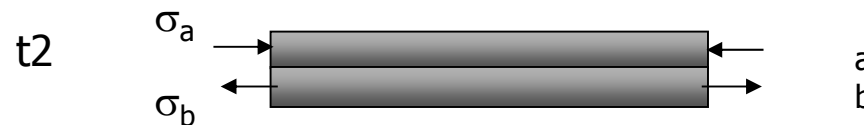
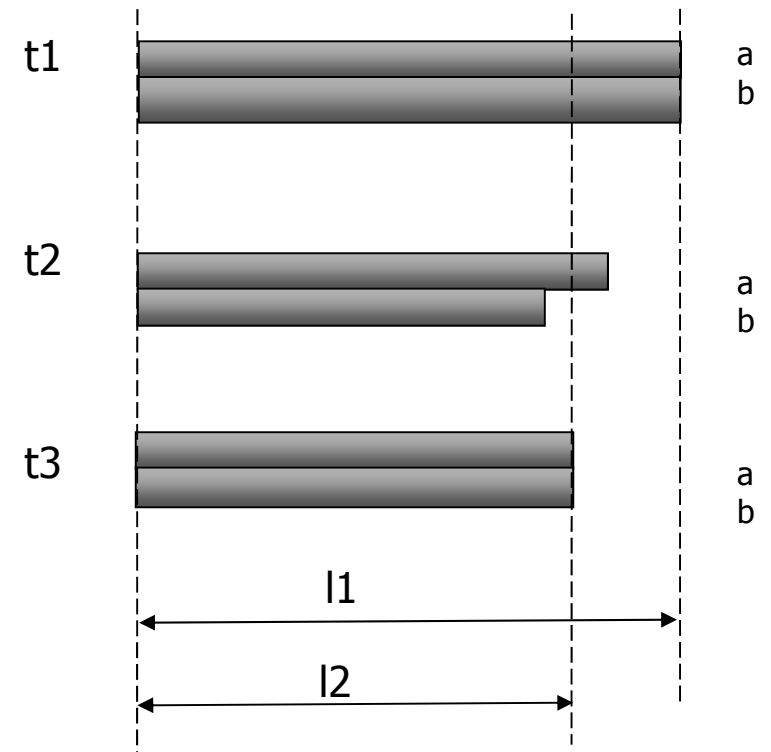




Tensioni termiche di ritiro e residue

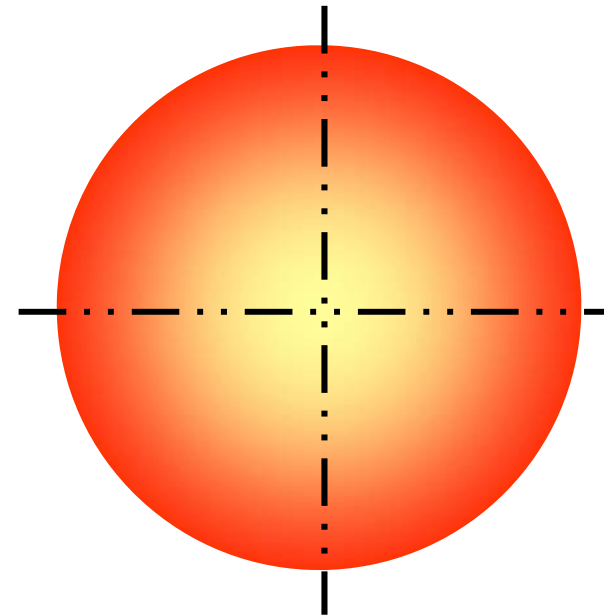
Durante il raffreddamento di un getto si generano necessariamente gradienti termici che porterebbero zone contigue ad avere, allo stesso tempo, lunghezze diverse. Ciò non è possibile per la congruenza alla deformazione e quindi, per mantenere la stessa lunghezza in ogni istante queste zone del materiale devono essere assoggettate a sollecitazioni, di compressione o di trazione a seconda del gradiente di temperatura. Dal momento che la resistenza alla deformazione dei materiali è modesta, ad alta temperatura, allora si possono avere deformazioni permanenti ed anche rotture.



