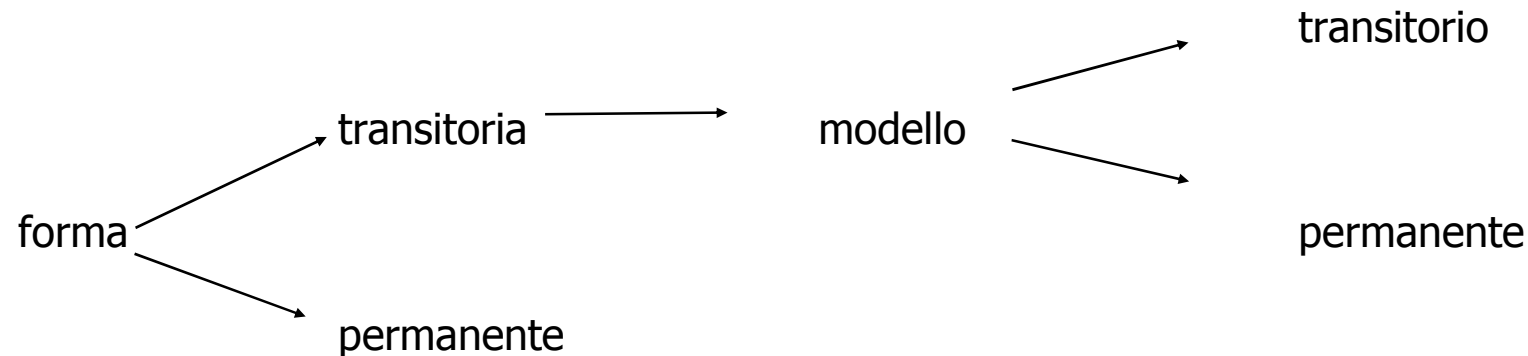


## PROGETTAZIONE DELLA FORMA

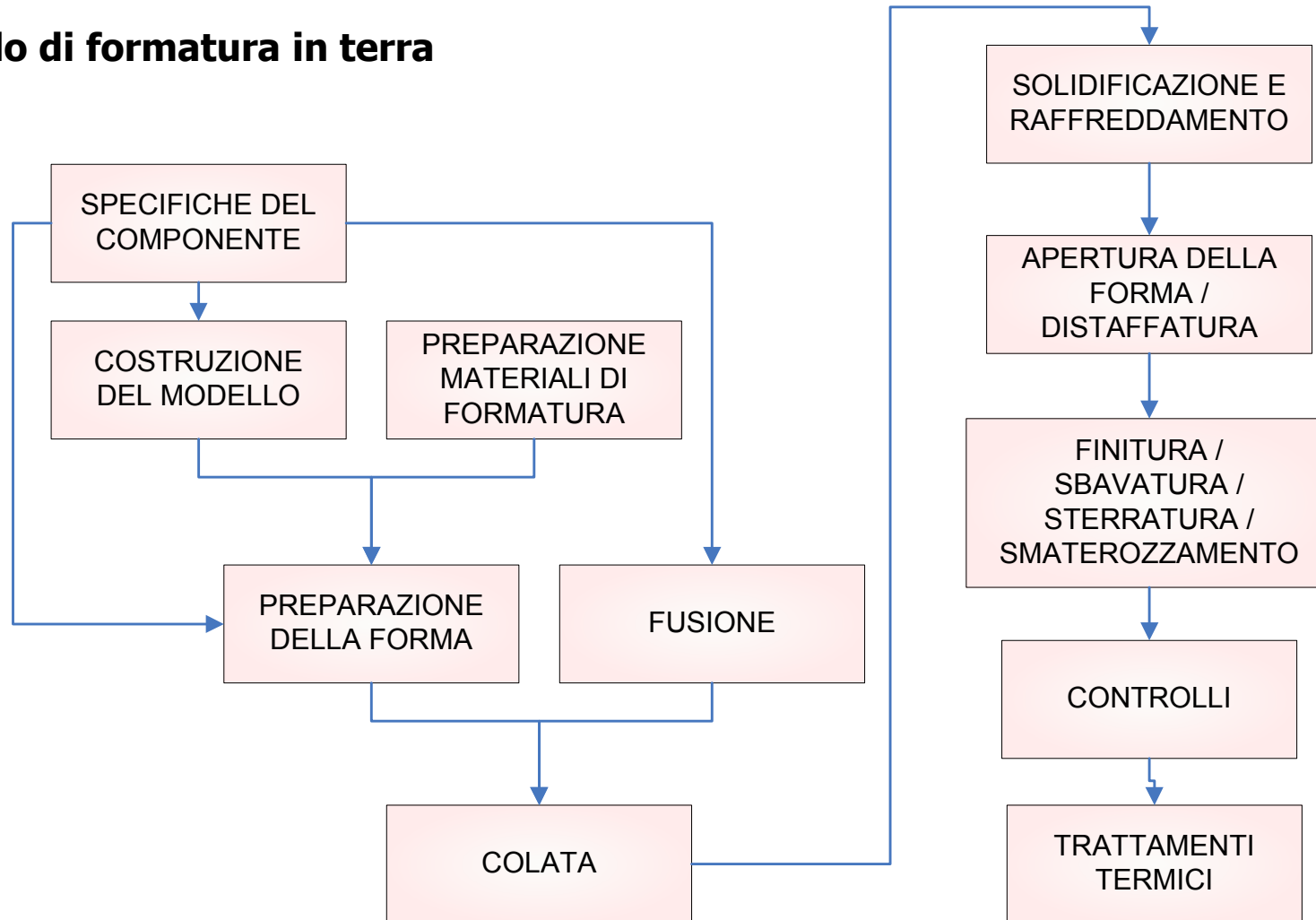
realizzazione della cavità all'interno della forma  
nella quale verrà colato il metallo liquido



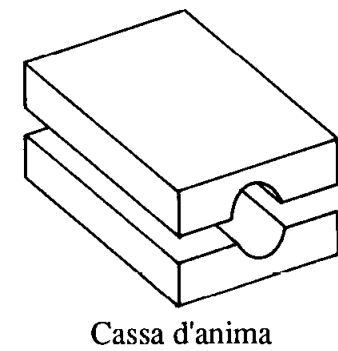
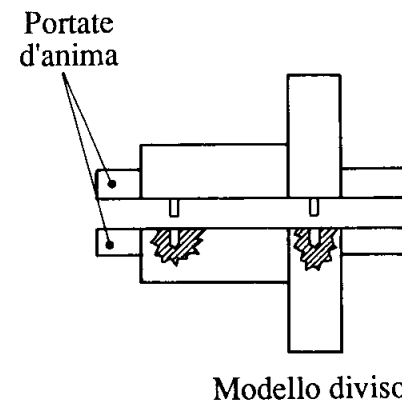
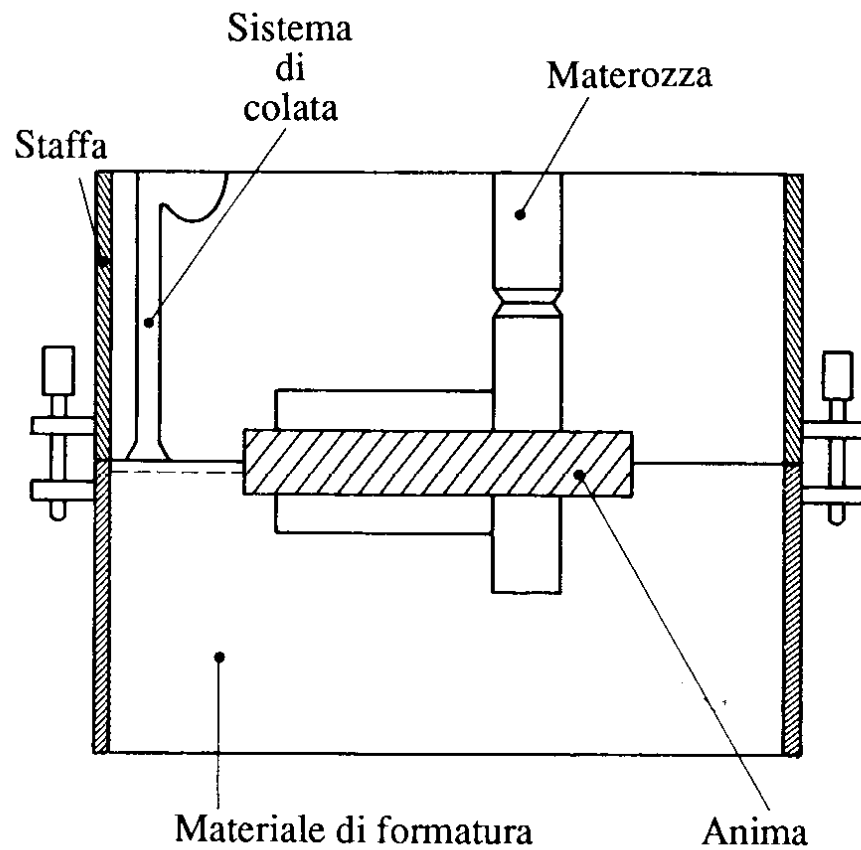
forme transitorie - possono essere distrutte dopo la colata → materiale: terra di fonderia  
 - devono permettere l'estrazione del modello → piano di separazione

forme permanenti - devono essere resistenti e durature → materiale metallico  
 - devono permettere estrazione del pezzo → angoli di sformo

### Ciclo di formatura in terra



Forma e modello

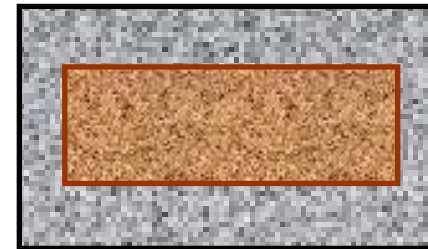


Scelta del piano di separazione

modello  
dell'oggetto  
da produrre

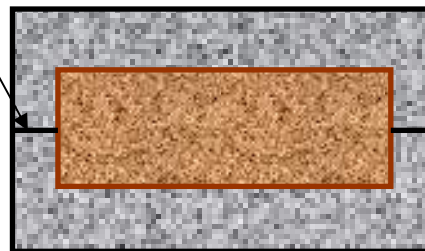


modello all'interno della staffa



dal momento che il modello deve essere riutilizzato (modello permanente)  
come si fa ad estrarlo senza danneggiarlo?

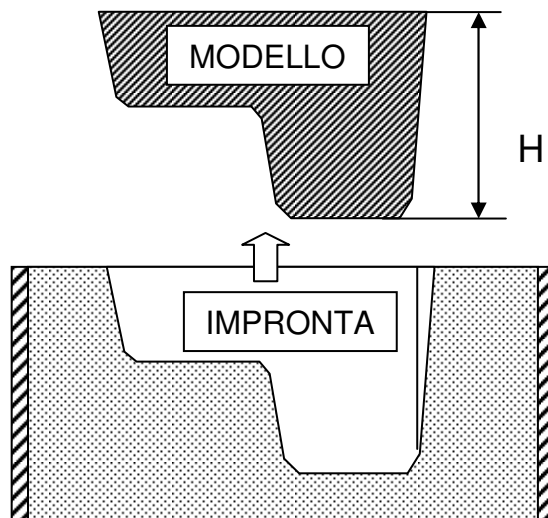
piano di separazione delle staffe



## Angoli di sforno

VALORI DELLO SFORMO  $s$  in mm e in %  
dell' ANGOLO di SFORMO  $\beta$

per permettere  
estrazione del modello

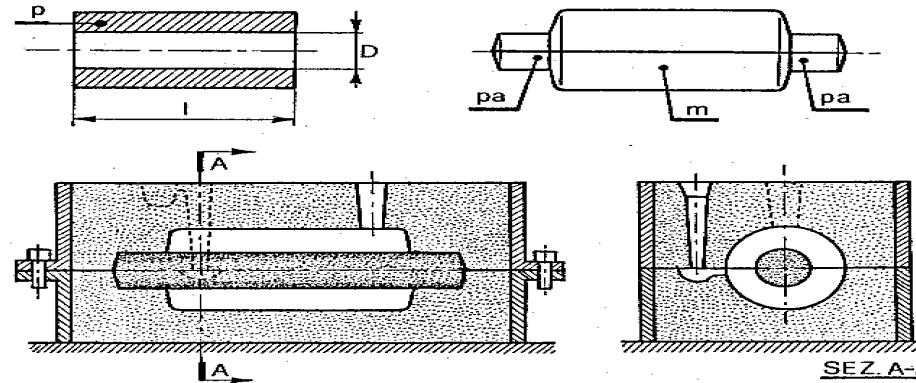


ALTEZZA del MODELLO (mm)	SFORMO		Angolo di sforno $\beta$
	$s$ (mm)	(%)	
fino a 40	0.5	1.25	1'30"
40 - 59	0.75	1.8 - 1.2	1'
60 - 119	1	1.7 - 0.8	40"
120 - 159	1.5	1.7 - 0.8	40"
160 - 199	1.75	1.1 - 0.9	40"
200 - 249	2	1.0 - 0.8	30"
250 - 299	2.5	1.0 - 0.8	30"
300 - 399	3	1.0 - 0.75	30"
400 - 499	3.5	0.9 - 0.8	30"
$\geq 500$	4	$\leq 0.8$	30"

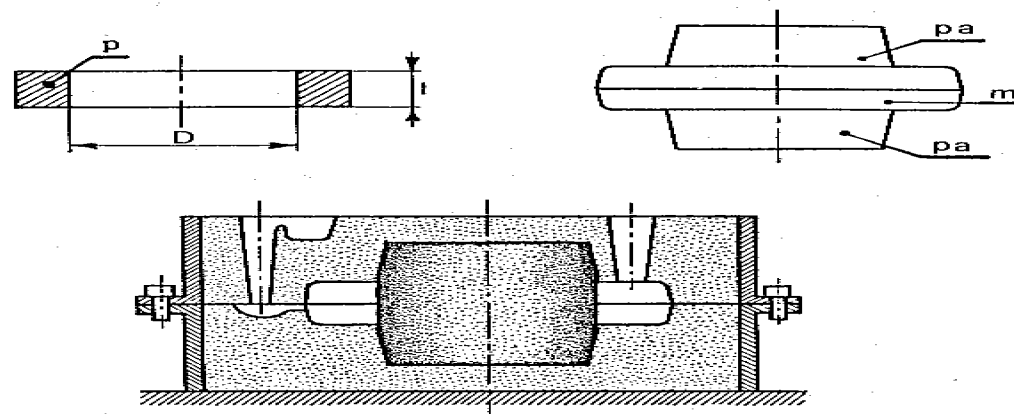
I valori di questa tabella sono di preferenza da adottare per modelli METALLICI, lavorati a macchina, possibilmente fissati su placche e ben finiti. La sfornatura dovrà essere fatta con vibrator e con guide o, meglio, su macchine a sfornare.

Il modello deve essere modificato per una necessità tecnologica

Disposizione dell'impronta nella forma



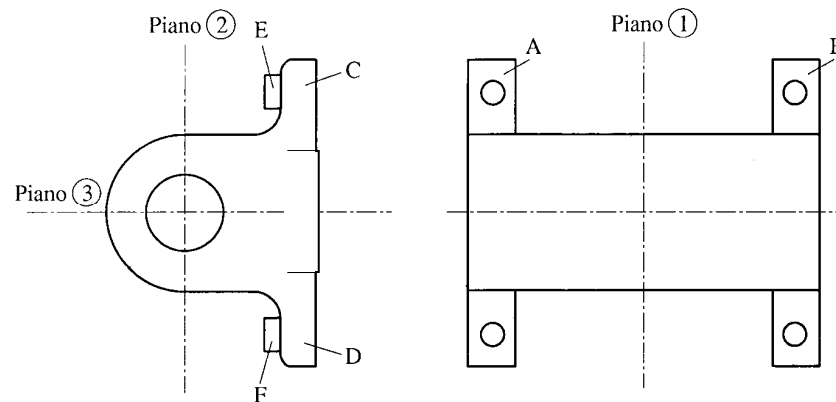
$L/D \gg 1$



$L/D \ll 1$

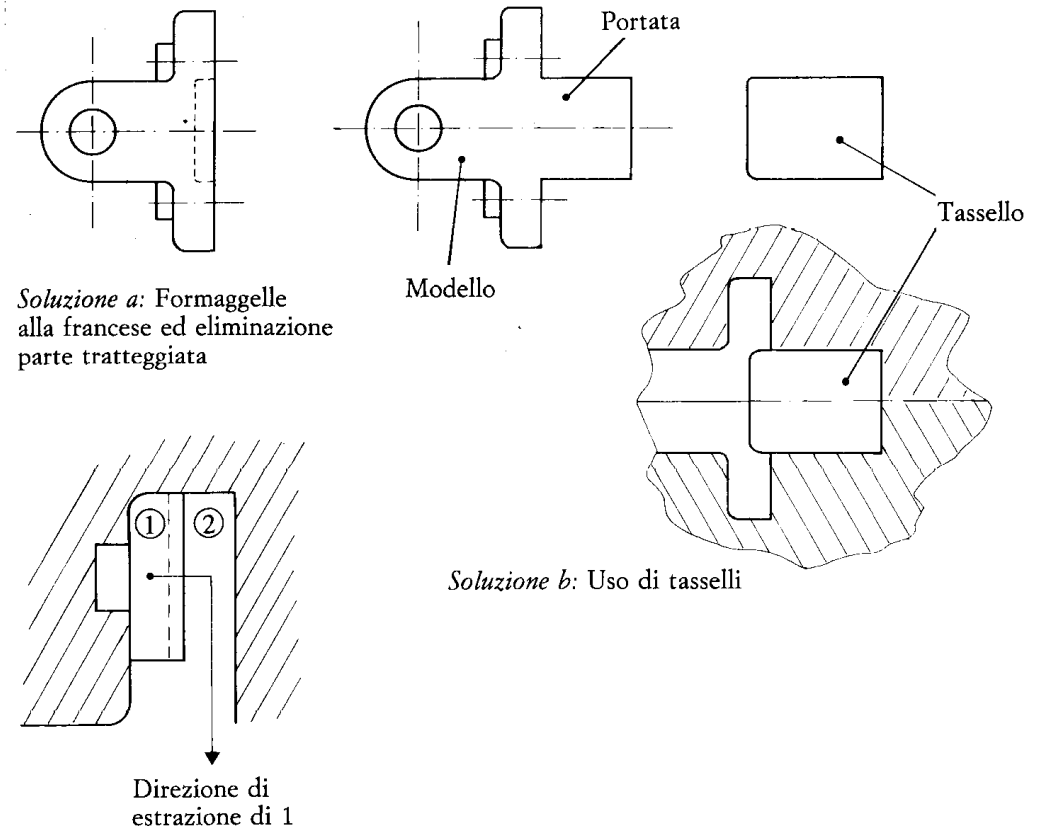
## Eliminazione sottosquadri

problema



Scelta del piano di divisione per l'eliminazione dei sottosquadri: il piano 1 trova il sottosquadro in A e B, il piano 2 trova il sottosquadro in C e D, il piano 3 trova il sottosquadro in E, C, D, F.

soluzioni

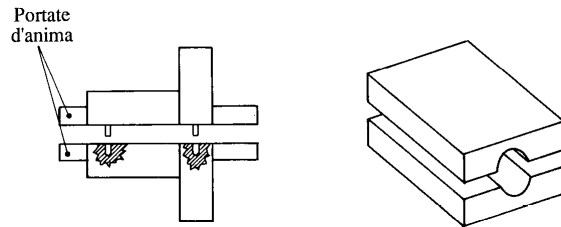


*Soluzione a:* Formaggelle alla francese ed eliminazione parte tratteggiata

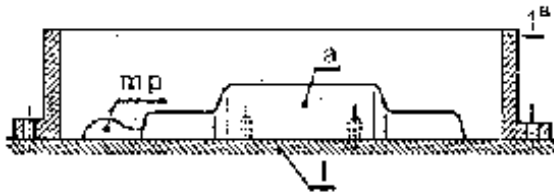
*Soluzione b:* Uso di tasselli

*Soluzione c:* Modello scomponibile in 1 e 2

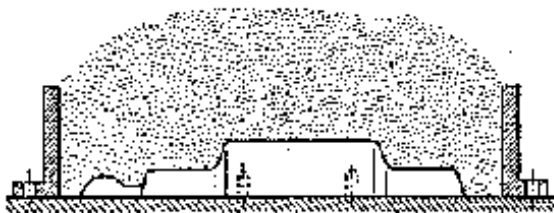
## Preparazione della forma



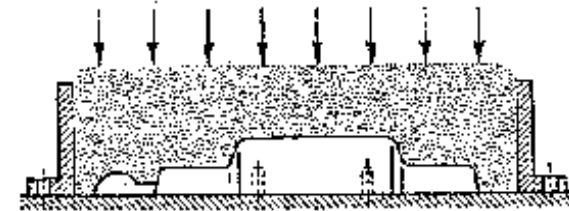
0: preparazione del modello



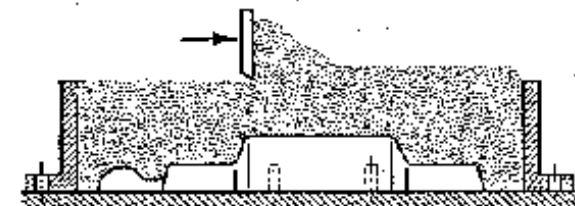
1. Semimodello con i fori di riferimento appoggiato su un piano



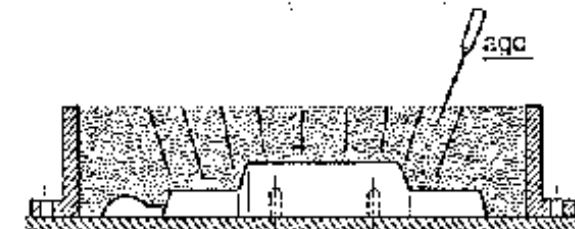
2. Riempimento



3. Compressione

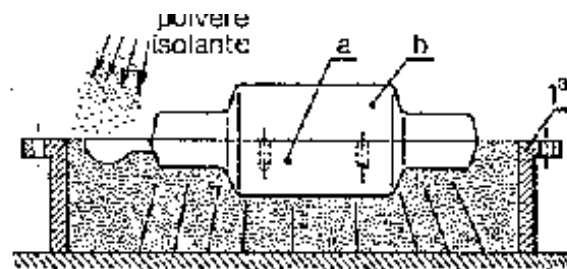


4. Eliminazione terra in eccesso

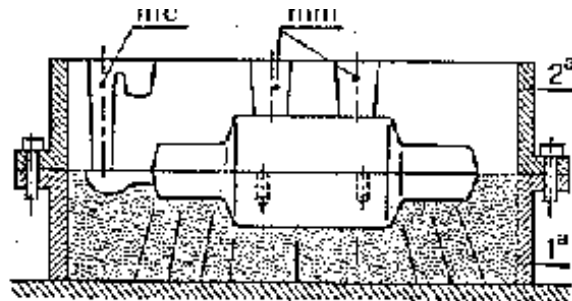


5. Realizzazione tirate d'aria

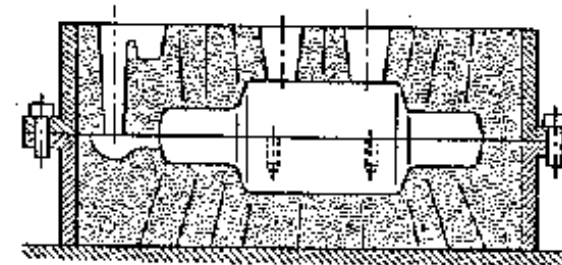




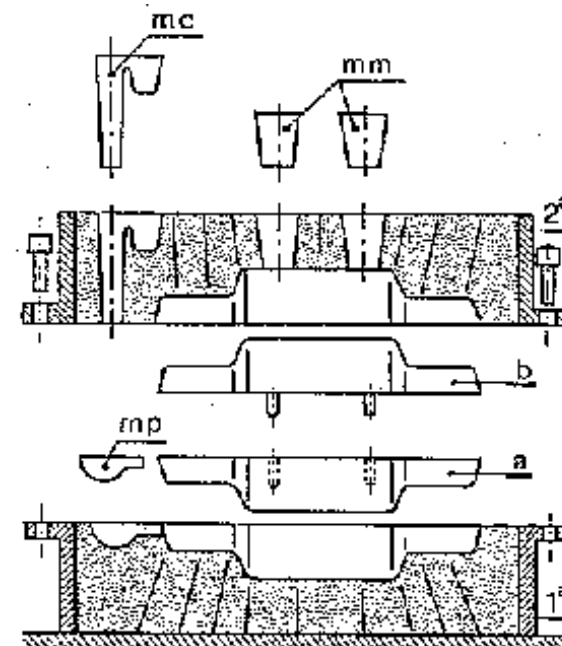
6. Staffa rovesciata, applicazione seconda parte del modello, polvere di carbone (distaccante).



