché i cristalli non hanno un orientamento privilegiato, ma solo casuale.



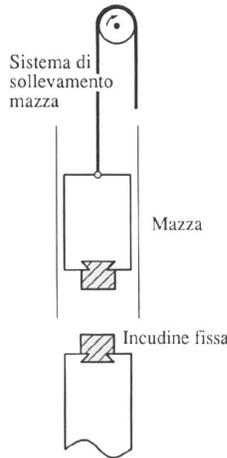
Quando è ottenuto per **asportazione di truciolo**, si ha una struttura fibrosa originaria, dovuta al processo di lavorazione che ha subito (laminazione, trafilatura), interrotta dal taglio del materiale in eccesso. *Le fibre sono una schematizzazione dei cristalli allungati nella direzione di laminazione o altra lavorazione tipica che produce lo stesso effetto.*



Quando è ottenuto per **fucinatura o stampaggio**, si ha una struttura fibrosa originaria deformata, in modo più o meno rilevante, a seconda delle entità delle deformazioni che ha subito il pezzo. Questa caratteristica struttura fibrosa induce nel materiale un notevole aumento della resistenza meccanica e della capacità di sopportare urti e sforzi ripetuti (**fatica**).



Nelle figure sono riportati gli schemi funzionali di un MAGLIO A GRAVITÀ



La mazza, in acciaio legato, di massa variabile da 100 kg a 10000 kg, viene sollevata fino ad un'altezza di 1 ÷ 4 m da sistemi meccanici o pneumatici.

L'incudine fissa ha una massa di 10 ÷ 30 volte maggiore della massa della mazza.

Durante la lavorazione, la mazza cade da un'altezza H e colpisce il pezzo disposto sull'incudine fissa.

Nell'urto la mazza cede al pezzo l'energia necessaria per realizzare la deformazione plastica.

Tale energia, di natura cinetica, rappresenta la quantità di lavoro L_m fornita dal maglio al pezzo e assume valore

$$L_m = \frac{1}{2} M_m \cdot v^2 \quad (J) \quad \text{con} \quad \begin{cases} M_m = \text{massa della mazza} \\ v = \text{velocità con cui la mazza colpisce il pezzo} \end{cases}$$

La velocità v dipende dall'altezza di caduta della mazza H e vale $v = \sqrt{2 \cdot a \cdot H} \quad \left(\frac{m}{s}\right)$

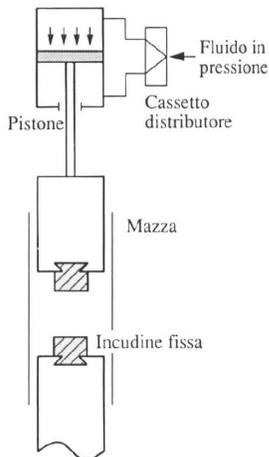
Pertanto il **lavoro teorico** fornito dal maglio vale

$$L_m = \frac{1}{2} M_m \cdot v^2 = \frac{1}{2} M_m \cdot (\sqrt{2 \cdot g \cdot H})^2 = M_m \cdot g \cdot H = P_m \cdot H \quad \text{essendo } P_m \text{ il peso della mazza.}$$

In realtà una piccola parte di questa energia non è ceduta al pezzo, in quanto viene assorbita dall'incudine e dal terreno su cui poggia la macchina. Studi nel settore hanno dimostrato che l'energia assorbita è tanto maggiore quanto più piccola è la massa dell'incudine e quanto più elastico è il terreno. Pertanto il **LAVORO EFFETTIVO** che il maglio cede al pezzo vale:

$$L_{m \text{ eff}} = L_m \cdot \eta \quad \text{essendo } \eta \text{ un opportuno coefficiente di rendimento.}$$

Nelle figure sono riportati gli schemi funzionali di un MAGLIO A DOPPIO EFFETTO.