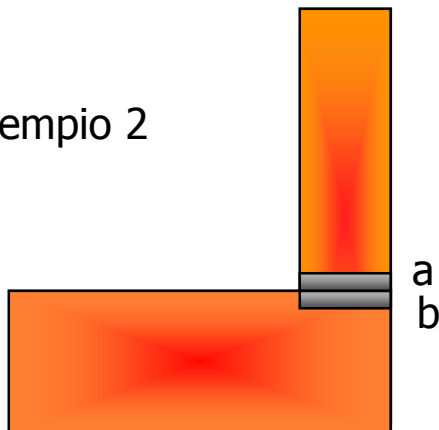


Esempio 1: sfera piena

La zona esterna si raffredda più velocemente dell'interno e quindi si vorrebbe contrarre, ma ciò non è possibile e quindi viene sollecitata a trazione per mantenere in ogni istante una lunghezza uguale (congruente) con la parte interna



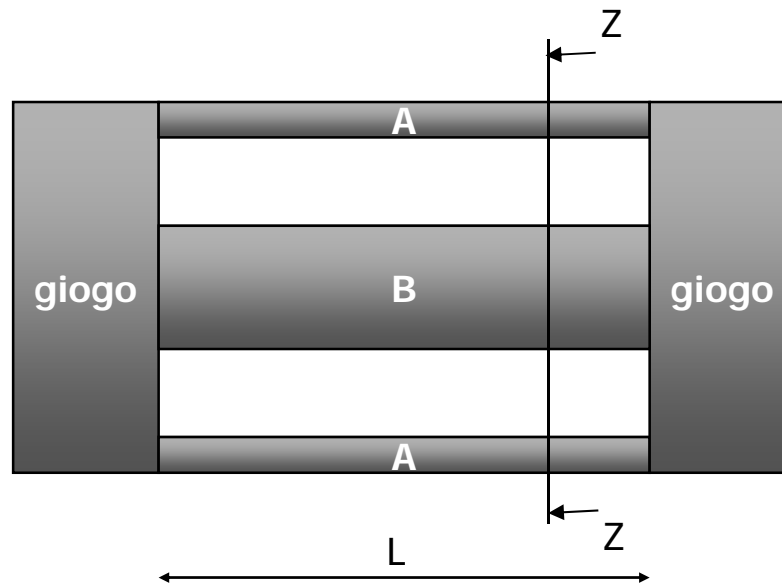
Esempio 2



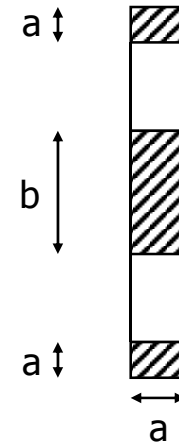
L'elemento a si raffredda più velocemente dell'elemento b e quindi si vorrebbe contrarre maggiormente, ma ciò non è possibile e quindi viene sollecitato a trazione per mantenere in ogni istante una lunghezza uguale (congruente) con la parte b



Esempio 3



Sez. Z



La quantità di calore smaltita per conduzione è $\Delta Q \propto S \cdot (T - T_{ambiente}) \Delta t$

l'abbassamento di temperatura è $\Delta T \propto \frac{\Delta Q}{\rho V} \propto \frac{1}{V} S \cdot (T - T_{ambiente}) \Delta t = \frac{1}{M} \cdot (T - T_{ambiente}) \Delta t$



Nel nostro caso:

$$\frac{V_A}{S_A} = \frac{a^2 L}{2 \cdot 2a \cdot L} = \frac{a}{4}$$

$$\frac{V_B}{S_B} = \frac{a \cdot b \cdot L}{2 \cdot (a+b) \cdot L} = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a+b)}$$