7. Seconda staffa sovrapposta, sistemazione modelli canali di colata e materozze



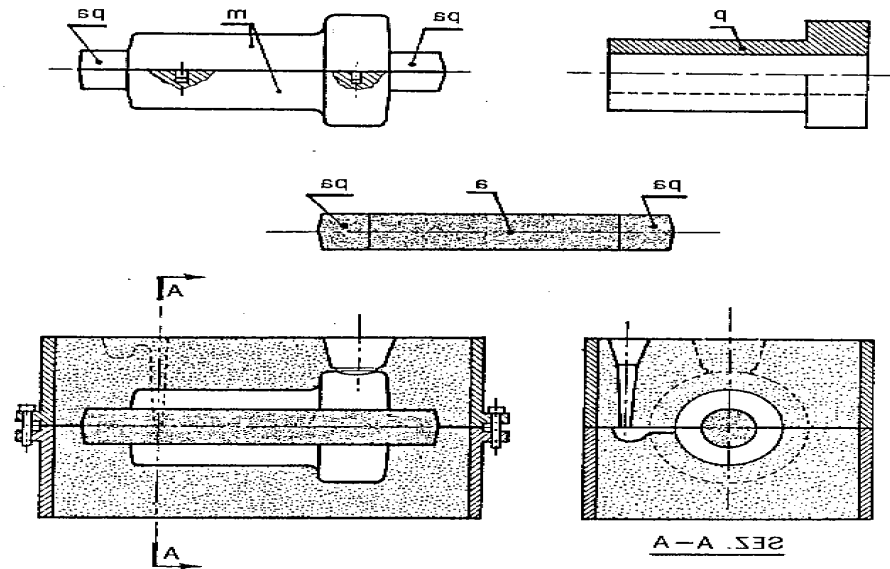
8. Riempimento, compressione, tirate d'aria



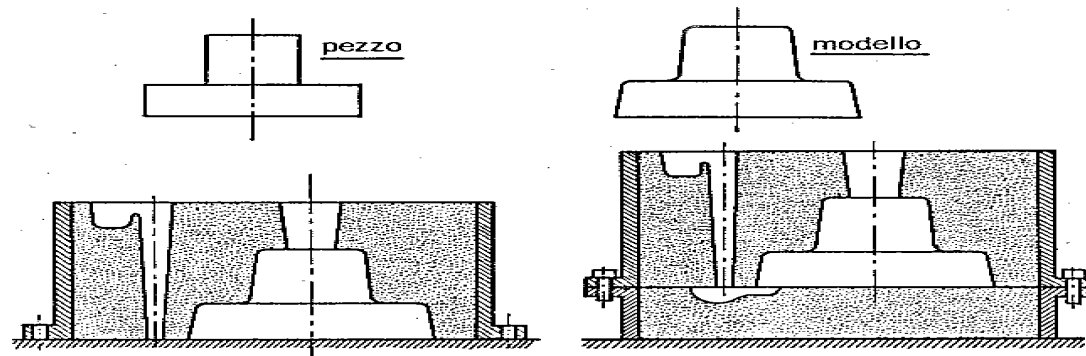
9. Separazione staffe, estrazione modello, ramolaggio anime, ricomposizione

Esempi di forme allestite

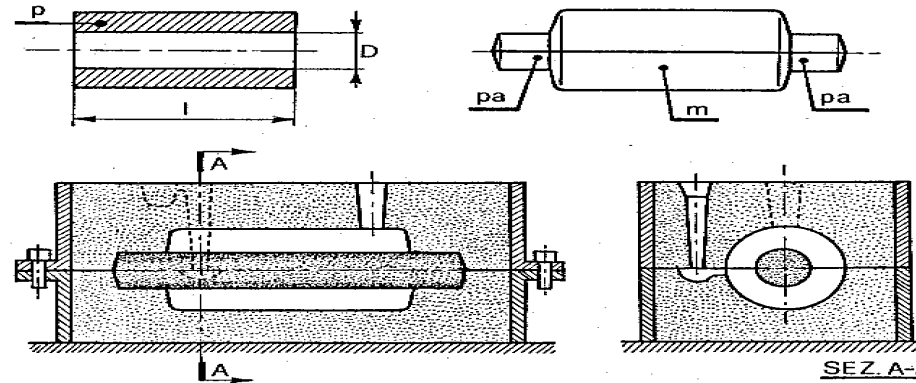
Pezzo forato



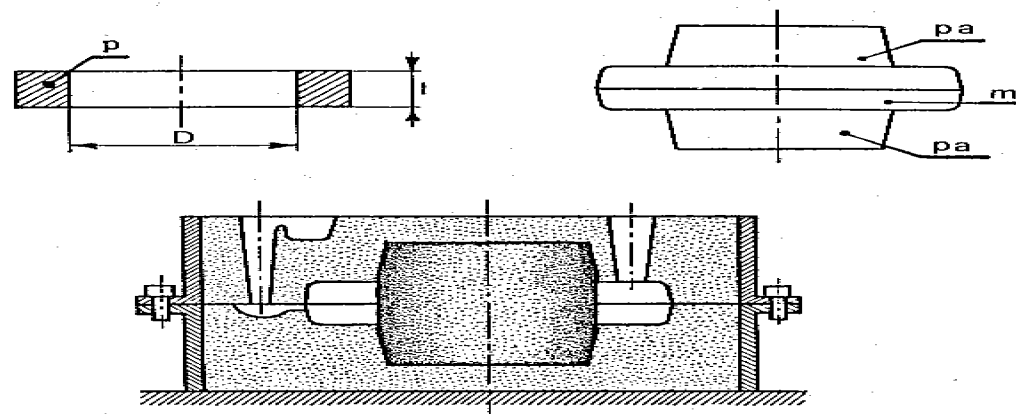
Pezzo con una superficie piana



Disposizione dell'impronta nella forma

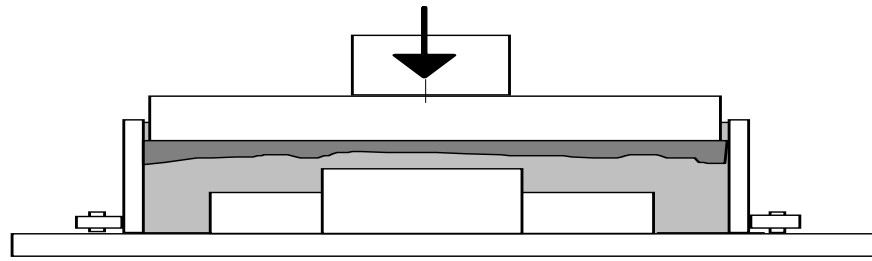


$L/D \gg 1$

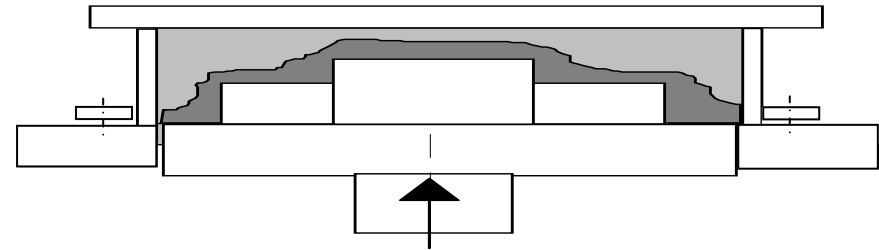


$L/D \ll 1$

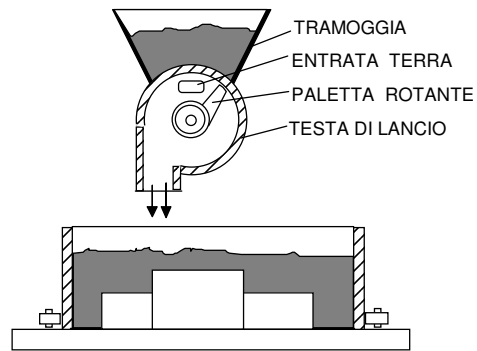
## Macchine per formatura



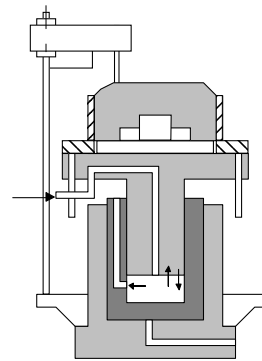
FORMATURA DALL' ALTO



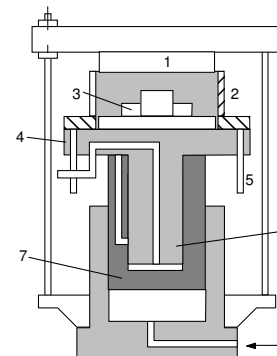
FORMATURA DAL BASSO



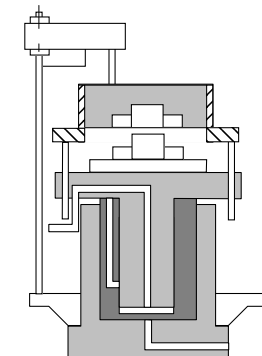
FORMATURA A LANCIO CENTRIFUGO



SCOSSA



COMPRESSIONE



SFORMATURA

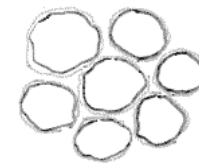
- 1 PIATTO DI COMPRESSIONE
- 2 STAFFA
- 3 PLACCA MODELLO
- 4 TAVOLA
- 5 CANDELE PER LA SFORMATURA
- 6 PISTONE DI SCOSSA
- 7 PISTONE DI COMPRESSIONE

## Materiali per la formatura in terra

Caratteristiche richieste

- 1 plasticita' (scorrevolezza)
- 2 coesione
- 3 refrattarieta'
- 4 permeabilita'
- 5 sgretolabilita'

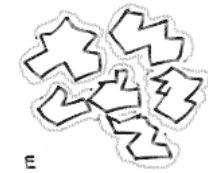
- Sabbia silicea ( $\text{SiO}_2$ )
- argilla (soprattutto bentonite)
- acqua (ha il compito di conferire potere legante all'argilla)



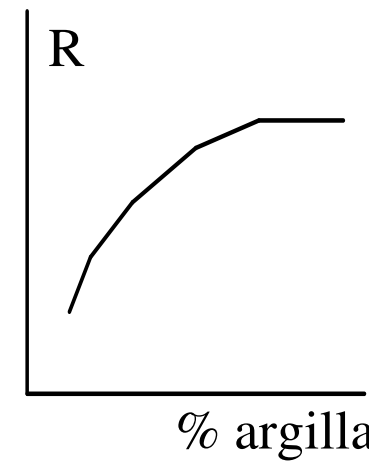
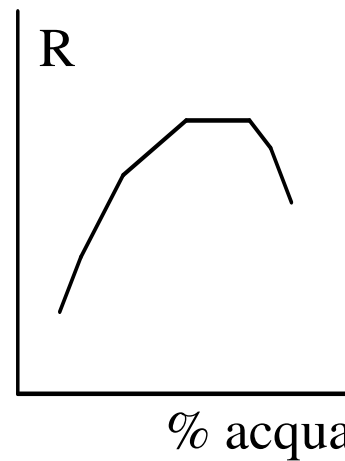
grani tondeggianti  
diametro uniforme



grani grossi e piccoli  
- porosità  
+ resistenza



grani spigolosi  
+ legante  
+ resistenza  
- refrattarietà



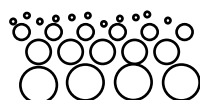
ANALISI GRANULOMETRICA DI SABBIA					
Numero	Maglia (mm)	Fattore	Trattenuto		Prodotto
			(g)	(%)	
6	3.36	3	0	0	0
12	1.68	5	0	0	0
20	0.84	10	0.5	1	10
30	0.59	20	1.8	3.6	72
40	0.42	30	8	16	480
50	0.297	40	17	34	1360
70	0.210	50	11	22	1100
100	0.149	70	3.5	7	490
140	0.105	100	1	2	200
200	0.074	140	0.3	0.6	84
270	0.053	200	0	0	0
fondo	-	300	0.5	1	300
Totale			43.6	87.2	4096
Argilloide			6.4	12.8	
			50.0	100	
<b>Indice di finezza</b>			<b>4096 / 87.2 47</b>		

sabbia                    indice AFS  
molto grossa         < 18  
grossa                    18-35  
media                    35-60  
fina                        50-150  
finissima               > 150

+  
forma del grano  
+  
distribuzione granulometrica



finitura superficiale



## Legante

naturale argilla o bentonite

forti	16%
semigrasse	6-16%
magre	5-8%
silicee	<5%

sintetico inorganico

silicato sodico  
cemento

organico

resine fenoliche  
furaniche  
.....

compattazione

soffiaggio  
pressatura  
vibrazione

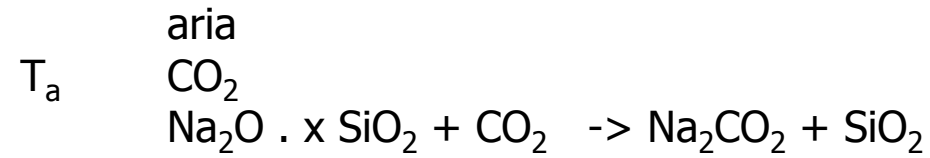
in funzione di

materiale di colata  
peso del getto  
spessore della parete  
numero di pezzi



tabella

indurimento



a caldo  
 forno  
 campi alta frequenza  
 aria calda  
 utensili caldi  
 radiazione infrarossa

tempi  
 breve (s)  
 medio (min)  
 lungo (ore)



## Lavorazione delle terre

terra usata

rottura zolle  
separazione parti metalliche  
setacciatura  
separazione delle polveri

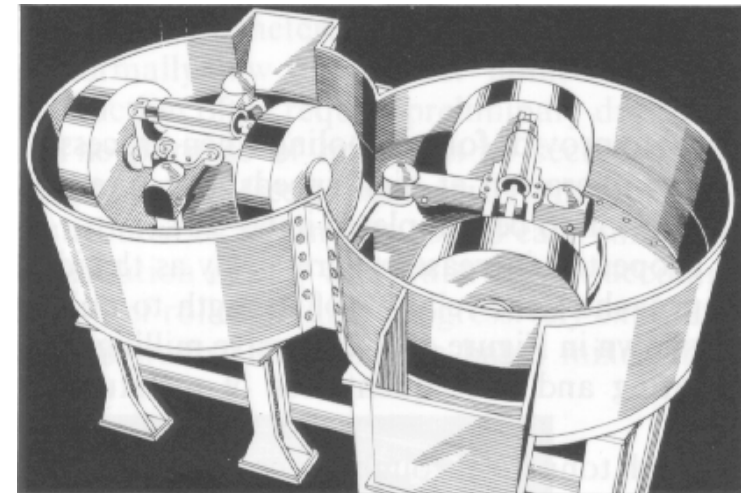
sabbia nuova

essiccazione

acqua  
agglomerante  
nero minerale

dosatura  
molazzatura  
disintegrazione

formatura



Molazza

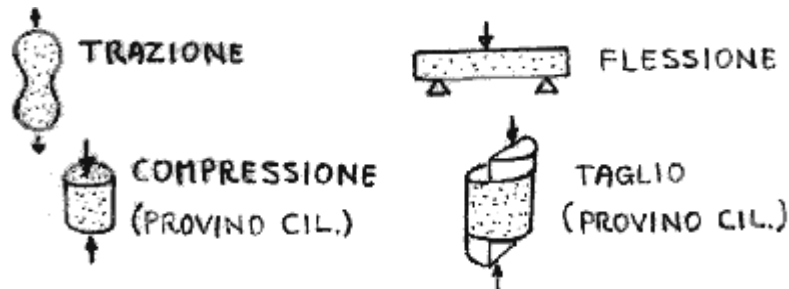
## Prove sulle terre

1. determinazione del tenore di argilla  
 si effettua lavando la sabbia e valutando la differenza in peso  
 (strumento : "levigatore")

2. indice di finezza  
 setaccio in colonna in serie decrescente

3. contenuto di umidità  
 strumento che impiega carburo di calcio  $\text{CaC}_2$  che reagisce con  
 l'acqua provocando un aumento di pressione.

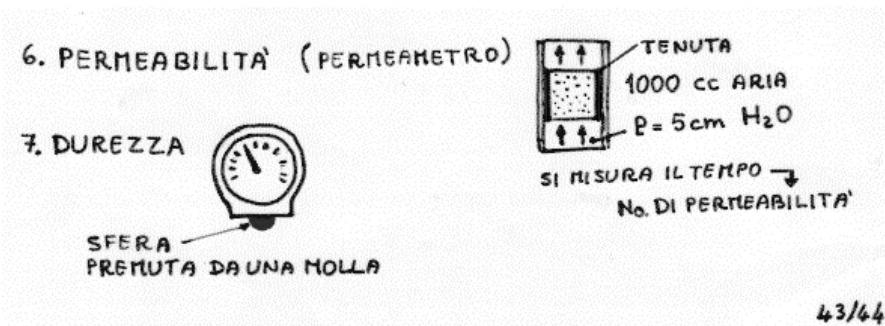
4. Prove meccaniche



IMPORTANTE: COMPATTAZIONE UNIFORME !

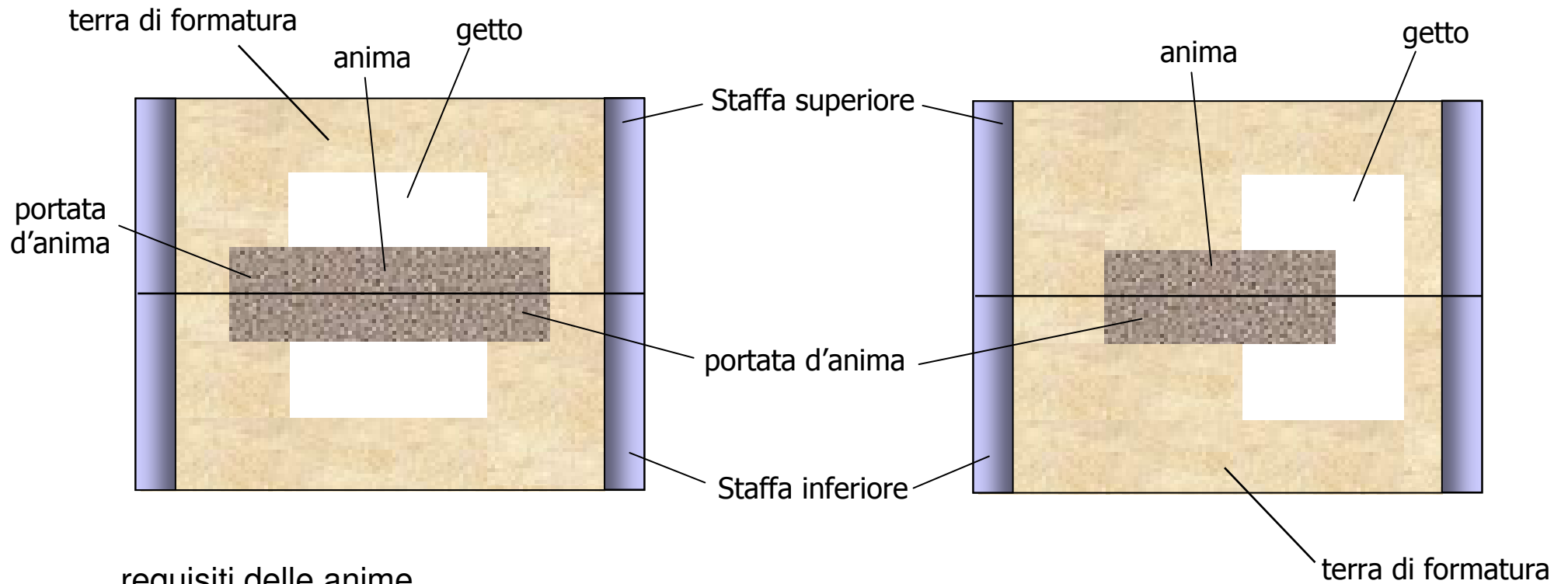
5. COESIONE A VERDE / SECCO

Compressione statica e dinamica mediante "coesimetri"



Anime

Realizzazione di fori ciechi o passanti per mezzo di occupazione di una parte del getto con materiale di formatura

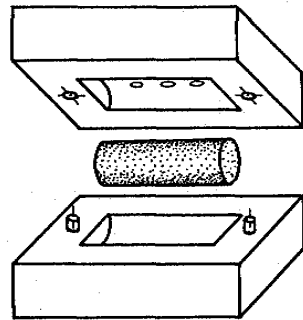


requisiti delle anime

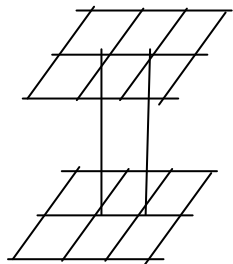
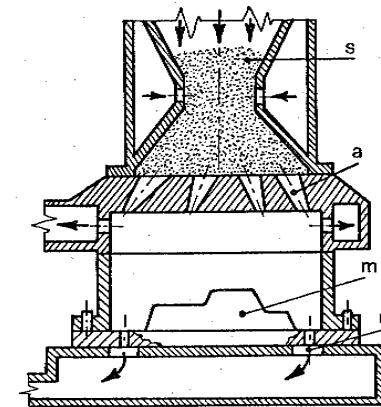
- **maggiore refrattarietà**
- **elevata resistenza meccanica fino al termine della solidificazione**
- **friabilità**