In questo caso la mazza, cadendo dall'altezza H acquista una velocità dovuta sia alla sua forza peso P_m , sia alla spinta S del fluido in pressione nel cilindro che vale

$$S = p \cdot A_{\text{cilindro}} \quad (N)$$

p = pressione media del fluido nel cilindro

A_{cilindro} = area sezione cilindro

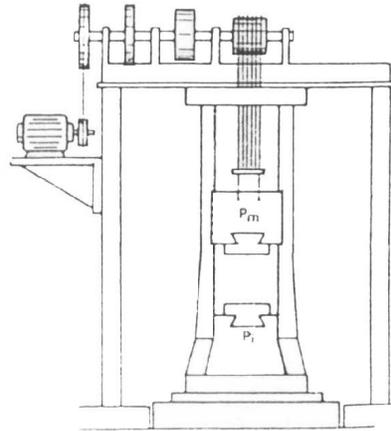
Pertanto l'accelerazione con cui cade la mazza, non vale più g come nel caso di maglio a semplice effetto, ma assume il

$$\text{valore } a = \frac{P_m + S}{M_m} \quad \left(\frac{m}{s^2}\right)$$

Quindi la velocità della mazza al momento dell'urto vale $v = \sqrt{2 \cdot a \cdot H} \quad \left(\frac{m}{s}\right)$

E procedendo come nel caso del maglio a gravità si arriva all'espressione finale del lavoro effettivo che la mazza fa sul pezzo

$$L_{m \text{ eff}} = L_m \cdot \eta \quad (J) \quad \text{con} \quad L_m = (P_m + S) \cdot H$$



✓ STAMPAGGIO

È una lavorazione per deformazione plastica con cui si modificano le dimensioni di un materiale e gli si dà la forma voluta comprimento un massello in una **forma metallica** chiamata **stampo**.

Con stampaggio s'intende anche la lavorazione delle lamiere con lo scopo di fare assumere ad esse una certa forma senza modificarne lo spessore (STAMPAGGIO A FREDDO).

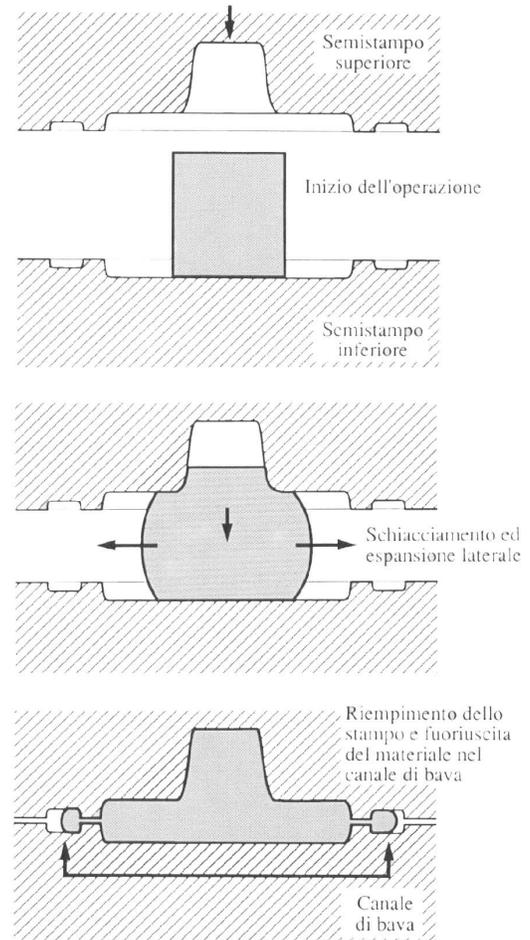
Lo stampaggio della lamiera è eseguita a freddo, mentre lo stampaggio partendo da massello è eseguita sempre a caldo.

Per l'alto costo della fabbricazione degli stampi, tale lavorazione è riservata alla produzione di molti pezzi di uguale forma e dimensioni: **lavorazione in serie**.

↳ Stampaggio a caldo

In figura si vedono le varie fasi per lo stampaggio a caldo di un pezzo meccanico a partire da un massello.

1. Il massello viene posizionato sullo stampo inferiore; prima di questa fase tutto lo stampo viene lubrificato, in modo da ridurre l'attrito dovuto allo sfregamento del massello che si deforma sulle pareti dello stampo. Per evitare che al contatto stampo massello, quest'ultimo si raffreddi velocemente, perdendo parte della plasticità, si può procedere al preriscaldamento dello stampo.
2. Per effetto della pressione esercitata dallo stampo superiore, il massello si schiaccia assumendo man mano la forma dello stampo. Inoltre l'azione di compressione, prodotta sul materiale dalle pareti dello stampo, provoca una maggiore compattezza e l'eliminazione di gran parte dei difetti interni, spesso presenti nei pezzi fusi.
3. Ad operazione ultimata, il massello originario assumerà la forma voluta e il materiale in eccesso che fuoriesce nel canale di bava verrà successivamente tranciato su apposito stampo.