Realizzazione delle anime

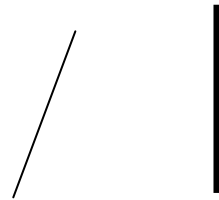
cassa d'anima



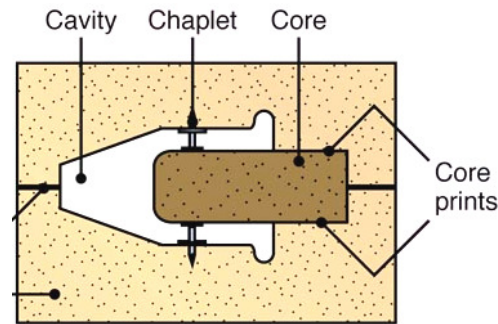
soffiaggio delle anime



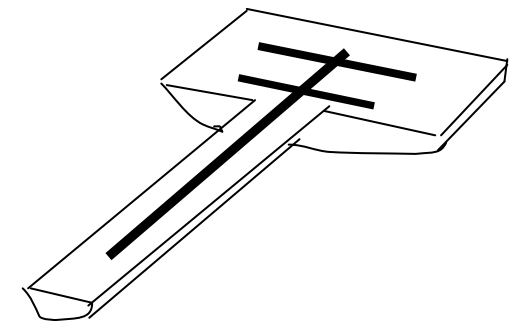
armatura



armature semplici



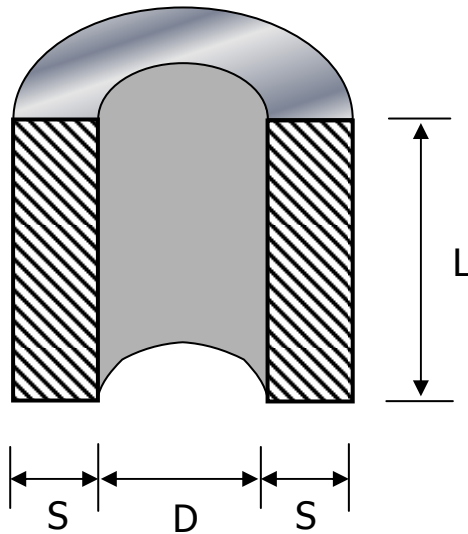
sostegni



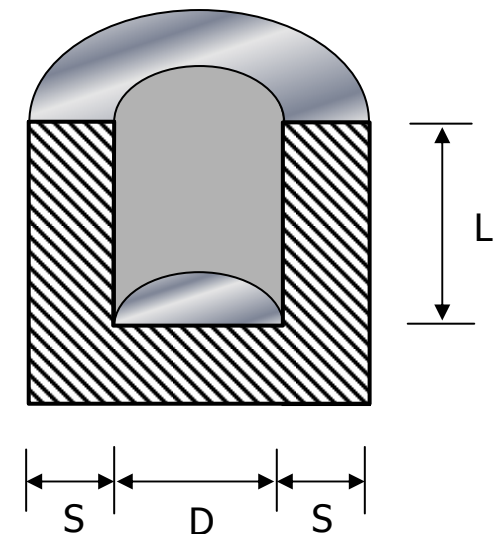
tirate d'aria interne all'anima

## Dimensionamento delle anime

Le anime devono sopportare sollecitazioni termiche e sollecitazioni meccaniche  
Quindi non devono essere troppo snelle e non devono essere circondate da troppo liquido



Inflessione e conseguente  
eccessiva deformazione  
(tolleranze) o rottura



Sovra-cottura e  
conseguente difficoltà di  
rimozione

$D < 2S$	$L \leq D$
$2S \leq D \leq 3S$	$L \leq 3D$
$3S \leq D$	$L \leq 5D$

$D < 2S$	$L \leq D/2$
$2S \leq D \leq 3S$	$L \leq 2D$
$3S \leq D$	$L \leq 3D$

## FUSIONE E COLATA

### Fusione

#### Forni

##### A combustibile

- solido
- liquido
- gassoso

##### Elettrici

- a resistenza
- ad arco
  - indiretto (radiante)
  - diretto
- ad induzione
  - bassa frequenza
  - alta frequenza

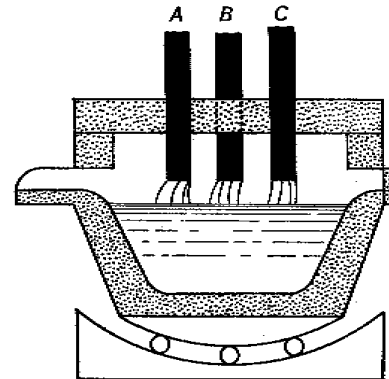


Fig. 161.

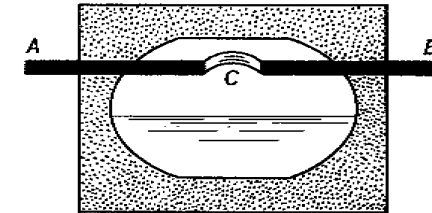


Fig. 162.

Fig. 161. — Schema di forno elettrico ad arco diretto.

Fig. 162. — Schema di forno elettrico ad arco radiante.

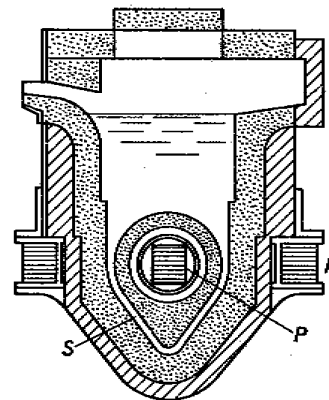


Fig. 163.

Fig. 163. — Schemi di forno ad induzione a bassa frequenza.  
N, nucleo magnetico; P, avvolgimento primario; S, spina secondaria.

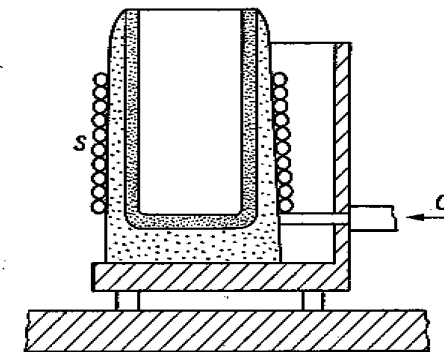
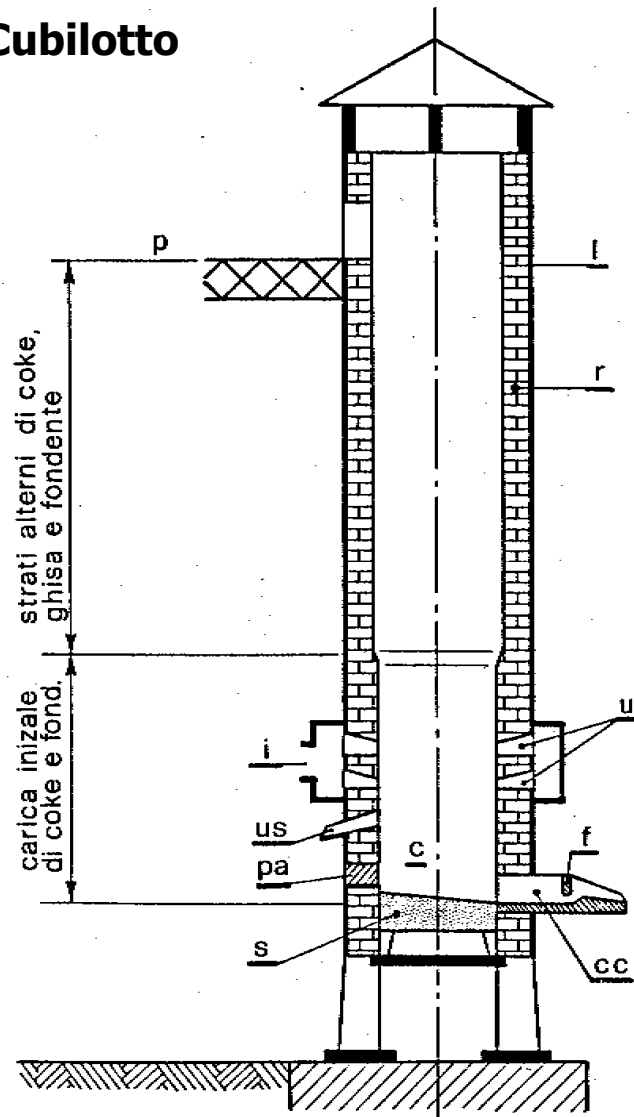


Fig. 164.

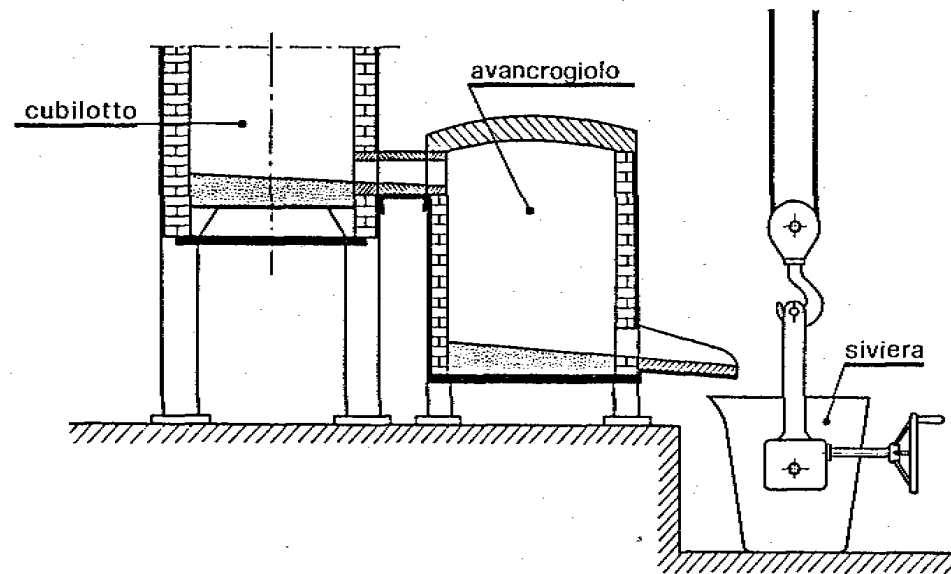
Fig. 164. — Schema di forno ad induzione ad alta frequenza.  
C, acqua di circolazione; S, spirale induttrice.

## Cubilotto



Carica: strati alterni di

- coke
- fondente
- metallo

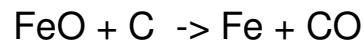
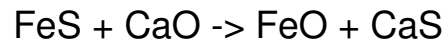


Impiegato per la rifusione di ghise comuni e speciali.

Temperatura:  $T_f$  della ghisa 1150 - 1350 °C + max 200 °C di surriscaldamento.

Rivestimento:

- acido (mattoni siliciosi a base  $\text{SiO}_2$ , 90%) : il più usato, economico, ottima resistenza agli sbalzi termici ;
- basico (dolomite calcinata: ossidi  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ ): favorisce la desolforazione



basicità della scoria:  $(\text{CaO}\% + \text{MgO}\%) / \text{SiO}_2\%$

- neutro (a base di magnesite calcinata ( $\text{MgO}$  85-90% + ... ) e cromite ( $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ ))
- grafite : zona del rivestimento al disotto degli ugelli

Carica del cubilotto (dote):

- carbon coke: pezzatura  $d = 120$  mm, buona resistenza meccanica, quantità: 10% della carica metallica
- ghisa: pani e rottami (pani di I fusione: titolati, pani di II fusione: composizione più incerta)
- fondente: 20-30 % del peso del coke
  - \* calcare ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomite ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ), magnesite ( $\text{MgCO}_3$ )
  - \* fluorite ( $\text{CaF}_2$ ), cenere di soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )



Portata d' aria (all'incirca 1 tonn d' aria per la fusione di 1 tonn di ghisa), dipende anche dalla pezzatura del coke e dalla sua porosità.

Rendimento: occorre limitare la temperatura dei gas in uscita (150 - 300 °C)  $\eta = 45-50\%$

#### Temperatura

Aumenta col preriscaldamento dell'aria (alimentazione a "vento caldo").

Presenta un massimo con la portata d' aria: una portata eccessiva determina ossidazione, > perdite di Mn e Si ed una riduzione della temperatura; una portata bassa determina una bassa velocità di fusione, aumento di carbonio ed erosione del refrattario.

Inoculazione (per l'affinamento della struttura della ghisa): impiego di ferro-leghe es. Fe-Si 85 % + Al.

## Colata

### gravità

sfrutta la pressione dovuta al peso del metallo liquido

grande versatilità

tolleranze generalmente scadenti

forme transitorie

### centrifuga

forma messa in rotazione, si genera forza centrifuga sul metallo

pezzi relativamente semplici

buone finiture / tolleranze

conchiglie metalliche permanenti

### sotto pressione

pompe alternative

pezzi complicati

ottime finiture

conchiglie metalliche permanenti, costose  
costi di impianto  
automazione

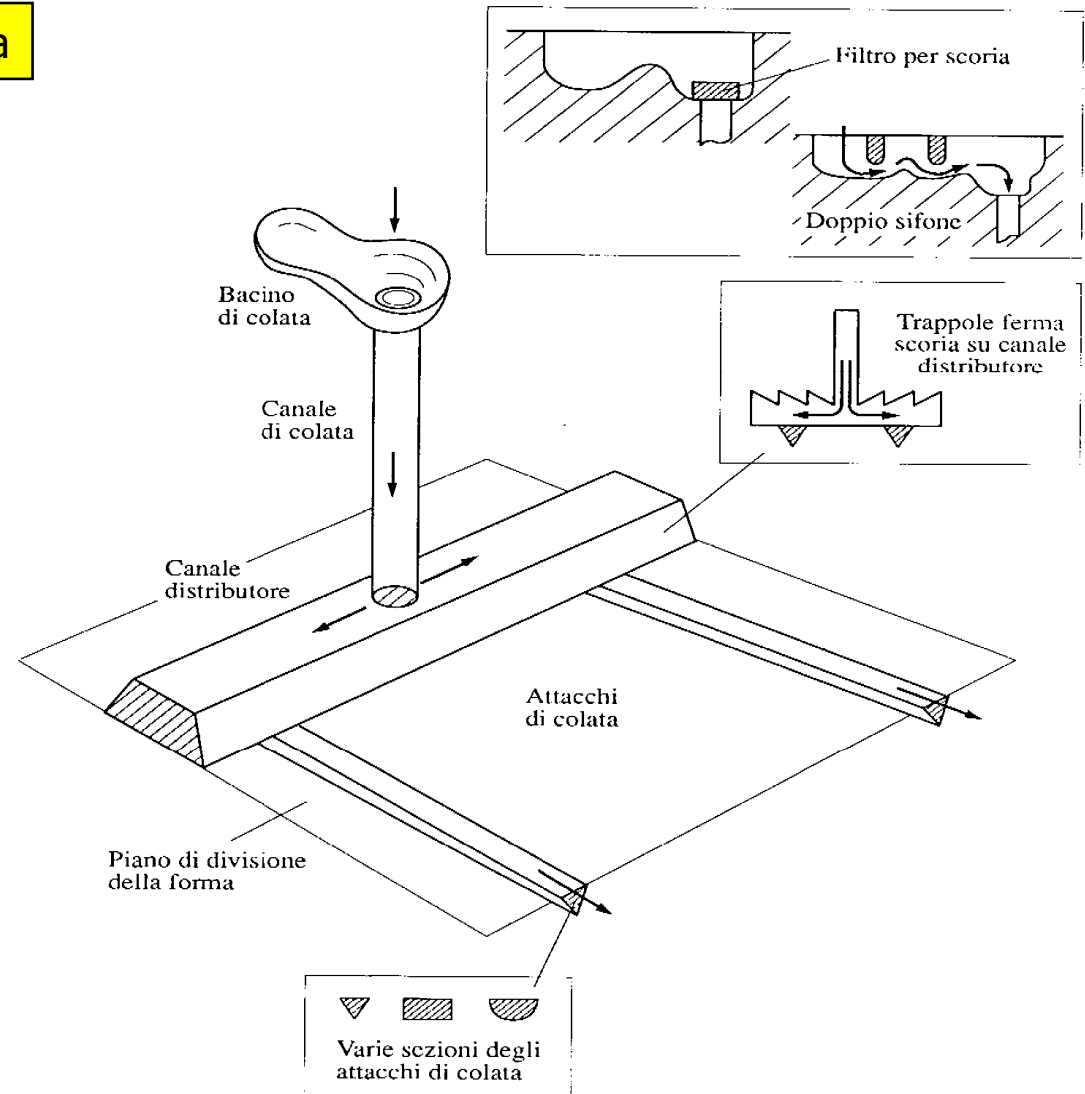
Sistema di colata per fonderia in terra

Sistema principale - bacino di colata

- canale di colata
- canale orizzontale
- attacco di colata

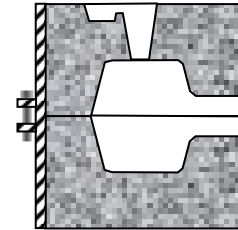
Altri elementi

- filtri
- pozzetti
- sfiati
- trappole



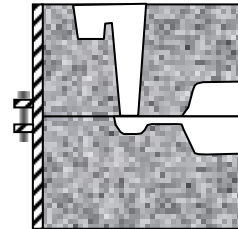
Sistemi di colata

diretta



Danni alla forma  
Gocce fredde

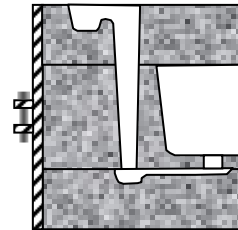
sul piano di  
separazione



Facile realizzazione

dimensionamento

con tre staffe



Forma in tre parti  
Colata in sorgente

il dimensionamento del sistema si realizza

a partire da

quantità di materiale da colare

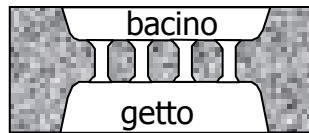
tempo ammissibile (produttività, resistenza termica della forma)

velocità del fluido (danneggiamenti per erosione)

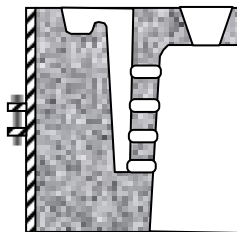
per ottenere

le sezioni dei canali di colata

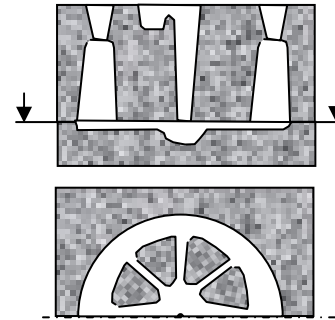
Altri sistemi di colata



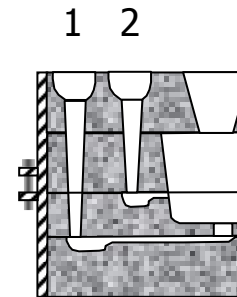
Colata a pioggia  
Getti larghi e bassi



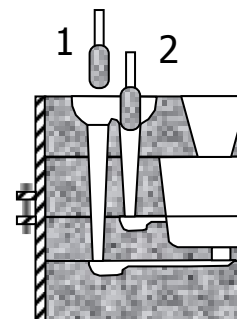
Colata a pettine laterale  
Per riempire la materozza con liquido a temperatura più alta



Colata a stella



Colata in due fasi



## Dimensionamento sistema di colata

Circuito idraulico in cui circola un fluido perfetto in condizioni stazionarie

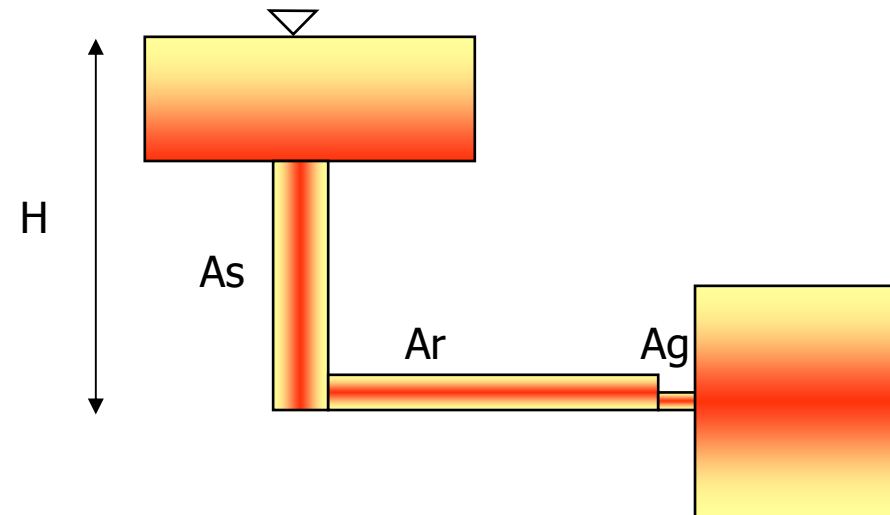
$A_{str}$  = sezione di strozzatura =  
conversione energia potenziale  
in energia cinetica

$$v_{str} = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{k}} \quad k \in [1 \div 4]$$

$$Q = A_{str} \cdot v_{str}$$

la portata non è un parametro libero  
ma va scelta in funzione di

- volume del getto
- tempo di riempimento



Tempo di riempimento  $t_r$   $V_g$   
 $V_g + \text{accessori}$   
 forma del getto (??)

Tempo di irraggiamento  $t_i$

se è piccolo --> portate eccessive e resa bassa  
 se è grande --> difetti - prematura solidificazione  
 - collasso della forma per irraggiamento ( $t_i$ )

maggiore di  $t_r$

	formatura a verde		sintetica
	fine (AFS > 100)	grossa (AFS < 100)	
$t_i$	3 - 5	5 - 12	20 - 60

formule empiriche  $t_r = \frac{1}{0.045 + \frac{1.64}{V_g}}$

(attenzione alle unità di misura)

$$t_r = 6.4 \cdot s \cdot \sqrt{P_g}$$

$$t_r = \sqrt{V_g}$$

( formula di Dietert per acciai)

Nota la portata posso calcolare la sezione  $A_{str}$

$$A_{str} = \frac{V_g}{t_r \cdot V_{str}}$$

Verificare che:  $\begin{cases} v_{str} \approx 1m/s \\ t_r \leq t_i \end{cases}$

Posizionamento $A_{str}$	→	sistemi pressurizzati	$A_{str} = A_g$	riduzione boccame velocità elevate portate uniformi
	↘	sistemi non pressurizzati	$A_{str} = A_s$	velocità basse portate disuniformi consigliati se c'è presenza di ossidi



Sistemi pressurizzati

$A_s$	:	$A_r$	:	$A_g \equiv A_{str}$
4	:	8	:	3
1	:	2	:	1
2	:	2	:	1

Sistemi non pressurizzati

$A_s \equiv A_{str}$	:	$A_r$	:	$A_g$
4	:	$\sqrt{H}$	:	$\sqrt{H}$
1	:	$\sqrt{\frac{H}{2}}$	:	$\sqrt{\frac{H}{2}}$

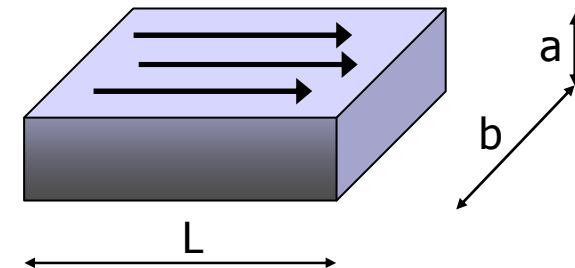
[H] dm

Attacchi di colata (sezione rettangolare)

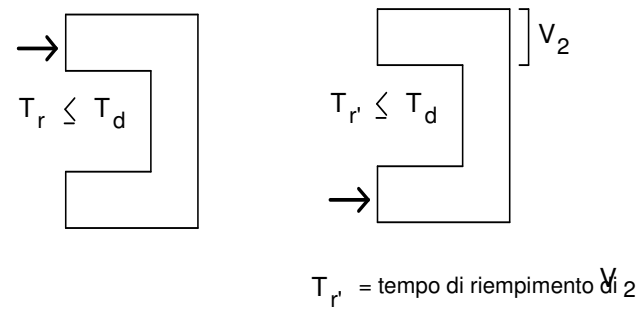
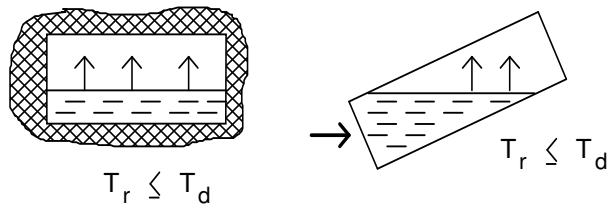
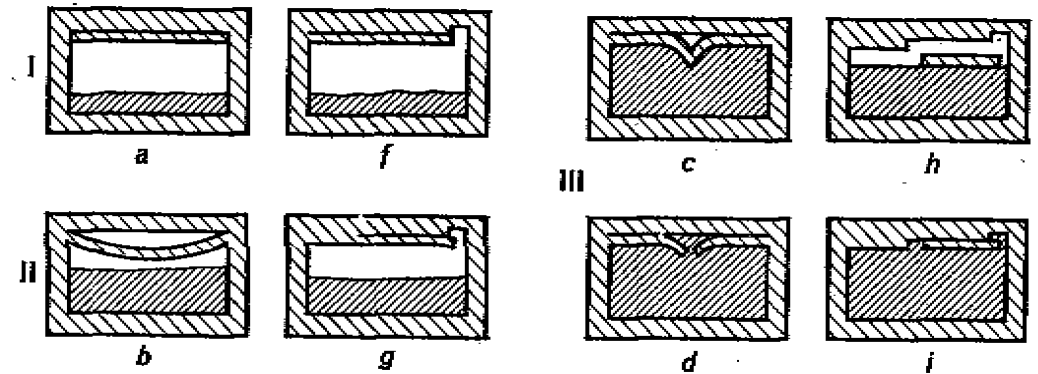
$$b \geq 4 a$$

$$L \approx b$$

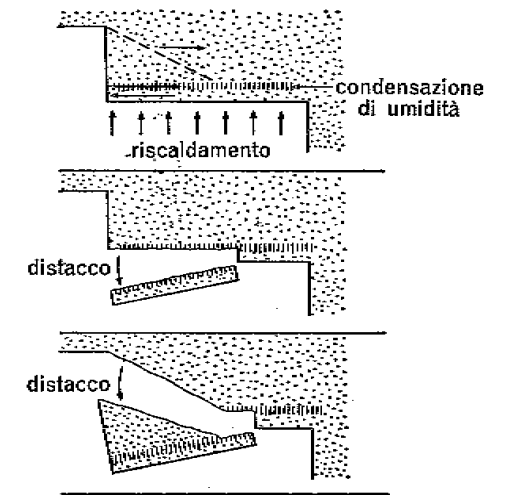
altre sezioni .....