Il problema essenziale nello studio dello stampaggio è riuscire ad assicurare un corretto e completo riempimento degli stampi.

MATERIALI PER STAMPI

I requisiti essenziali degli acciai per stampi sono la durezza superficiale accoppiata a una buona tenacità a caldo, la resistenza all'usura e alla corrosione alle alte temperature, la bassa sensibilità agli sbalzi di temperatura e l'indeformabilità ai trattamenti termici.

Questi requisiti si ottengono impiegando **acciai speciali** con medio tenore di carbonio ($C = 0,35 \div 0,55\%$) legati con Cr, Mo, V, o con Ni, Cr, Mo, V.

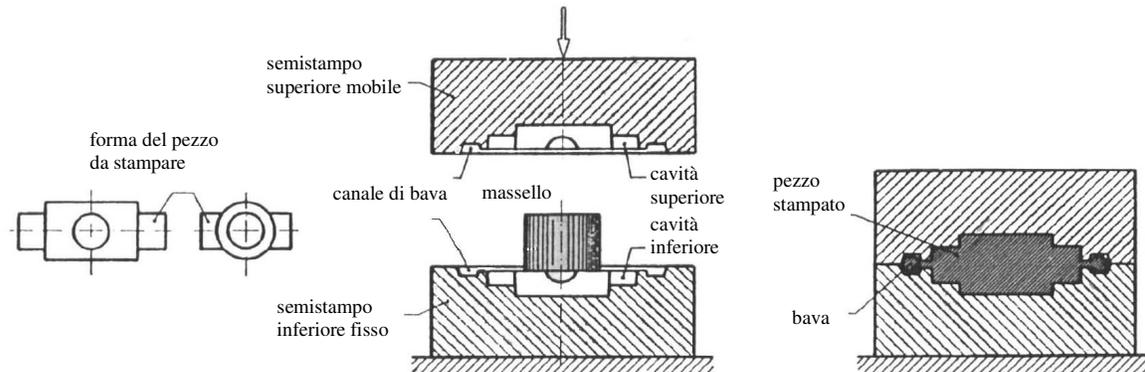
La durezza dello stampo finito può variare da 48 a 55 HRC secondo che si desideri fare prevalere rispettivamente la tenacità o la resistenza all'usura.

TIPICI DI STAMPI

✓ Stampi aperti

Si prestano per lo stampaggio di pezzi di forma regolare, tale da poter essere divisi in parti pressochè uguali e simmetriche. La forma della cavità dello stampo (IMPRONTA) riproduce in negativo la forma esterna del pezzo, mentre le dimensioni vengono aumentate di circa 1% per tenere conto della diminuzione di volume dello stampato nel raffreddamento fino a temperatura ambiente. Per facilitare l'estrazione del pezzo dallo stampo si prevedono degli **angoli di spoglia** (o di sforno) di valori uguali all'incirca a 6° per gli esterni e a 8° per gli interni.

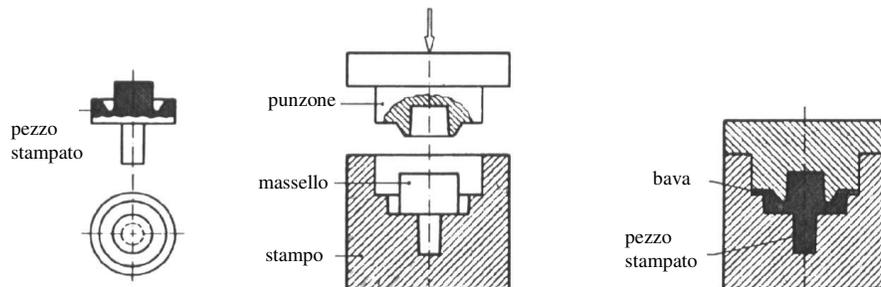
Lungo tutto il contorno della cavità è praticato un solco, detto **canale di bava**, entro il quale deborda il materiale eccedente del massello di partenza. In figura è riportato uno schema.