Meccanismi di danneggiamento della forma per irraggiamento



Riempimento di getti di forma particolare



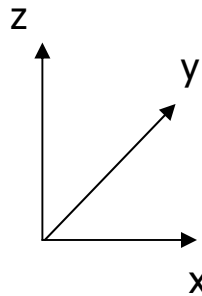
Spinte metallostatiche

Per un liquido si ha:

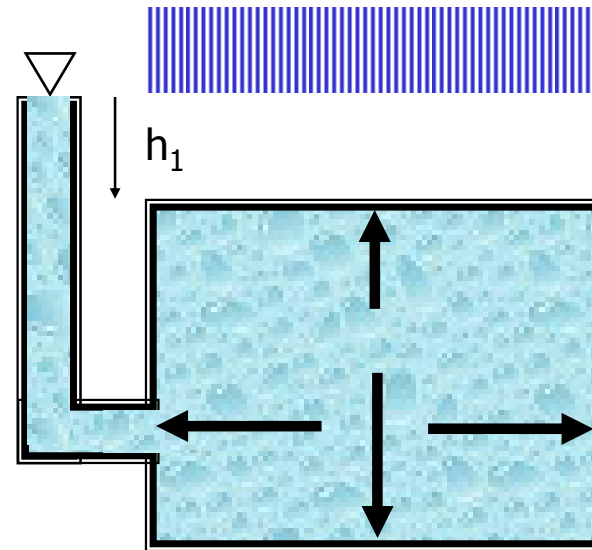
Peso specifico

$$p = \rho \cdot g \cdot h = \gamma \cdot h$$

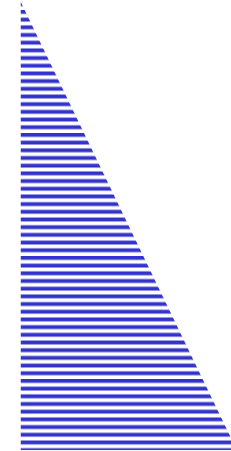
battente



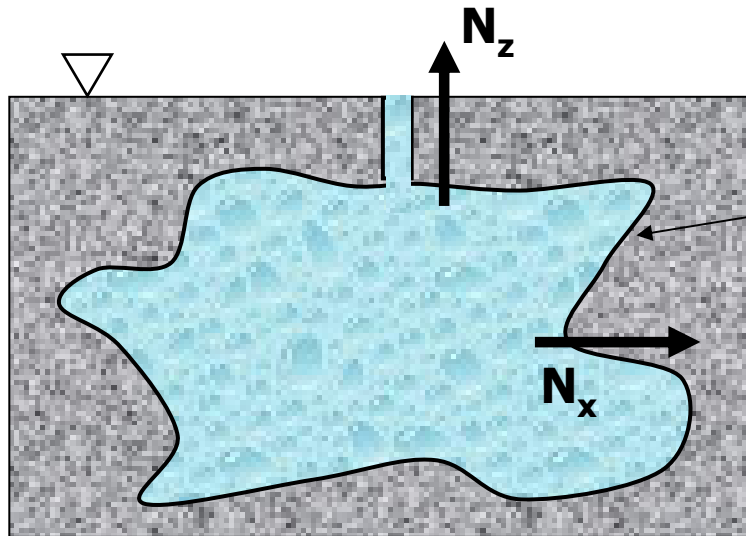
H



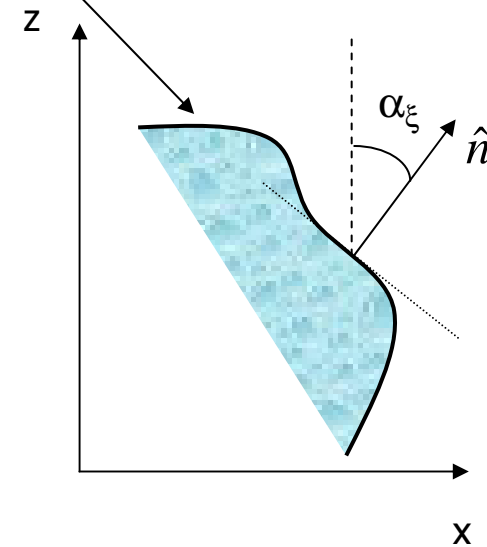
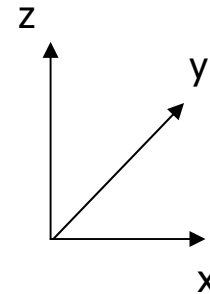
$$p_z = \gamma \cdot h_1$$



$$p_x = \gamma \cdot H$$



$\xi \rightarrow z = f(x, y)$  superficie di contenimento del liquido

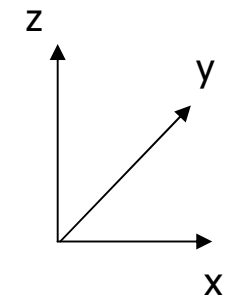
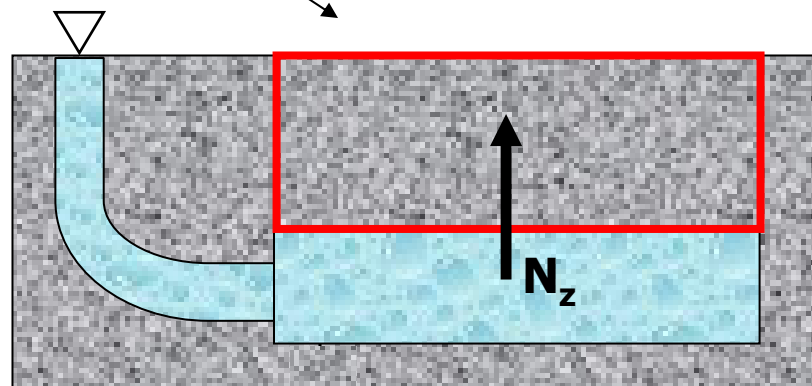
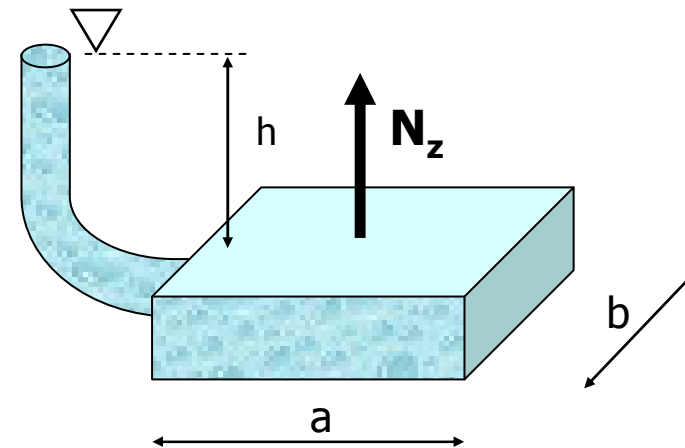



Angolo rispetto alla normale alla superficie

$$\mathbf{r} N = \int_{\xi} \gamma \cdot z_{\xi} \cdot \hat{n} \cdot ds \rightarrow \begin{cases} N_z = \int_{\xi} \gamma \cdot z_{\xi} \cdot \cos \alpha_{\xi} \cdot ds \\ N_x = \int_{\xi} \gamma \cdot z_{\xi} \cdot \sin \alpha_{\xi} \cdot ds \end{cases}$$

## Esempio 1: parete orizzontale affondata

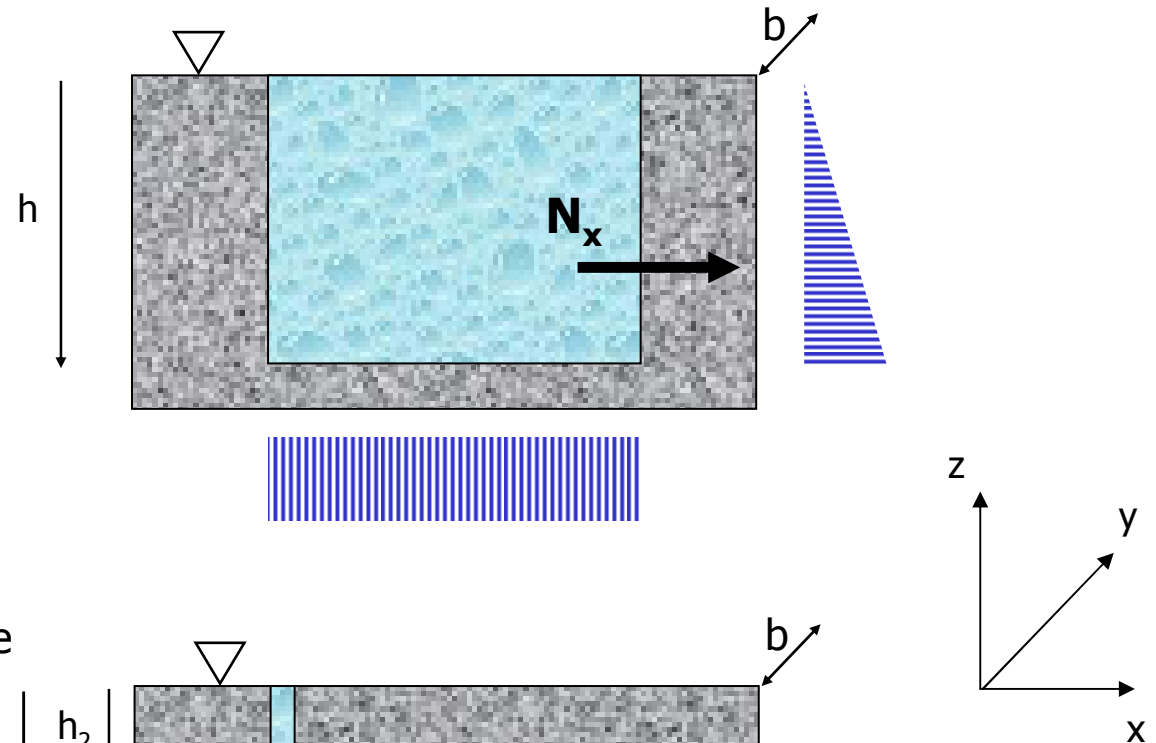
$$\begin{aligned} \dot{N} &= \hat{z} \cdot N_z = \hat{z} \cdot \int_{\xi} \gamma \cdot z_{\xi} \cdot \cos \alpha_{\xi} \cdot ds = \\ &= \hat{z} \cdot \int_0^a \int_0^b \gamma \cdot h \cdot dx dy = \hat{z} \cdot \gamma \cdot h \cdot a \cdot b \end{aligned}$$



 La spinta corrisponde al volume di terra sopra al getto per la densità del metallo

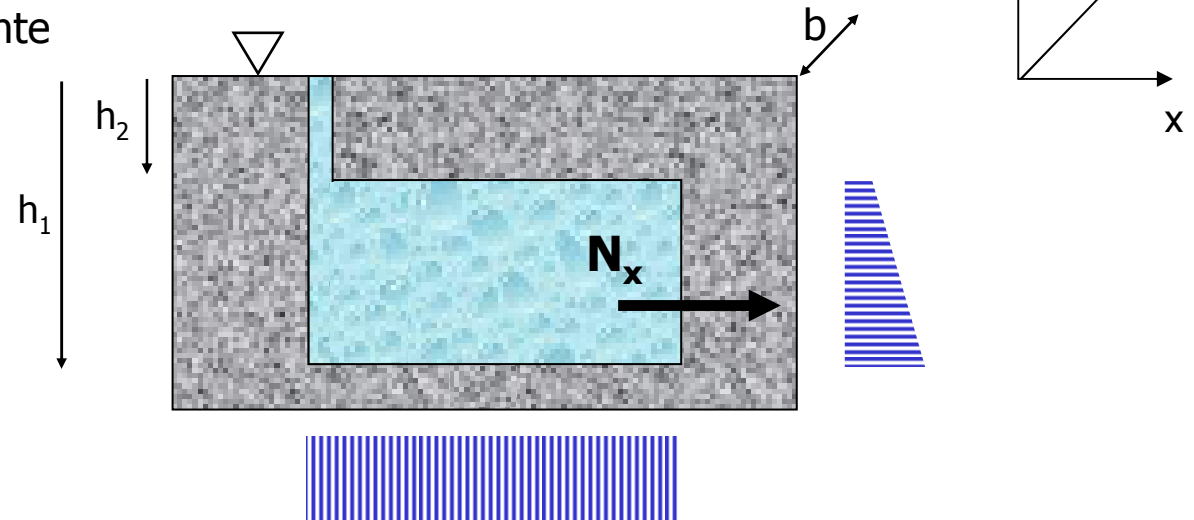
Esempio 2: parete verticale affiorante

$$\begin{aligned} \dot{N} &= \hat{x} \cdot N_x = \hat{x} \cdot \int_{\xi} \gamma \cdot z_{\xi} \cdot \sin \alpha_{\xi} \cdot ds = \\ &= \hat{x} \cdot \int_0^h \int_0^b \gamma \cdot z \cdot dydz = \hat{x} \cdot \gamma \cdot \frac{h^2}{2} \cdot b \end{aligned}$$



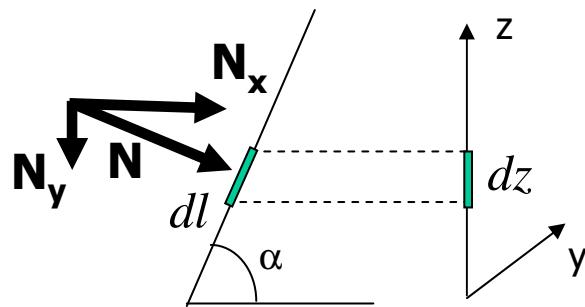
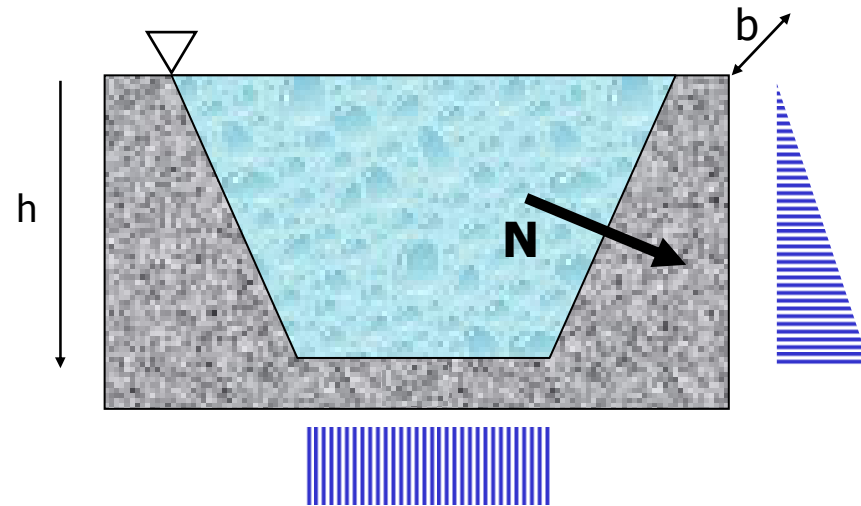
Esempio 3: parete verticale non affiorante

$$\begin{aligned} \dot{N} &= \hat{x} \cdot N_x = \hat{x} \cdot \int_{\xi} \gamma \cdot z_{\xi} \cdot \sin \alpha_{\xi} \cdot ds = \\ &= \hat{x} \cdot \int_{h_1}^{h_2} \int_0^b \gamma \cdot z \cdot dydz = \hat{x} \cdot \gamma \cdot \frac{h_1^2 - h_2^2}{2} \cdot b \end{aligned}$$



## Esempio 4: parete inclinata affiorante

$$\mathbf{r} \mathbf{N} = \int_{\xi} \gamma \cdot z_{\xi} \cdot \hat{n} \cdot ds = \int_0^l \int_0^b \gamma \cdot \hat{n} \cdot z(l) \cdot dy dl$$



$$dl = \frac{dz}{\sin \alpha}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r} \mathbf{N} &= \int_0^l \int_0^b \gamma \cdot \hat{n} \cdot z(l) \cdot dy dl = \\ &= \hat{n} \cdot \int_0^h \int_0^b \gamma \cdot z \cdot dy \frac{dz}{\sin \alpha} = \hat{n} \cdot \frac{\gamma \cdot h^2 \cdot b}{2 \cdot \sin \alpha} \end{aligned}$$

$$\mathbf{r} \mathbf{N} = \begin{cases} N_y = \hat{n} \times \hat{y} \cdot \frac{\gamma \cdot h^2 \cdot b}{2 \cdot \sin \alpha} = \cos \alpha \cdot \frac{\gamma \cdot h^2 \cdot b}{2 \cdot \sin \alpha} = \frac{\gamma \cdot h^2 \cdot b}{2 \cdot \tan \alpha} \\ N_x = \hat{n} \times \hat{x} \cdot \frac{\gamma \cdot h^2 \cdot b}{2 \cdot \sin \alpha} = \sin \alpha \cdot \frac{\gamma \cdot h^2 \cdot b}{2 \cdot \sin \alpha} = \frac{\gamma \cdot h^2 \cdot b}{2} \end{cases}$$

## Esempio 5: parete cilindrica affiorante

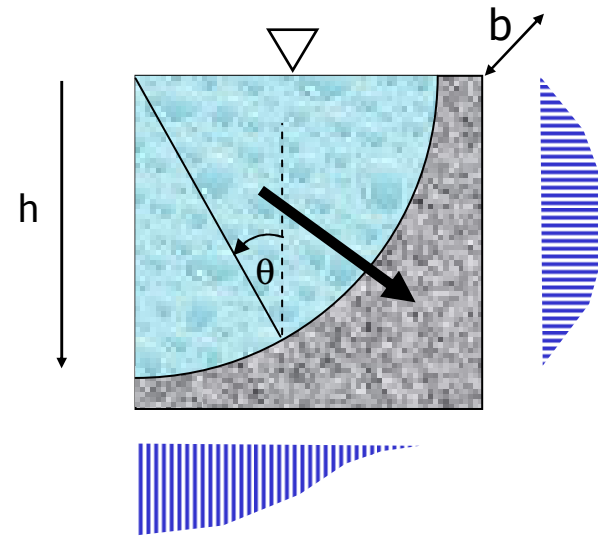
$$\begin{aligned} \vec{N} &= \int_{\xi} \gamma \cdot z_{\xi} \cdot \hat{n} \cdot ds = \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \int_0^b \gamma \cdot \hat{n} \cdot z \cdot dyrd\theta = \\ &= \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \int_0^b \gamma \cdot \hat{n} \cdot (-r \cos \theta) \cdot dyrd\theta \end{aligned}$$

$$N_x = \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \int_0^b \gamma \cdot \sin \theta \cdot (-r \cos \theta) \cdot dyrd\theta =$$

$$= \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \int_0^b \gamma \cdot \frac{\sin(2\theta)}{2} \cdot dyr \frac{d2\theta}{2} = b \cdot \gamma \cdot r^2 \cdot \frac{(\cos 2\theta)}{4} \Big|_{\frac{\pi}{2}}^0 = \frac{b \cdot \gamma \cdot r^2}{2}$$

$$N_y = \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \int_0^b \gamma \cdot \cos \theta \cdot (r \cos \theta) \cdot dyrd\theta = \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \int_0^b \gamma \cdot \frac{\cos(2\theta) + 1}{2} \cdot dyr \frac{d2\theta}{2} =$$

$$= b \cdot \gamma \cdot r^2 \cdot \frac{\sin 2\theta + 2\theta}{4} \Big|_{\frac{\pi}{2}}^0 = b \cdot \gamma \cdot r^2 \cdot \frac{\pi}{4}$$



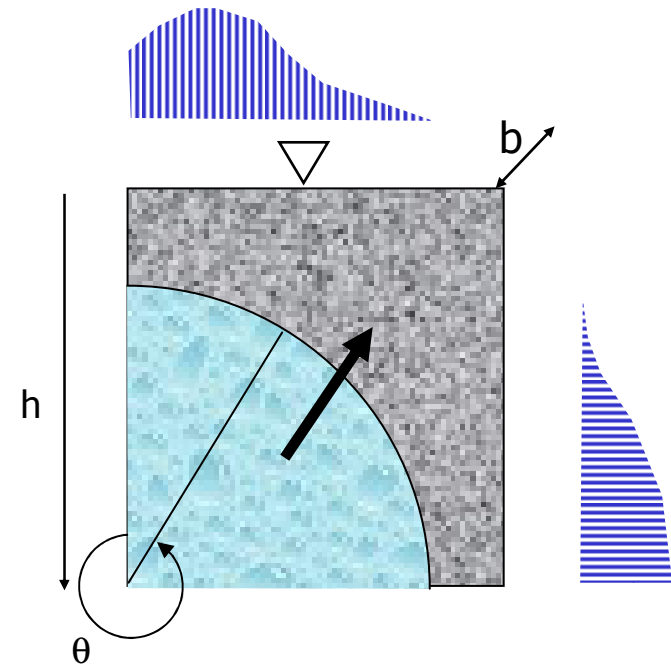


Esempio 6: parete cilindrica non affiorante

$$\begin{aligned} \mathbf{r} \\ N &= \int_{\xi} \gamma \cdot z_{\xi} \cdot \hat{n} \cdot ds = \int_{-\frac{\pi}{2}}^0 \int_0^b \gamma \cdot \hat{n} \cdot z \cdot dy r d\theta = \\ &= \int_{-\frac{\pi}{2}}^0 \int_0^b \gamma \cdot \hat{n} \cdot (h - r \cos \theta) \cdot dy r d\theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_x &= \int_{-\frac{\pi}{2}}^0 \int_0^b \gamma \cdot \sin \theta \cdot (h - r \cos \theta) \cdot dy r d\theta = \\ &= \frac{1}{2} b \cdot r^2 (r - 2h) \cdot \gamma \end{aligned}$$

$$N_y = \int_{-\frac{\pi}{2}}^0 \int_0^b \gamma \cdot \cos \theta \cdot (h - r \cos \theta) \cdot dy r d\theta = b \cdot r \cdot \left( h - \frac{\pi r}{4} \right) \gamma$$



## Esempio 7: Caso reale di getto cilindrico

$$\begin{aligned} \vec{N} &= \int_{\xi} \gamma \cdot z_{\xi} \cdot \hat{n} \cdot ds = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^b \gamma \cdot \hat{n} \cdot z \cdot dyrd\theta = \\ &= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^b \gamma \cdot \hat{n} \cdot (h - r \cos \theta) \cdot dyrd\theta \end{aligned}$$

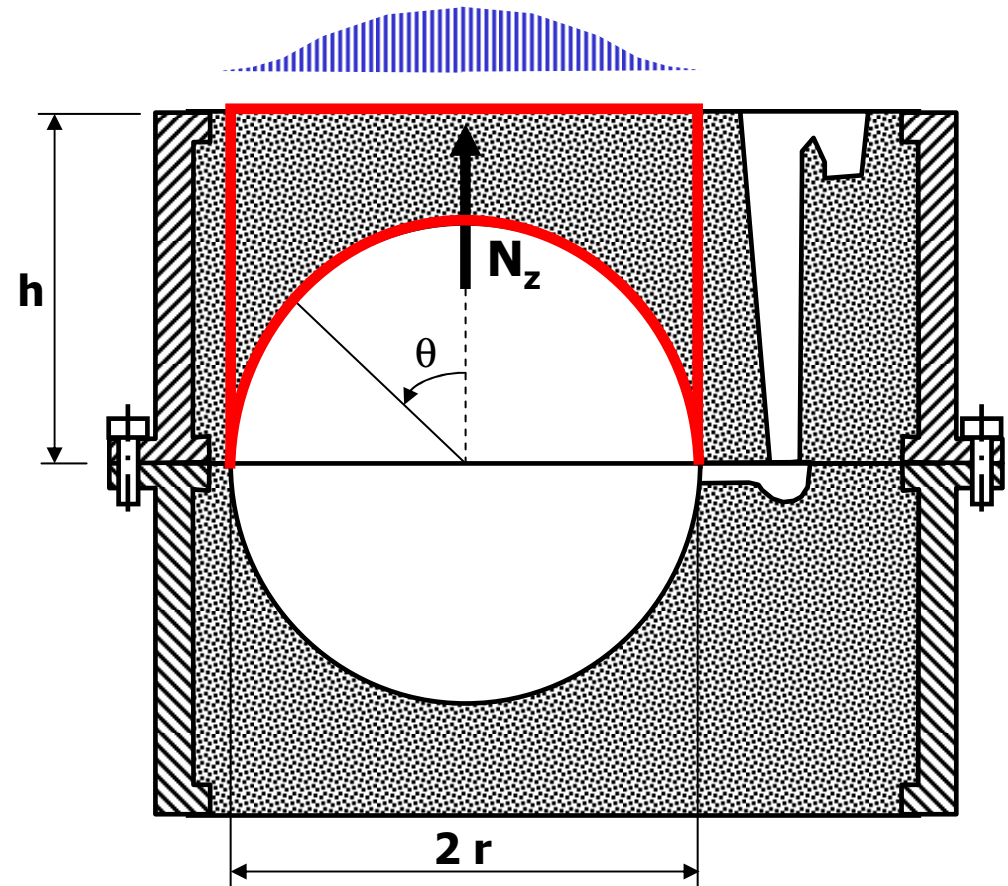
$$N_x = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^b \gamma \cdot \sin \theta \cdot (h - r \cos \theta) \cdot dyrd\theta = 0$$

$$\begin{aligned} N_y &= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^b \gamma \cdot \cos \theta \cdot (h - r \cos \theta) \cdot dyrd\theta = \\ &= b \cdot r \cdot \left( 2h - \frac{\pi r}{2} \right) \gamma \end{aligned}$$

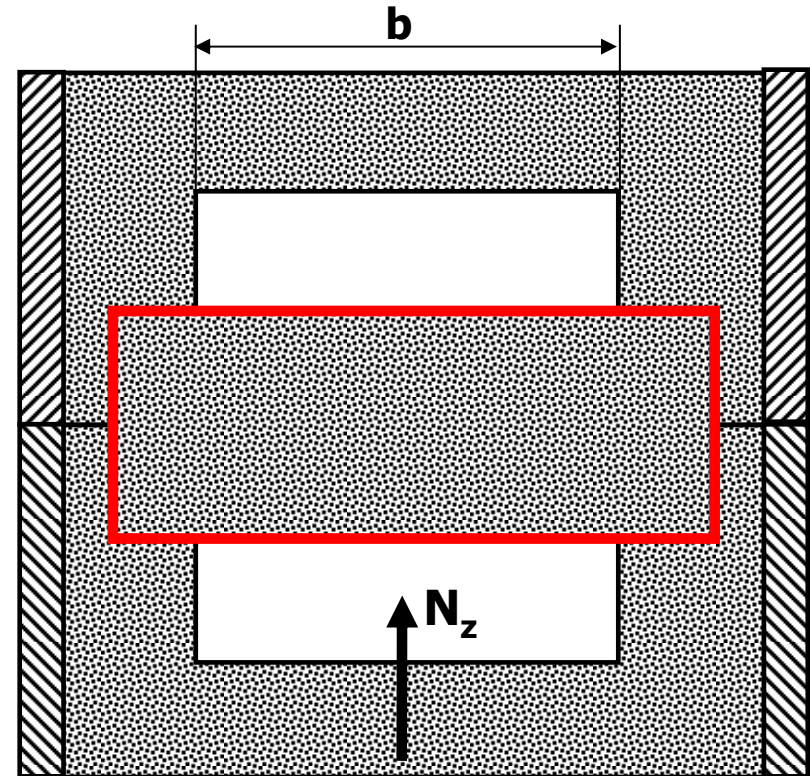
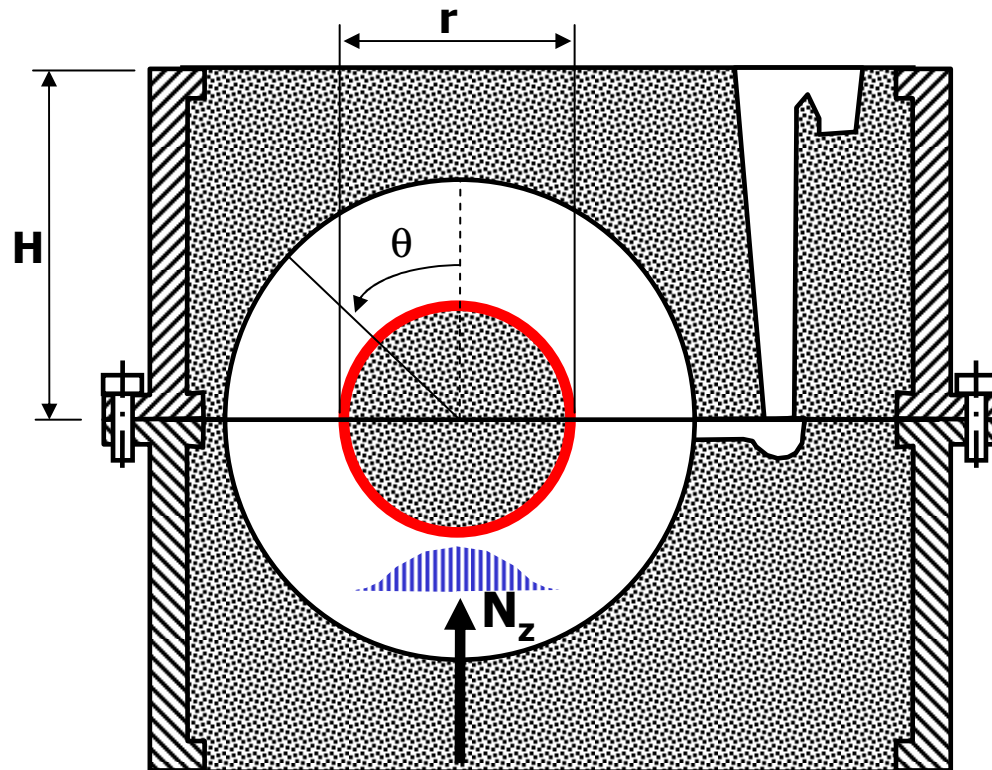


La spinta corrisponde al volume di terra sopra al getto per la densità del metallo

$$N_y = \gamma \left( b \cdot 2r \cdot h - \frac{\pi r^2}{2} \cdot b \right) = b \cdot r \cdot \left( 2h - \frac{\pi r}{2} \right) \gamma$$



Spinte metallostatiche sulle anime



$$N_x = \int_0^{2\pi} \int_0^b \gamma \cdot \sin \theta \cdot (h - r \cos \theta) \cdot dy r d\theta = 0$$

$$N_y = \int_0^{2\pi} \int_0^b \gamma \cdot \cos \theta \cdot (h - r \cos \theta) \cdot dy r d\theta = b \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \gamma$$

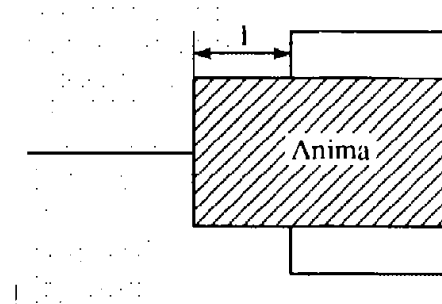
Volume di liquido spostato  
dal corpo immerso  $\equiv$  spinta  
di Archimede

Le anime sono circondate dal metallo liquido ovunque tranne le loro portate.  
La spinta di Archimede vale:

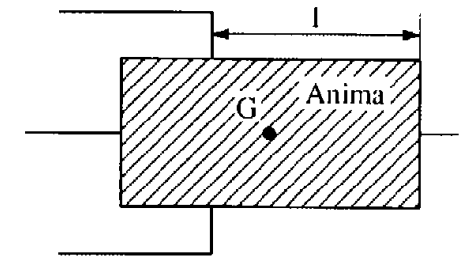
$$F = \gamma_{\text{metallo}} ( V_{\text{anima}} - V_{\text{portate}} )$$

Nel calcolo della resistenza allo scoperchiamento della staffa, a questo valore bisogna sottrarre il peso dell'anima stessa

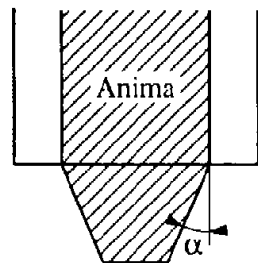
$$P_{\text{anima}} = \gamma_{\text{anima}} V_{\text{anima}}$$



Portata d'anima cilindrica per anima orizzontale su due appoggi



Anima a sbalzo



Portata d'anima per anima verticale

NB: le anime verticali non hanno liquido sulla loro superficie inferiore e quindi non sono soggette a spinte a meno che non abbiano sotto-squadri.

## Formatura in guscio

Shell Molding o processo Crowing

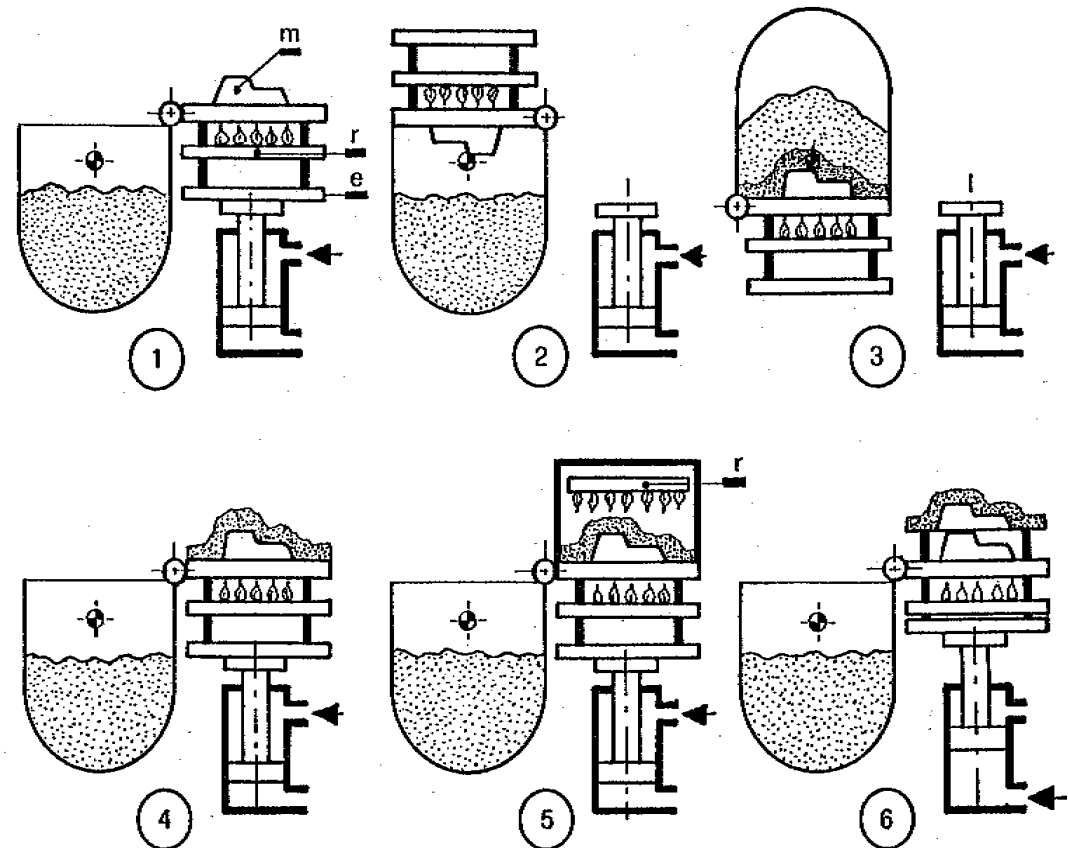
- sabbia di quarzo a grani tondi prerivestita
- resina termoindurente (es fenolica)

### Vantaggi

- buone tolleranze
- buona finitura
- spessori sottili ( min 2.5 - 1.5 mm)  
(Il guscio presenta > isolamento termico rispetto alla forma in terra)
- impiegato anche per la fabbricazione delle anime
- applicazioni in medie e grandi serie

### Limitazioni

- getti di limitate dimensioni ( < 20 kg )

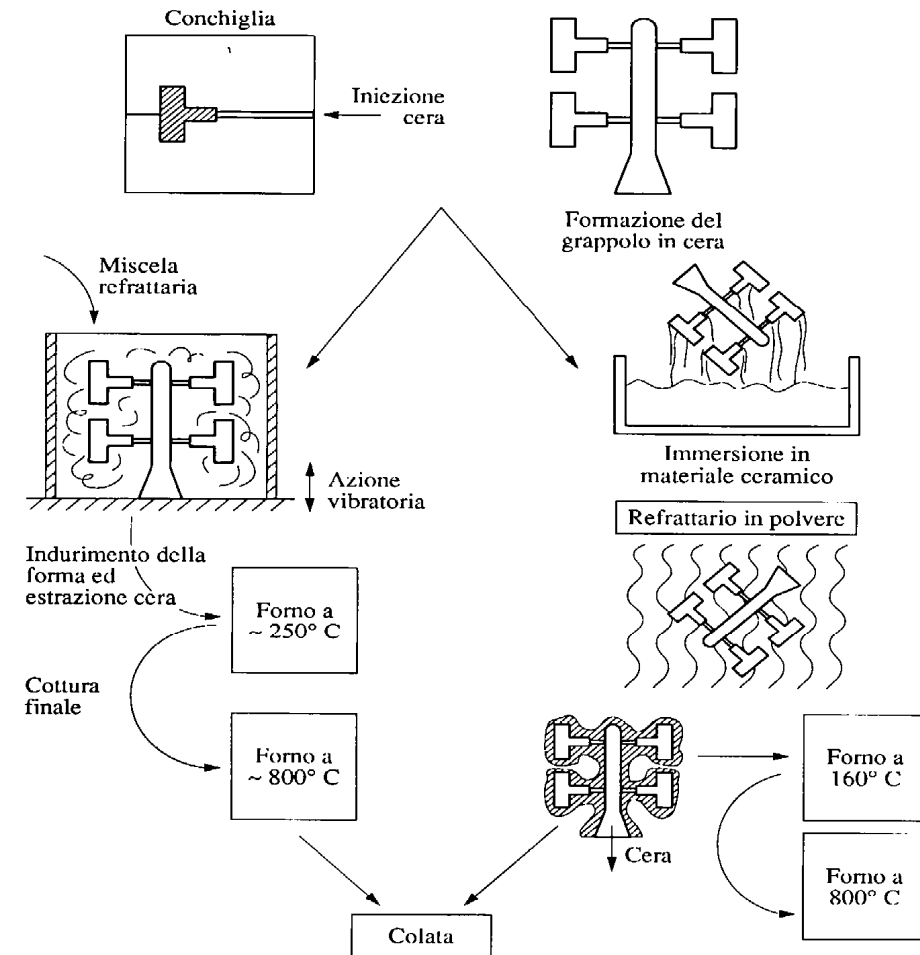


## Formatura in cera persa o microfusione

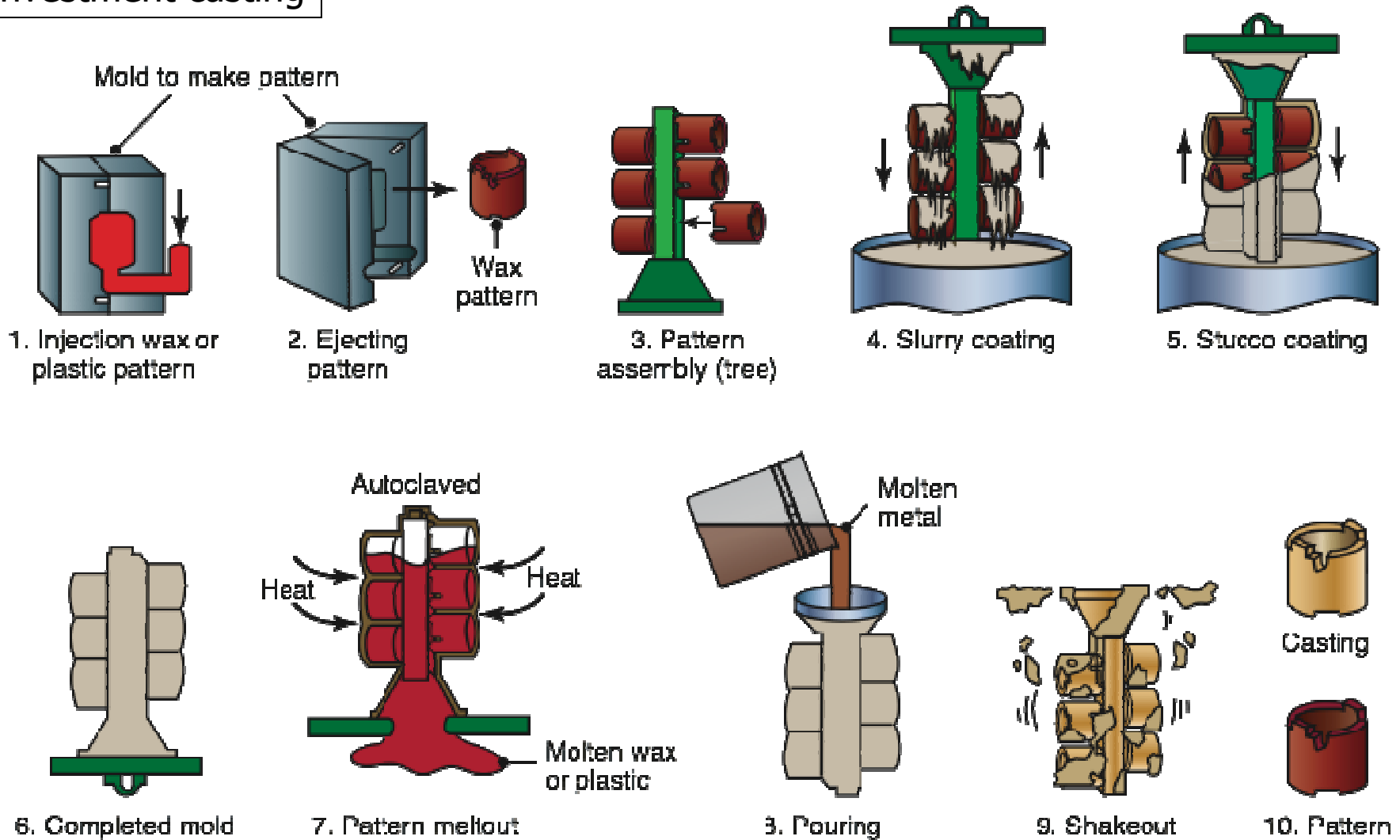
Modello transitorio  
Forma transitoria

Precisione dimensionale molto buona  
Finitura superficiale molto buona  
Spessori minimi 1.5 mm  
Pezzi piccoli  
Produzione di piccola media serie

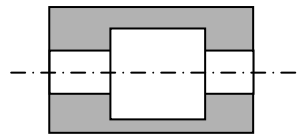
I modelli possono essere comunque complessi, non essendoci problemi di estrazione. Ovviamente la conchiglia per fare i modelli diventa molto costosa.



Investment casting



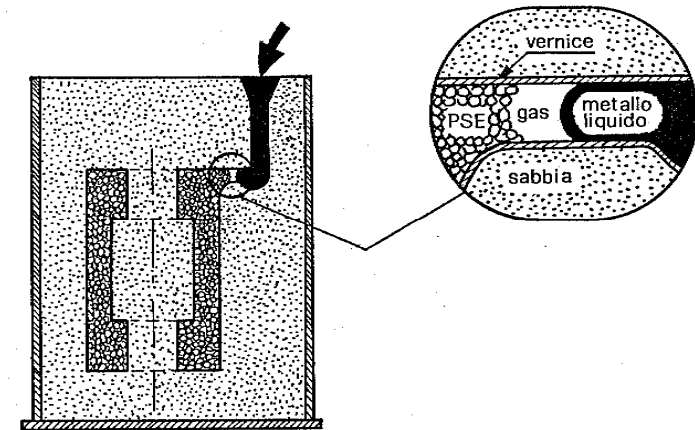
## Polycast



Pezzo



- Preparazione modello
- stampaggio ad iniezione
  - incollaggio delle diverse parti
  - verniciatura con polvere di quarzo/allumina



Colata in forma ottenuta con polistirene espanso

### Vantaggi:

- forma in un'unica staffa
- assenza di bave
- parti in sottosquadro
- assenza di anime
- assenza di angoli di spoglia
- riciclo totale della sabbia

### Svantaggi:

- possibile porosità
- finitura superficiale modesta



## **Altri sistemi di formatura**

### Formatura in fossa

Getti di grandi dimensioni, formatura manuale, impiego di sagome nel caso di pezzi assialsimmetrici.