✓ Stampi semichiusi

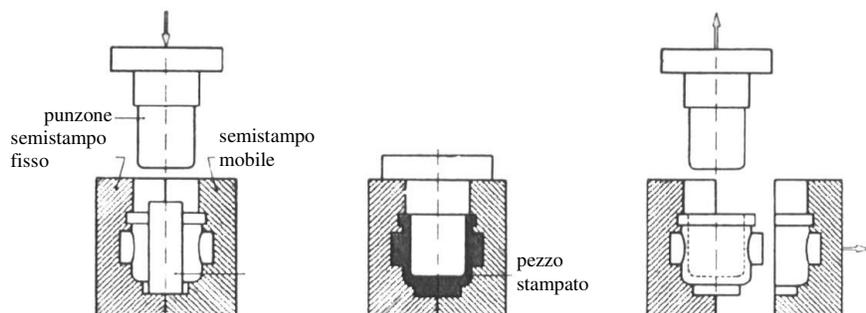
Sono adatti per pezzi di forma anche complessa, ma facilmente estraibile dallo stampo. La deformazione del massello avviene contemporaneamente per compressione e per estrusione. Per facilitare l'estrazione del pezzo le superfici della cavità vengono lavorate mediante **lappatura** e le pareti verticali presentano angoli di spoglia di $3^\circ \div 5^\circ$.

Anche per questi stampi sono previsti i canali di bava. In figura è riportato uno schema.



✓ Stampi chiusi

S'impiegano per pezzi di forma non ottenibili con altri tipi di stampi. Il semistampo inferiore è scomponibile in due parti, per cui non sono necessari angoli di sforno. Lo stampaggio avviene **senza** formazione di **bava** e la precisione di forma e di dimensioni del pezzo sono notevoli, quindi sono ridotti al minimo i sovrametalli. In figura è riportato uno schema.



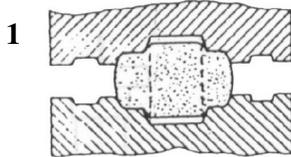
Questo procedimento, molto **costoso** per la cura che richiede la fabbricazione degli stampi, si usa per materiali facilmente deformabili, con minima pressione, a basse temperature e in un intervallo abbastanza ampio, in modo da scorrere e riempire tutti gli incavi dello stampo, anche se sottili.

Tali materiali sono: certi OTTONI (P-CuSn 40), i BRONZI all'alluminio e al silicio, alcune LEGHE LEGGERE da lavorazione plastica.

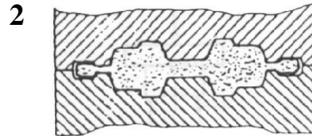
Sono riportati di seguito due esempi di stampaggio.

Stampaggio di una puleggia

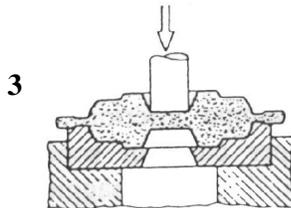
Le varie fasi comprendono



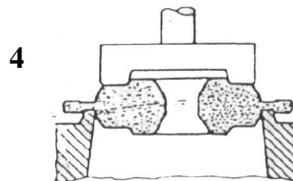
Sgrossatura del massello cilindrico in modo che la riduzione dello spessore provochi un aumento del diametro



Finitura della forma esterna della puleggia con lo stampo a finire

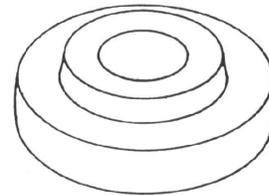


Punzonatura della parte centrale con lo stampo di tranciatura



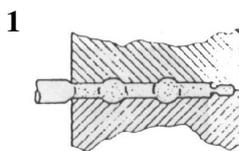
Tranciatura finale della bava con lo stampo a sbavare

Con ulteriori lavorazioni di finitura si ottiene il pezzo finito commerciale rappresentato in figura

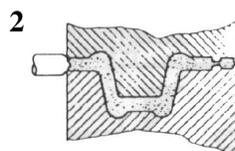


Stampaggio di un albero a gomito

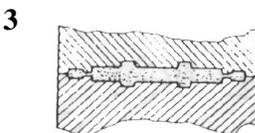
Le varie fasi comprendono



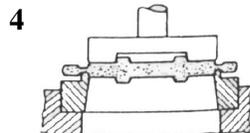
Sbozzatura della barra di partenza, con stampo aperto, per stirare il materiale al centro e alle estremità



Piegamento dello sbozzato



Stampaggio definitivo con lo stampo a conformazione finale



Tranciatura finale della bava con lo stampo a sbavare