### Formatura in sabbia cemento

Adatta per getti di grosse dimensioni (gnrl di materiali ferrosi). L'indurimento avviene per formazione di prodotti di idratazione cristallini (es.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

Generalmente si impiega cemento Portland (7%-12%) + acqua (3%-10%). Si ottiene un impasto fluido che ricopia perfettamente il modello senza richiedere compressione. La sabbia può essere parzialmente recuperata (70-80%)

#### Vantaggi

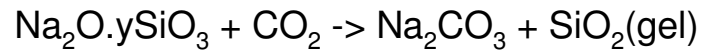
- non necessita di compattazione (modello anche in polistirolo)
- resistenza meccanica elevata (getti da 1 tonn a 600 (Spurr), es. gabbie di laminatoi)
- ridotta produzione di polveri

#### Svantaggi

- difficoltà di distaffatura
- lungo tempo di presa ed indurimento del cemento (24-48 h)

### Formatura alla CO<sub>2</sub>

Si utilizza come legante il silicato sodico (vetro solubile). Realizzata la forma fa passare nel suo interno una corrente di CO<sub>2</sub> che dà luogo alla reazione:



La silice gelatinosa forma ponti di collegamento tra i grani di sabbia.

- adatto sia per **anime** che per forme
- impiegare additivi per facilitare la disgregazione delle forme/anime dopo la colata
- pezzi fino a 100 tonn
- elevata produttività
- parziale recupero (40% max (Giusti, 169))

### Processo hot-box

Sabbia e resina termoindurente con catalizzatore.

La polimerizzazione avviene a 180 - 250 °C.

Costo dell'energia, sostanze nocive.

### Processo cold-box

Sabbia e resina termoindurente. Si impiega un catalizzatore gassoso che promuove la polimerizzazione a temperatura ambiente.

- Processi a solidificazione direzionale (Metals Handbook):

- Processo **DS** (**D**irectional **S**olidification)
- Processo **SC** (**S**ingle **C**ystal)

Il metallo viene colato in una forma a guscio, di materiale ceramico, posta in un forno a temperatura superiore a quella di fusione del metallo. La solidificazione avviene facendo traslare lentamente il guscio verso un ambiente a temperatura più bassa. Si possono ottenere strutture cristalline a grani allungati (lungo la direzione del flusso del calore), compositi metallici eutettici e componenti costituiti da un singolo cristallo.

Es. palette di turbine a gas.

- Processi **CLA, CLV, CV** (Metals Handbook): impiegano una forma a guscio e un sistema di riempimento per aspirazione
  - **C**ounter-gravity **L**ow-Pressure of **A**ir-meleted alloy
  - **C**ounter-gravity **L**ow-Pressure of low-**V**acuum-meleted alloy
  - **C**heck **V**alve casting

•Formatura magnetica (Mazzoleni 1, 146)

Modello di polistirene. Il materiale di formatura, polvere di ferro [eventualmente miscelata con magnetite ( $Fe_3O_4$ )] viene addensato mediante vibrazione e tenuto insieme dalle forze generate da un campo magnetico

- Formatura in vuoto (applicabile a tutte le leghe,
- precisione, recupero sabbia)

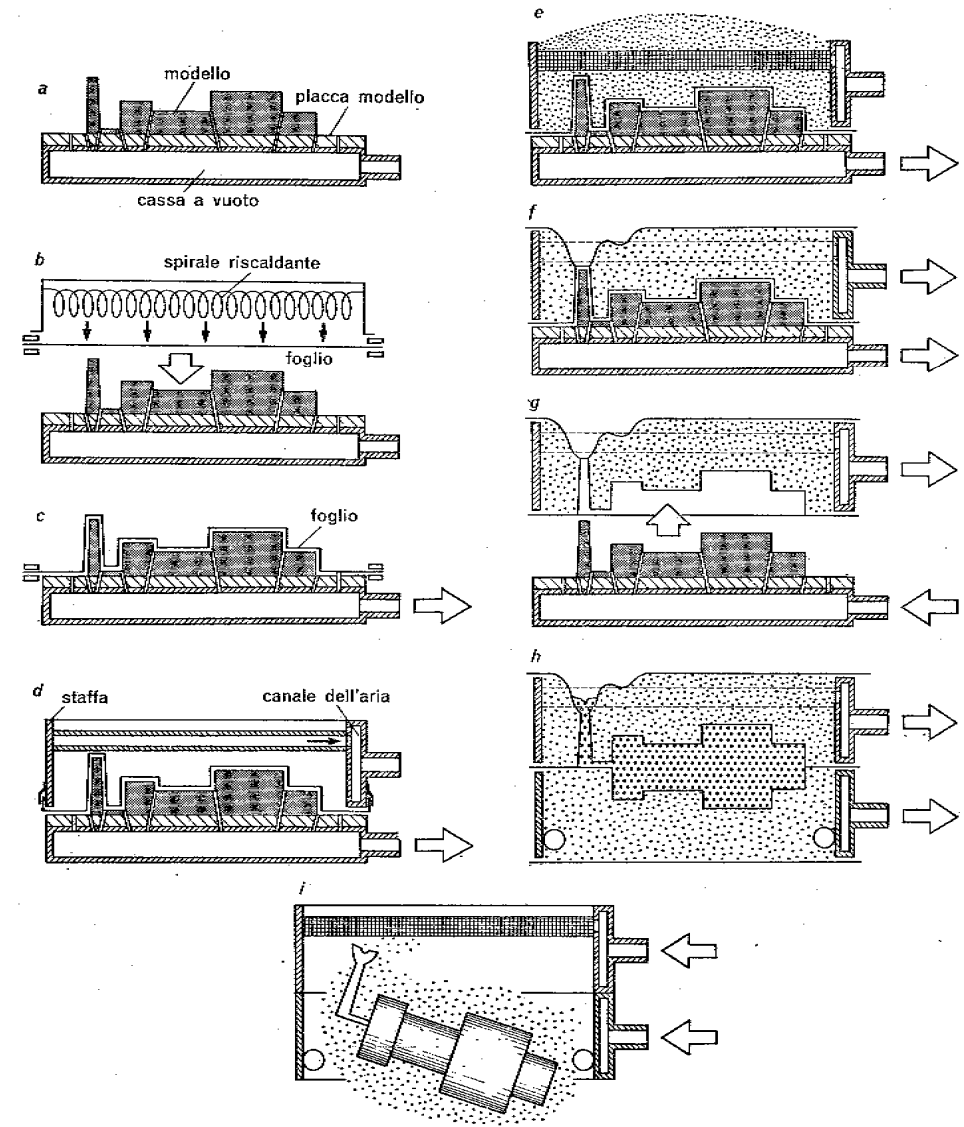


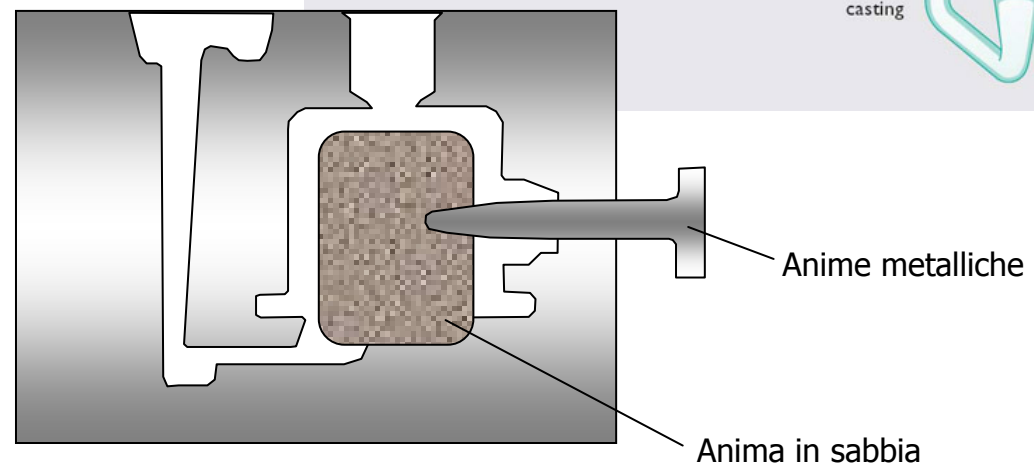
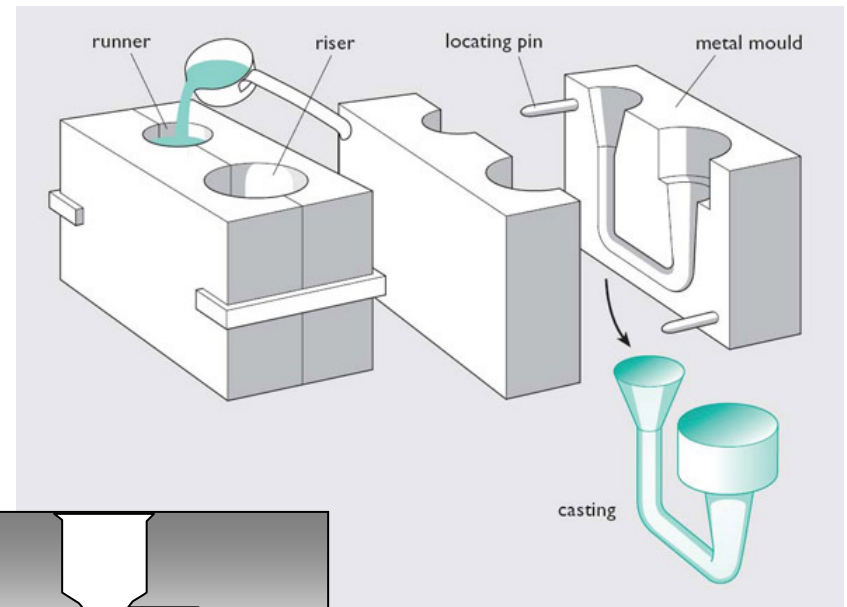
Fig. 78. — Formature in vuoto. La placca modello è applicata a una cassa in cui si pratica il vuoto (a). Su di essa si stende un foglio sottile termoplastico riscaldato preventivamente per alcuni secondi (b), che vi aderisce perfettamente sotto la pressione atmosferica (c). Si applica una staffa (d) che si riempie di sabbia essiccata, eventualmente con l'azione di vibrazioni (e), si prepara il bacino di colata, si ricopre con un foglio di plastica, che si fa aderire fortemente realizzando una depressione nella staffa di 0,5 atm (f). Facendo rientrare l'aria nella cassa di base si può sollevare la staffa formata (g), comporre la forma completa con un'altra preparata in modo simile ed effettuare la colata (h). Dopo sufficiente raffreddamento del getto se ne ottiene la immediata sformatura facendo rientrare l'aria (i).

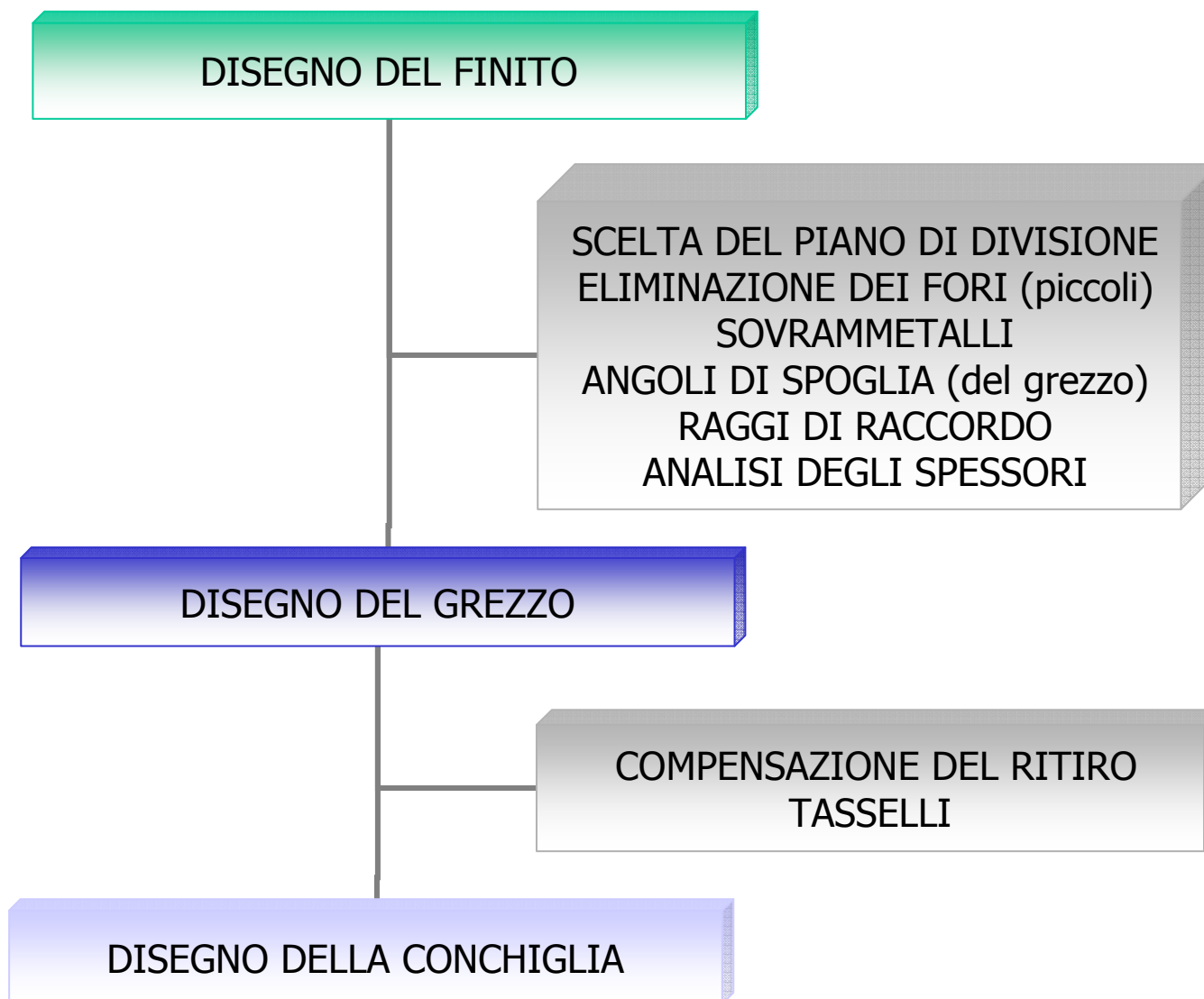
## Colata in conchiglia permanente

### Conchiglie metalliche

leghe leggere  
struttura fina dei grani  
finitura superficiale e tolleranze buone

gas disciolti  
fluidità del metallo liquido  
estraibilità del getto  
colata veloce per evitare premature  
solidificazioni in parti sottili ( 4 mm)



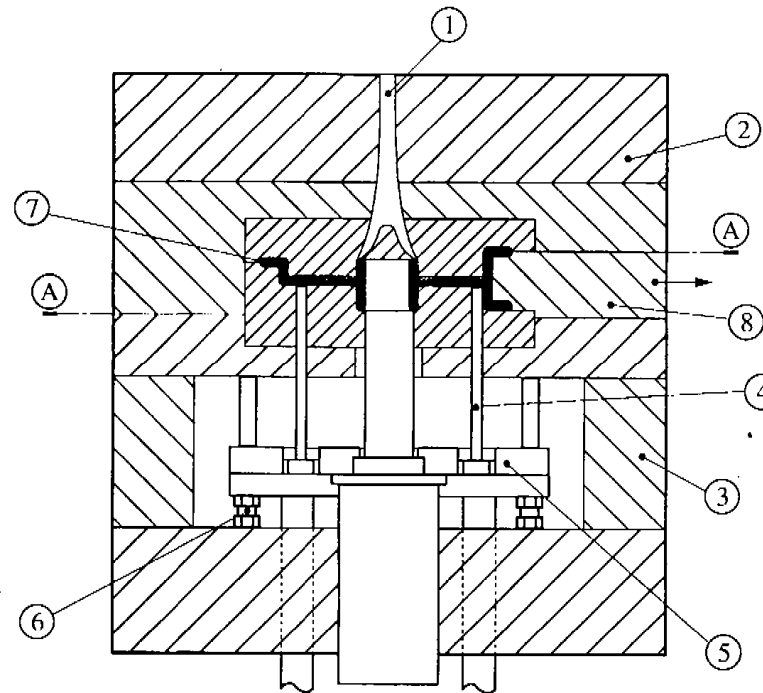


## Colata sotto pressione

Costi di impianto  
Costo delle conchiglie  
acciaio al W / Cr  
durate anche 100.000 pezzi

Anime metalliche  
Grandi serie  
Ottime finiture / tolleranze

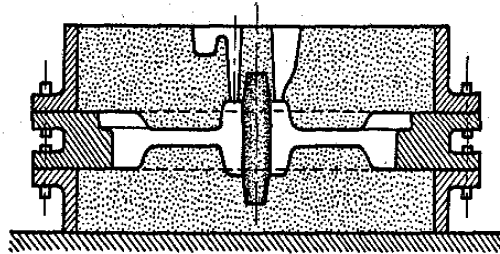
Pezzi piccoli  
Spessori 2.5 mm  
Forme semplici  
(anime metalliche )



A-A superficie di separazione delle semi-conchiglie

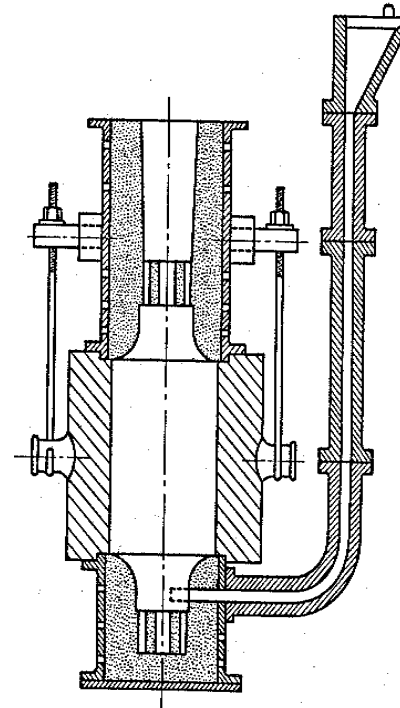
- 1 - canale di iniezione della lega liquida
- 2 - semiconchiglia fissa
- 3 - semiconchiglia mobile
- 4 - estrattore
- 6 - fine corsa regolabile
- 5 - piastra porta estrattori
- 7 - getto
- 8 - tassello mobile per sottosquadro.

Anche in forme parzialmente metalliche



Conchiglia parziale: ruota per  
veicolo ferroviario

Conchiglia parziale: cilindro  
di laminatoio





## 1. Camera di pressione CALDA: INIETTOFUSIONE

### Materiali (leghe)

Piombo / Stagno 250 - 300 °C

Zinco 500 - 600 °C

Magnesio 600 - 700 °C

### Compressione

Gas in pressione 2 - 6 MPa

Pistone tuffante 4 - 15 MPa

## 2. Camera di pressione FREDDA: PRESSOFUSIONE

### Materiali (leghe)

Alluminio 650 - 700 °C

Rame 1000 - 1100 °C

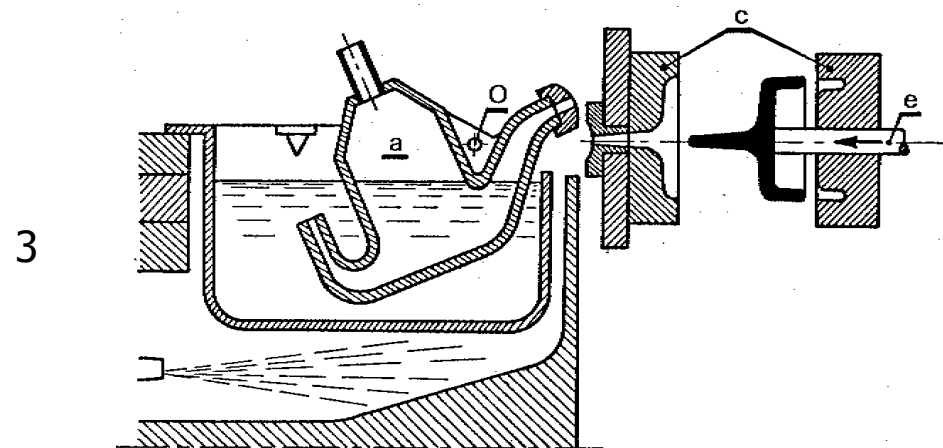
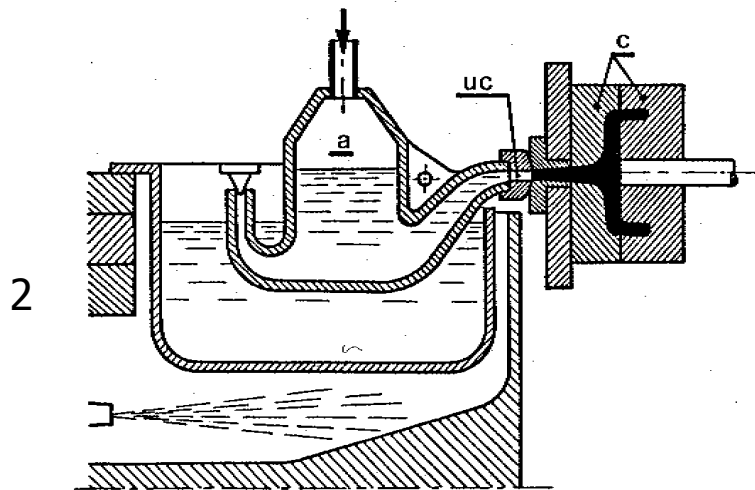
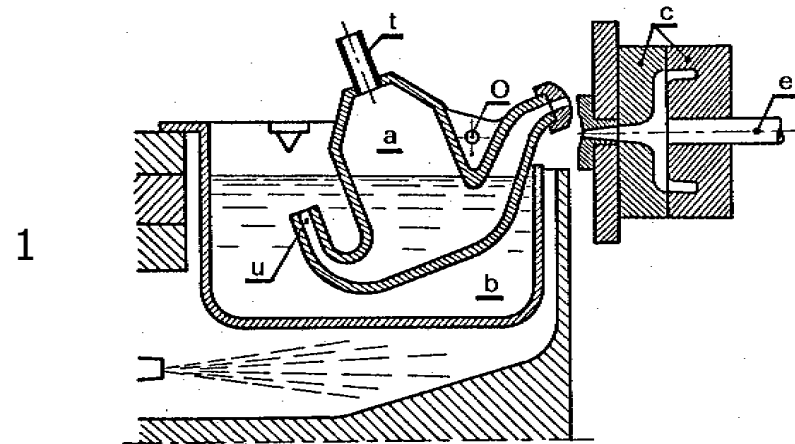
Compressione: cilindro-stantuffo 150 Mpa

Il metallo viene introdotto nella camera di pressione ad una temperatura compresa nell'intervallo di fusione.

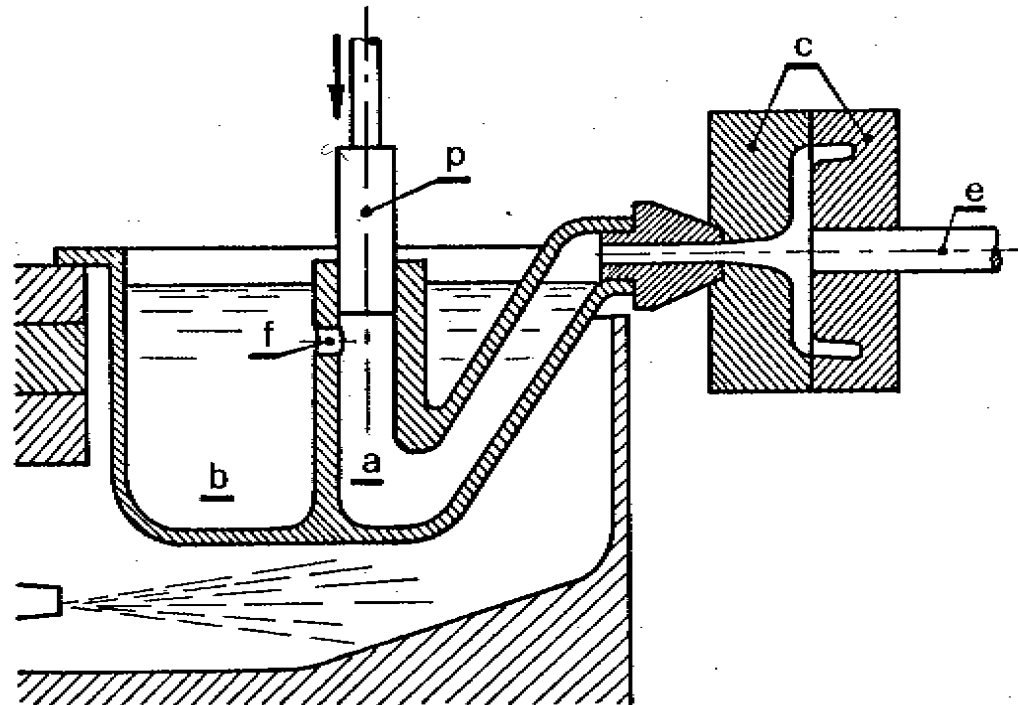
## Iniettofusione

macchina a camera  
oscillante:

- riempimento
- compressione
- estrazione

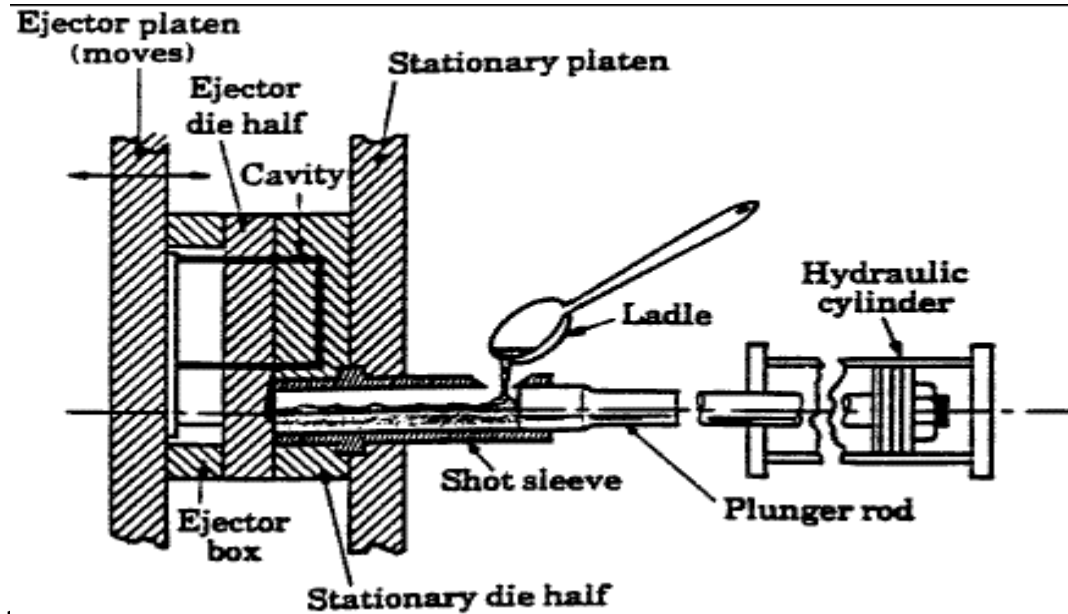


macchina a pistone tuffante

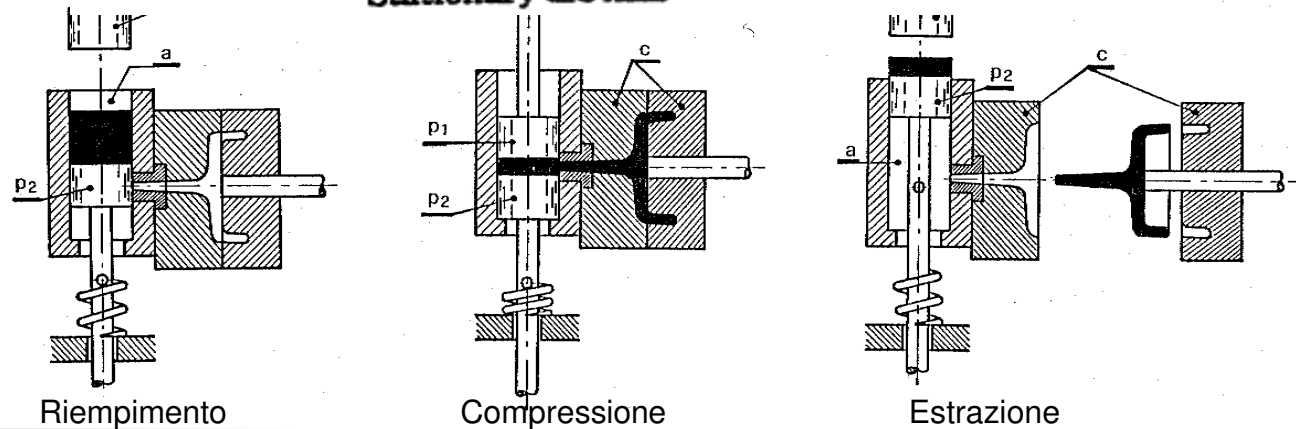


Pressofusione

Macchina a camera orizzontale

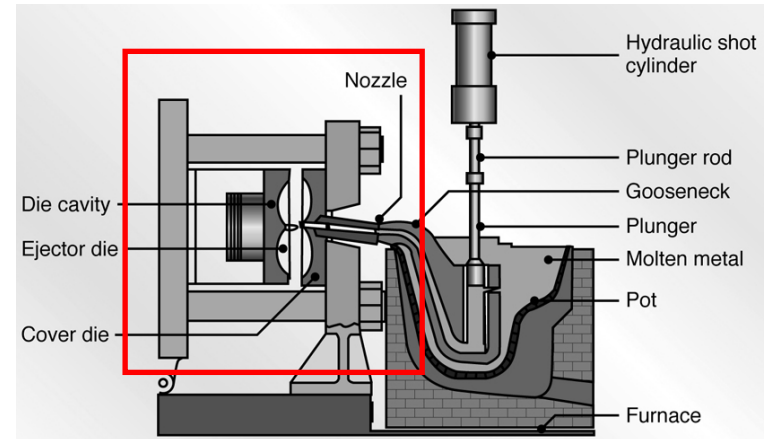


Macchina a camera verticale

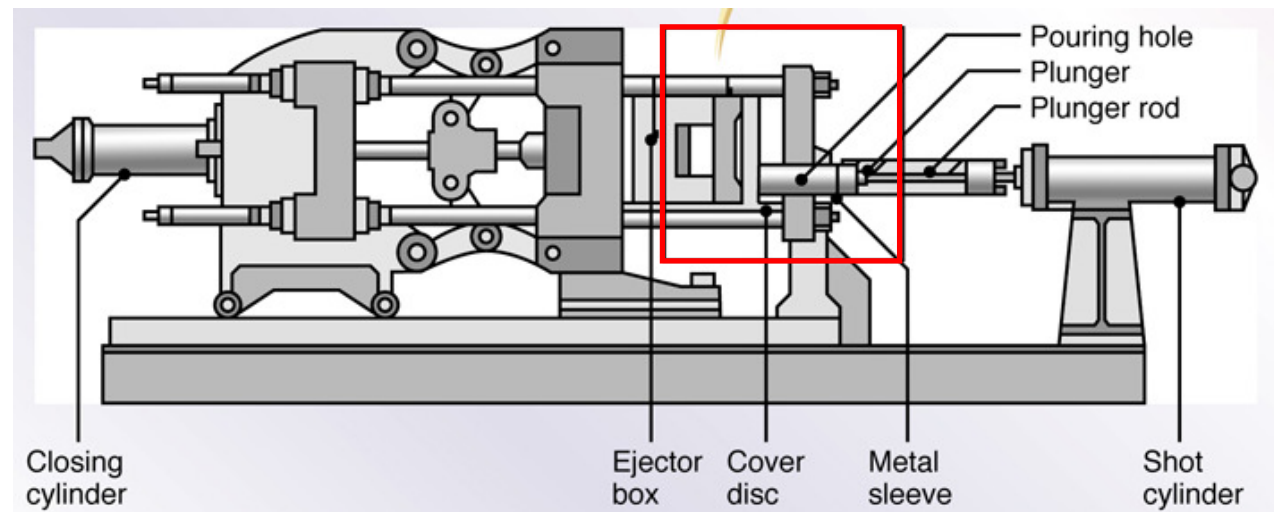


Struttura delle macchine

camera calda

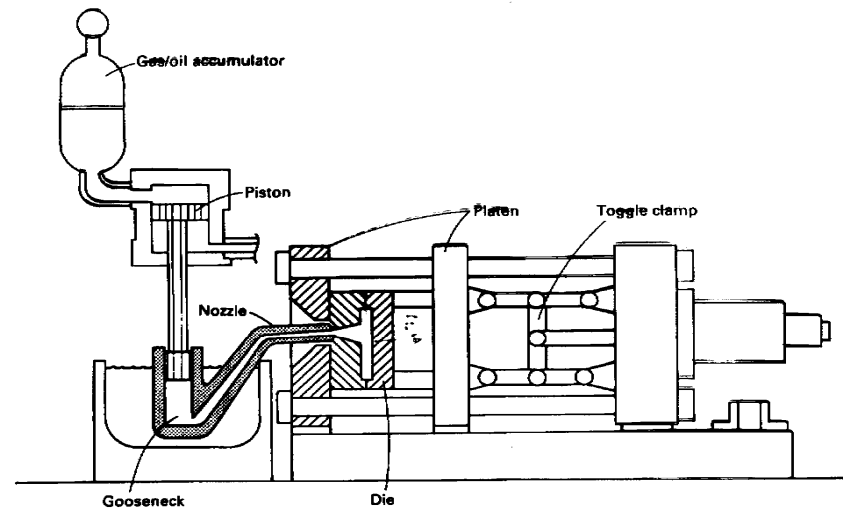


camera fredda

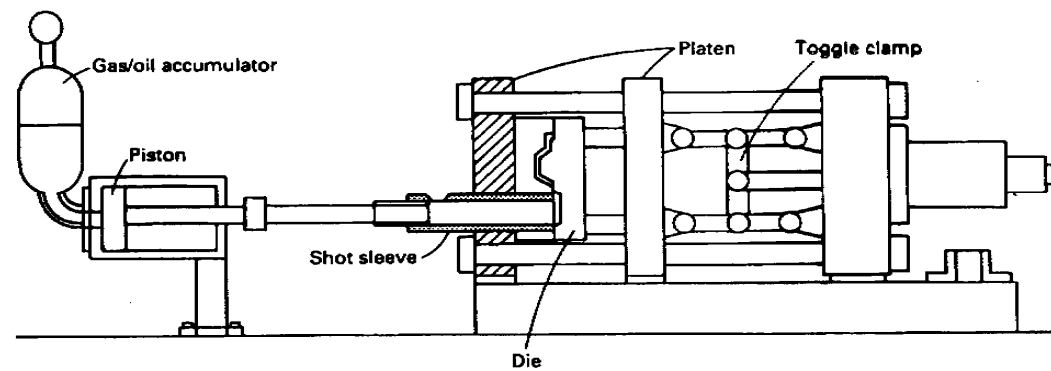


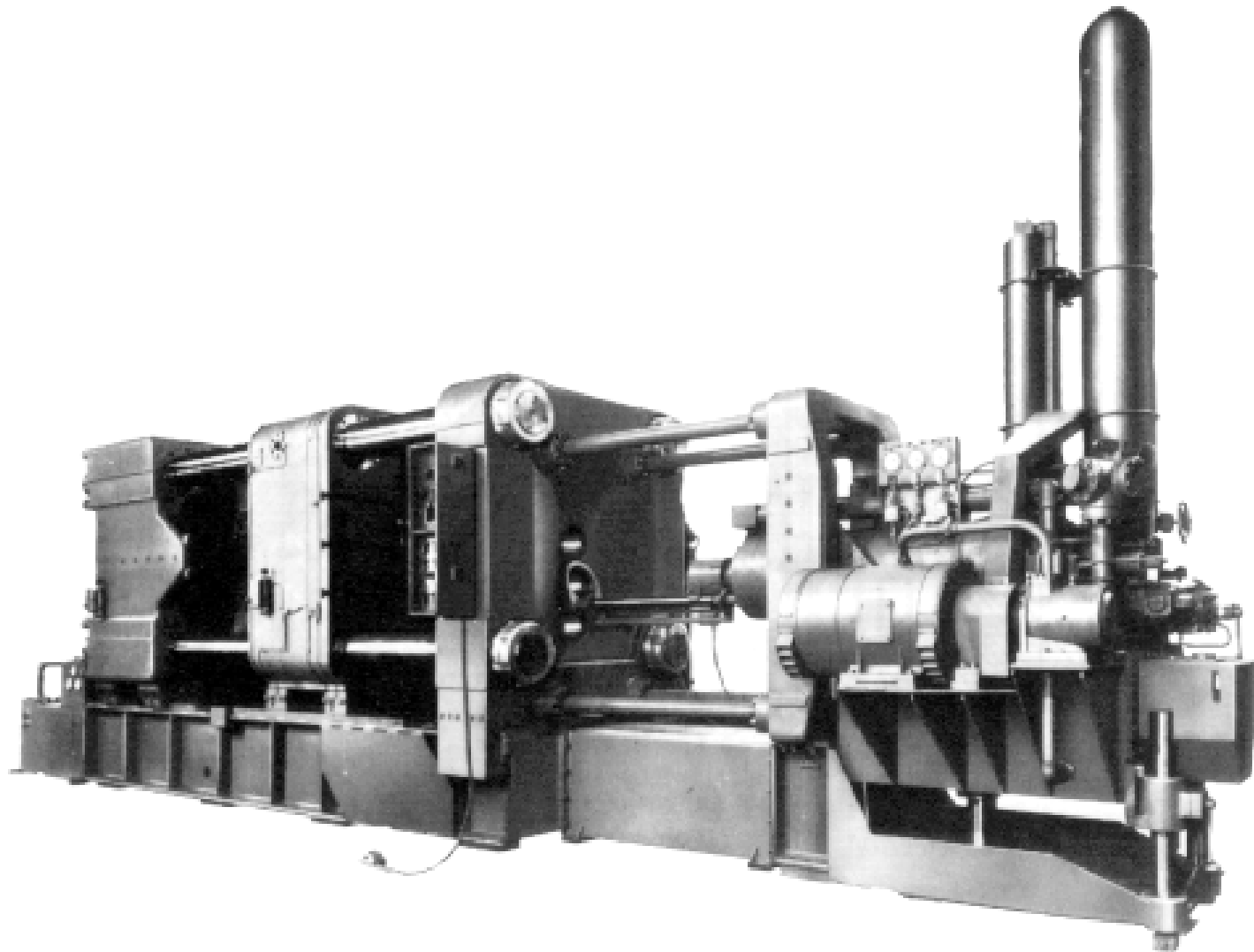
Altre macchine

camera calda



camera fredda





Apparato per pressofusione da 1500 ton (per gentile cortesia della Buhler Brothers Ltd)

## Colata centrifuga

Getti semplici e complicati

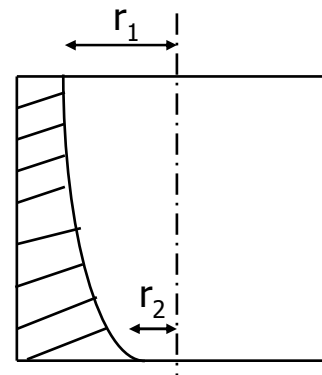
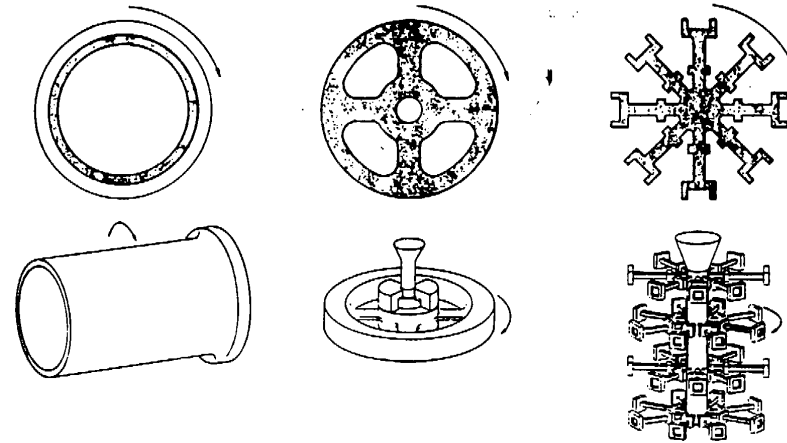
buone caratteristiche meccaniche  
buone finiture / tolleranze

velocità di rotazione:

$$\omega = 2 \pi n / 60 \quad a = \omega^2 r$$

$$\rightarrow n = 60 / 2 \pi \text{ SQR} ( a / r )$$

$$a \in [ 70 - 200 ] g$$

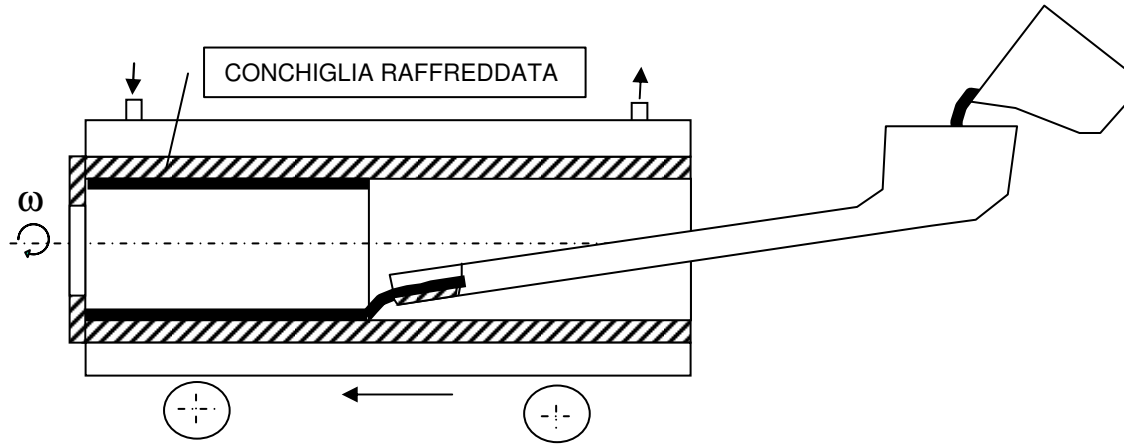


difetto di forma  
in colata verticale

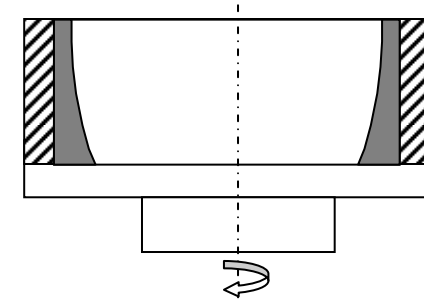
relazione sperimentale:

$$n = 42 \text{ SQR} [ h ( r_1^2 - r_2^2 ) ]$$

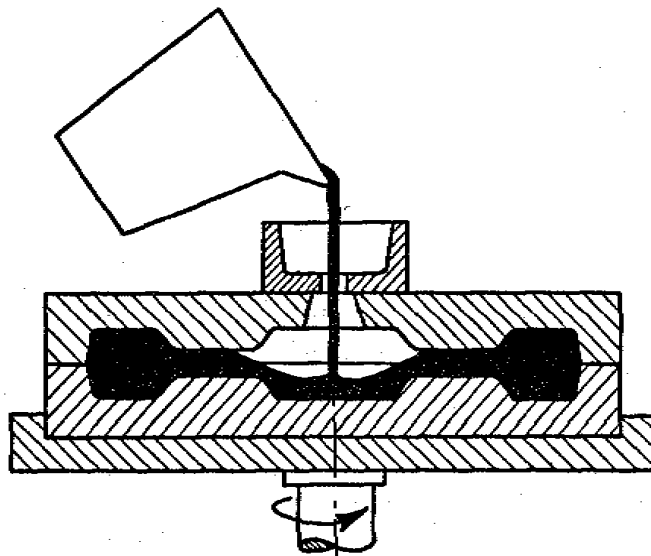




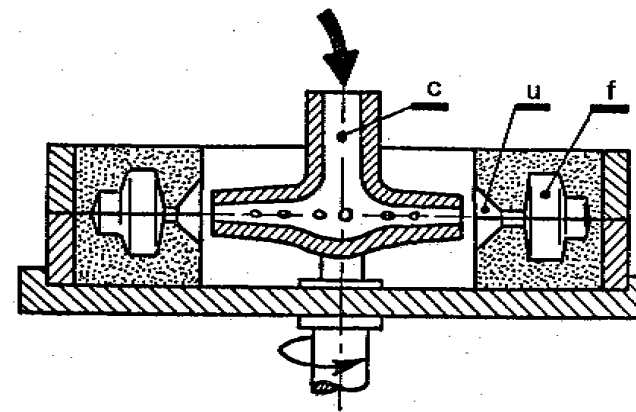
Colata centrifuga orizzontale



Colata centrifuga verticale



Colata semicentrifuga



con centrifugazione

## Finitura dei getti

STERRATURA

SABBIATURA

⇒ elevata richiesta di manodopera

SMATEROZZAMENTO

SBAVATURA

STERRATURA

getti medio / grandi

getti piccoli

- griglie a scossa
- martelli pneumatici
- spazzole metalliche

- contenitori rotanti (buratti)

SMATEROZZAMENTO:

- urto
- con mole
- taglio ad arco

SBAVATURA:

- mole
- barilatura (pezzi piccoli)

## Difetti nei getti

### Classificazione in base all' origine

1. azioni che si verificano nella forma durante la colata
2. gas
3. contrazione di volume nel passaggio solido-liquido
4. ritiro dopo la solidificazione
5. segregazione

### Parametri fondamentali del processo che influenzano i difetti

1. temperatura di colata
2. velocità di colata

### PREVENZIONI / RIMEDI

- modifiche del disegno
- modifiche del processo
- eliminazione errori accidentali durante la fabbricazione
- riparazione del getto

## CLASSIFICAZIONE IN BASE AL TIPO DI DIFETTO

	CAUSE	RIMEDI
1. incompleto riempimento	- canali di colata troppo lontani dalla zona	+ aggiungere altri attacchi/canali di colata + aumentare il carico idrostatico (battente) + aumentare la temp. di colata --> fluidità
	CAUSE	RIMEDI
2. ripresa di fusione (crosta ossidata)	- arresto temporaneo del riempimento - incontro di flussi provenienti da attacchi diversi	+ aumentare la vel. di riempimento + aumentare la temperatura di colata
	DIAGNOSI	RIMEDI
3. incrinature (tensioni di trazione)	- ispezione visiva - cause che determinano le tensioni di ritiro	+ impiego di terre/leganti collassabili * acciaio : riparazione mediante saldatura  * ghisa : sono più rari (< temperatura di colata, < ritiro ma possono causare scarti)
4. soffiature e porosità	- esame radiografico - tenuta stagna: prova idraulica	

	DIAGNOSI	CAUSE
5. formazione di ghisa bianca (Fe <sub>3</sub> C)  <i>difetto grave se si prevedono lavorazioni alle MU</i>	- prova del cuneo	+ minore velocità di raffreddamento (forme essiccate)  + maggiore temperatura di colata (effetto di preriscaldamento)
	CAUSE	
6. inclusioni non metalliche:	pressione dei gas azione erosiva (trappole)	
	TIPOLOGIE	RIMEDI
7. difetti superficiali	- porosità (pin-holes) - escrescenze (<-penetrazione) - tacconi (<- rotture)	+ maggiore consistenza della terra (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , graniglia acciaio)  + sabbia più fine  + minore temperatura di colata
	CAUSE	
8. variazioni di spessore	- spostamento delle anime	

### Reazioni del metallo liquido con la forma

- ossidazione
- penetrazione

1. per infiltrazione

2. per scorificazione (es. il manganese nell' acciaio forma MnO con alto potere bagnante)

- \* tensione superficiale (influenza della temperatura)
- \* viscosità (influenza della temperatura)
- \* pressione idrostatica
- \* colpo di pressione generato dai gas che si sprigionano (dipende dal tipo di legante, acqua, segatura, ...).

Rimedio: riduzione della velocità di colata.

- \* porosità della forma
- contrazione/espansione della ghisa

## Gas disciolti

L'assorbimento dei gas costituisce un importante problema in fonderia

Origine:

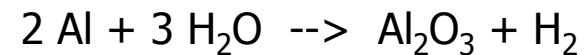
- dissoluzione nel metallo liquido
- reazione tra il metallo e la forma

Effetti: POROSITA' --> riduzione  $\sigma_r$   
 “ duttilità

Es.: la presenza di acqua nel materiale di formatura può dar luogo alle seguenti reazioni:



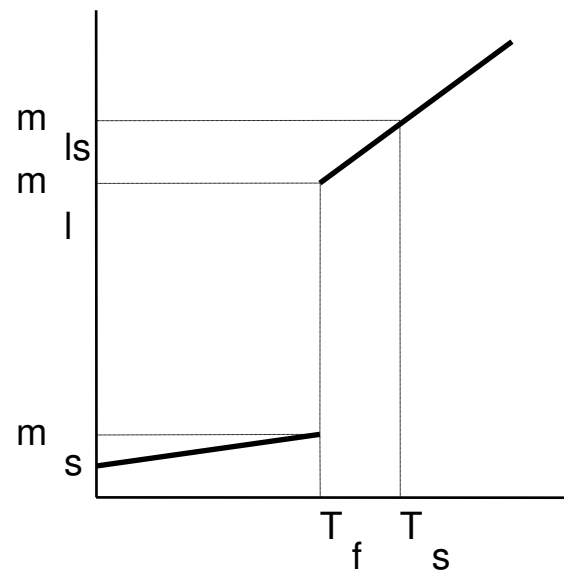
2) presenza di alluminio nella ghisa



La SOLUBILITA' dei gas dipende:

- presenza di altri elementi (es. %C, %Si, ...)
- temperatura
- pressione

Dipendenza dalla temperatura



(caso di un metallo puro)

$m$  = massa di gas che si discioglie nel metallo a  saturazione

Durante la solidificazione si libera la quantità di gas:

$$m_L - m_S$$

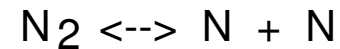
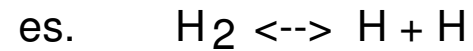
$T_f$  = temp. di fusione

$T_s$  = temp. di surriscaldamento



### Dipendenza dalla pressione

La dissoluzione è preceduta da dissociazione:



La reazione di dissociazione è regolata dalla *legge di azione di massa*

. Ad es., per la prima delle precedenti:

$$\frac{P_{H_2}}{P_H P_H} = \text{cost} \quad \Rightarrow \quad P_H \propto P_{H_2}^{0.5}$$

Per la legge di Henry, la quantità di gas disciolto nel metallo:

$$m_{gas} \propto P_H \quad \Rightarrow \quad m_{gas} \propto P_{H_2}^{0.5}$$

### METODI PER RIDURRE LA PRESENZA DEI GAS

1. Non utilizzare materiali "inquinati"  
[es. da oli da taglio]
2. Protezione mediante flussi  
(gnrl. miscele di sali alcalini: NaCl, CaCl<sub>2</sub>, ...)
3. Limitare la temperatura di surriscaldamento ed il tempo di permanenza allo stato fuso
4. Degasaggio:
  - insufflazione di gas insolubili
  - con sali → decomposizione → gas insolubili

e/o	"	azione meccanica: es. Ar
		chimica: es. Cl

  - trattamento sotto vuoto
5. Fusione sotto vuoto (ottimo ma costoso)

RIDUZIONE EFFETTI NOCIVI DEI GAS: colata sotto pressione

## Inclusioni non metalliche

Fasi non metalliche o composti intermetallici (specialmente nelle leghe non ferrose)

Nelle leghe ferrose sono di solito: ossidi, solfuri, nitruri

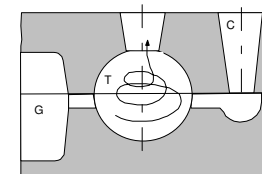
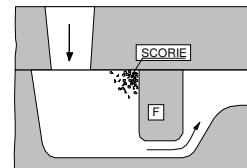
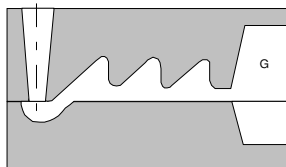
Effetti:

- riduzione  $R_m$
- riduzione duttilità

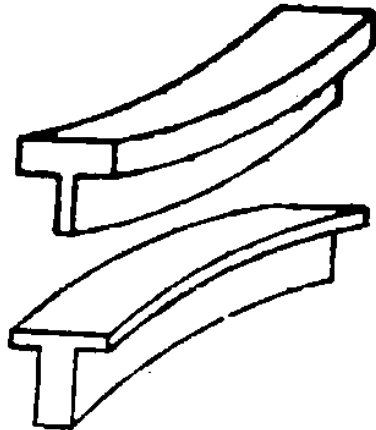


natura  
forma  
quantità  
distribuzione  
orientazione

Metodi per l'eliminazione: FILTRI, TRAPPOLE

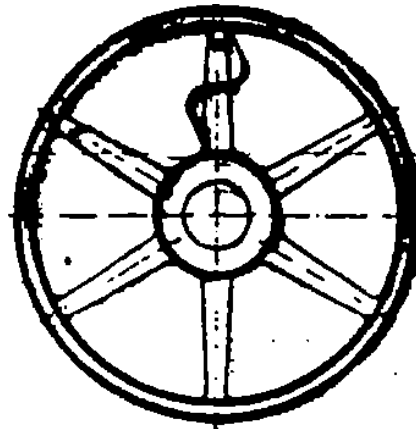


Difetti di forma



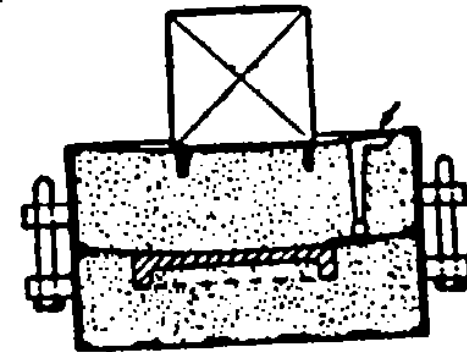
Deformazione (incurvamento) dell'asse principale di un getto causato da eterogeneità di spessori: i getti presentano la concavità dalla parte dello spessore maggiore.

Incurvamento



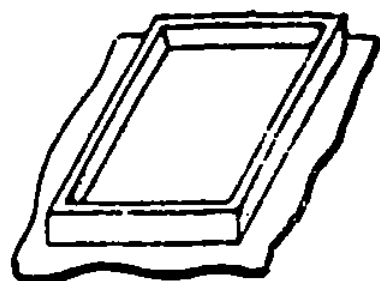
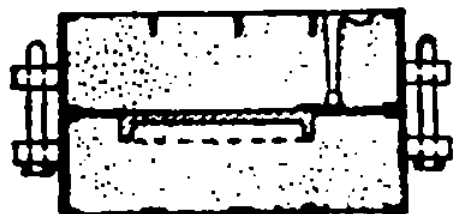
Criccature e rotture delle razze di un volano causate da eccessive differenze degli spessori tra mozza, corona e razze, e dalle razze in numero pari disposte radialmente.

cricche

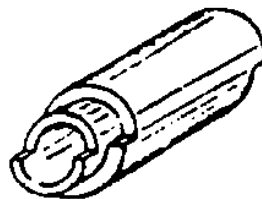
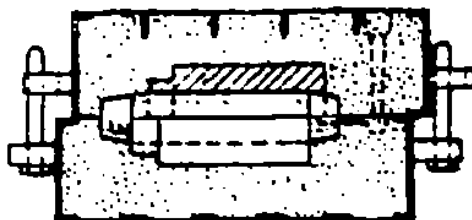


Riduzione dello spessore di un getto causata da cedimento della mezza staffa superiore troppo caricata

schiacciamento staffa

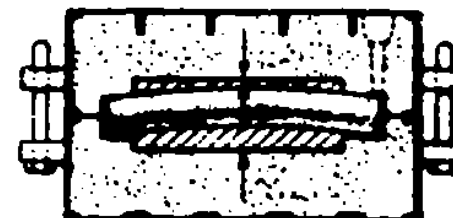


sollevamento staffa



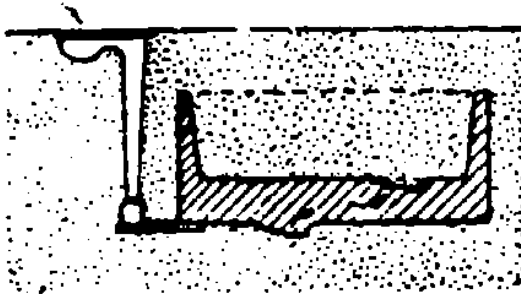
Variazione di staffa provocata da eccessivo gioco tra perni di riferimento e fori delle staffe.

disallineamento forma

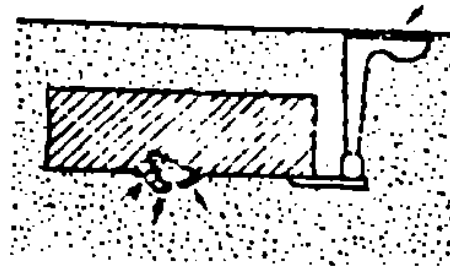


Irregolarità dello spessore in un tubo a causa dello spostamento dell'anima dovuto alla spinta metallostatica.

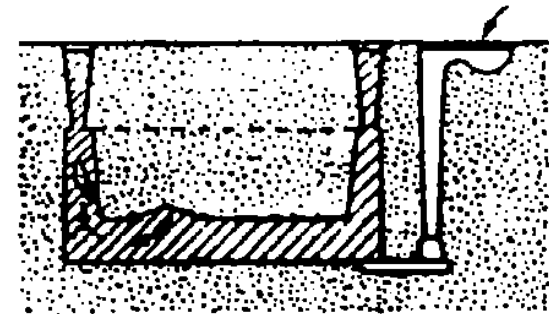
disallineamento anima



**Taccone:** una zolla di sabbia si stacca dalla parte inferiore (a causa della scarsa permeabilità) e va a galleggiare contro la superficie superiore della forma: il getto quindi presenta in basso una protuberanza e sopra una cavità con inclusione di sabbia.



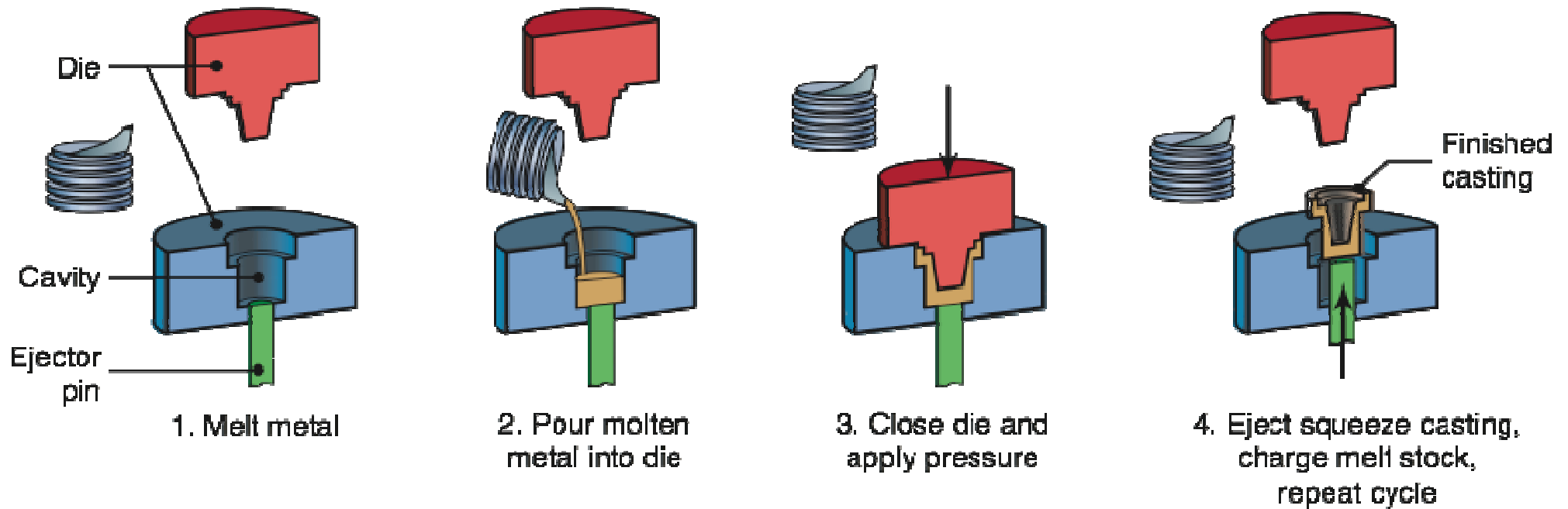
**Taccone falso o scatola:** difetto dovuto alla stessa causa; la zolla però non si stacca del tutto e rimane imprigionata nella protuberanza.



**Altro difetto analogo ai precedenti:** la zolla si stacca da una parete superiore e, trascinato dal metallo liquido, rimane imprigionato in una nervatura.

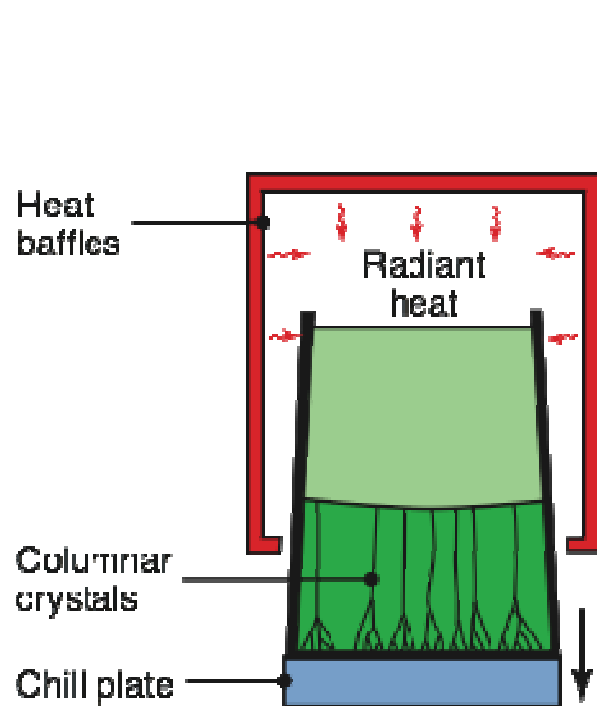
Rottura della forma, distacco di zolle

## Squeeze-Casting

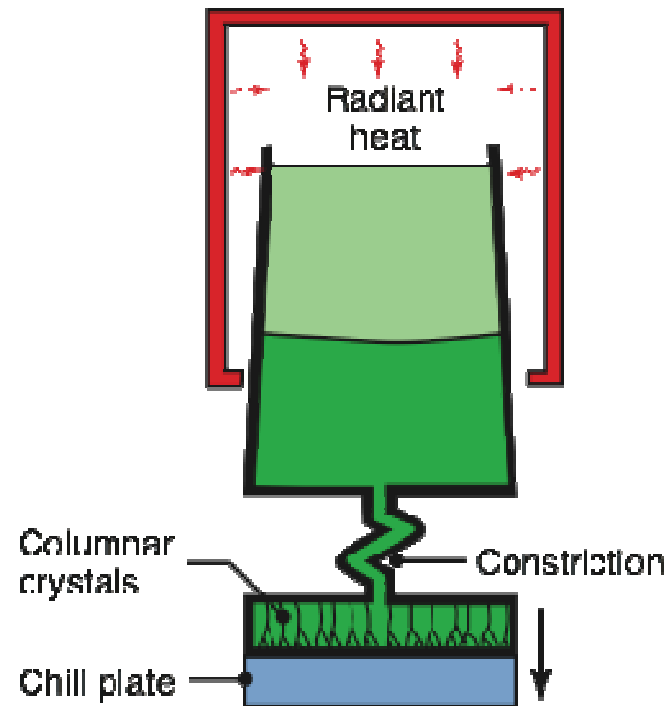


Sequenza delle operazioni nello squeeze casting, che combina i vantaggi della colata e della forgiatura

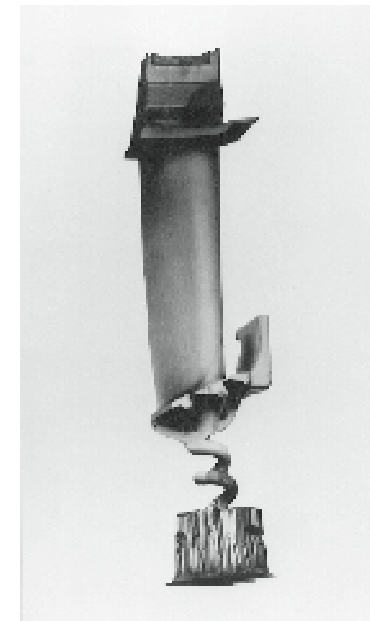
## Turbine Blade Casting



Solidificazione con direzione preferenziale di crescita



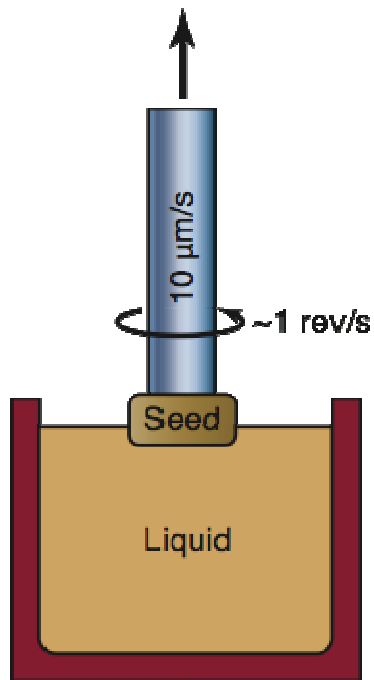
Metodo per produrre palette monocristalline



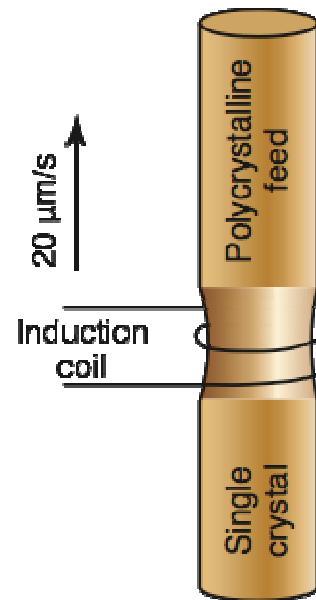
Esempio di palette in monocristallo



## Crescita monocristallina



Metodo Czochralski



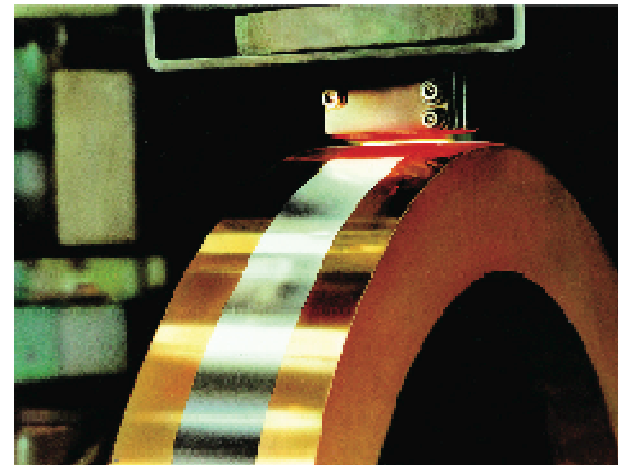
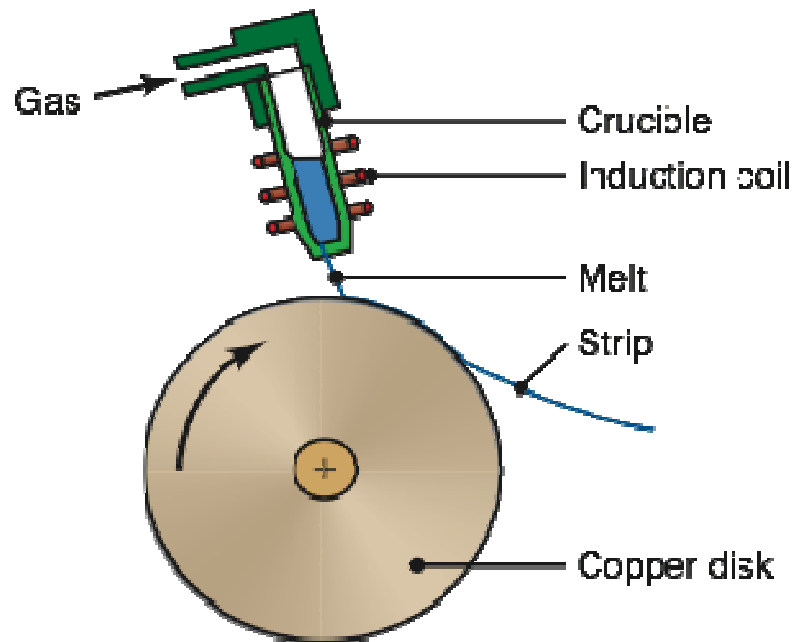
Metodo zona fusa flottante



Monocristallo di silicio

Questi metodi sono particolarmente usati nell'industria dei semiconduttori

## Melt-Spinning Process



L'elevatissima velocità di raffreddamento ( $10^5$ - $10^7$  °C/s) produce materiali amorfi (vetri metallici)