quindi

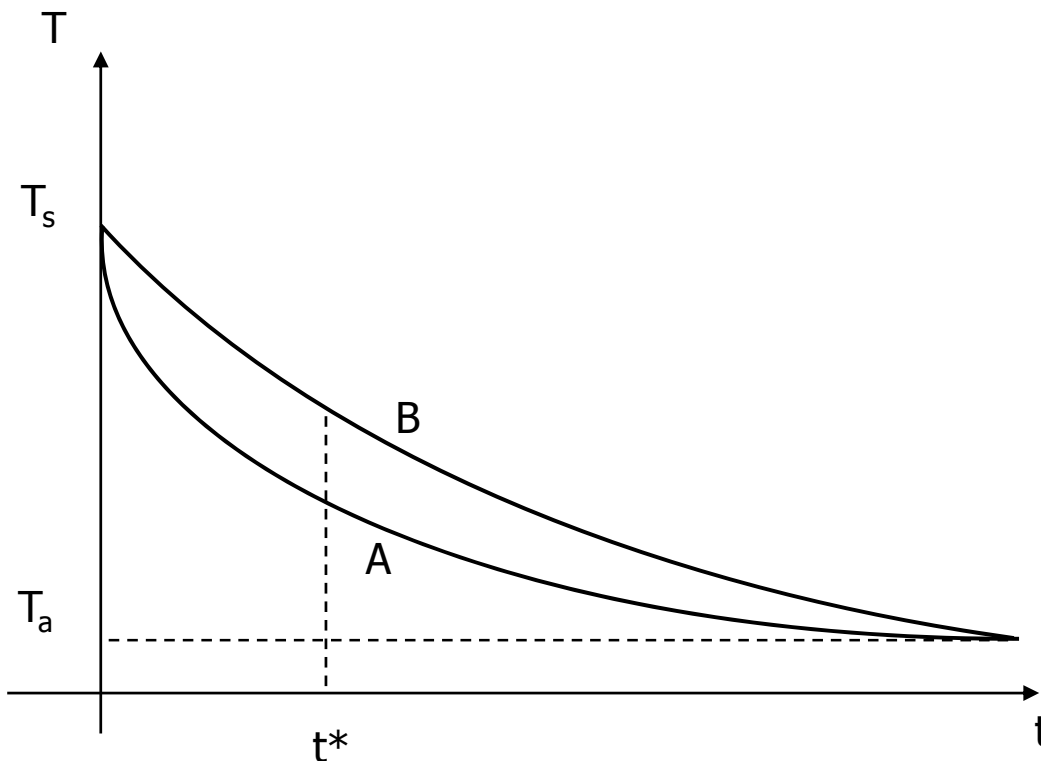
$$\frac{M_B}{M_A} = \frac{2}{\frac{a}{b} + 1}$$

per $b \ll a \rightarrow \frac{M_B}{M_A} \ll 2$

la parte A si raffredda molto più velocemente



considerando le condizioni al contorno:



All'inizio A si raffredda più di B

Poiché verso la fine del raffreddamento il ΔT di A è molto piccolo, da un punto in poi (tempo t^*) B si raffredda più velocemente, pur avendo modulo maggiore.

In quel momento le velocità di raffreddamento sono uguali

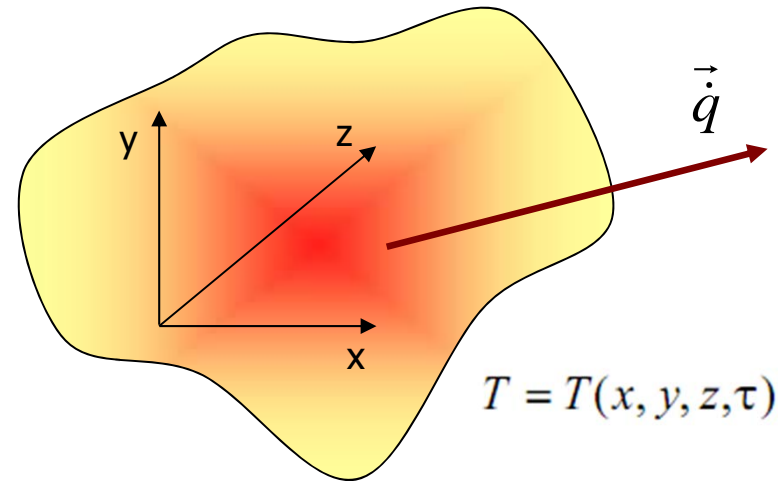
Alla fine del raffreddamento le due parti devono avere la stessa T



Analiticamente:

Flusso termico:

$$[\dot{q}] = \frac{W}{m^2}$$



Legge di Fourier:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}(T)$$

$$\text{grad}(T) = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k}$$

dove:

$$[\lambda] = \frac{W / m^2}{K / m} = \frac{W}{mK}$$

coefficiente di conducibilità termica

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \beta T)$$

varia con la temperatura



Nel caso monodimensionale:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

da cui:

$$\dot{q} \cdot dx = -\lambda \cdot dT$$

$$\dot{q} \cdot \int_0^s dx = -\lambda \cdot \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$\dot{q} \cdot s = -\lambda \cdot (T_2 - T_1)$$

densità di flusso termico:

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{s} \cdot (T_1 - T_2)$$

Introducendo:

$$k = \frac{\dot{q}}{\Delta T} = \frac{\lambda}{s}$$

coefficiente globale
di scambio termico

$$[k] = [\dot{Q}] \cdot [S]^{-1} \cdot [T]^{-1} = \frac{W}{m^2 K}$$

mette in relazione di
proporzionalità diretta il
flusso termico specifico e
la differenza di temperatura

Flusso termico:

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot S = k \cdot S \cdot \Delta T$$



Un corpo che si trova ad una certa temperatura è in grado di smaltire (se abbassato di temperatura fino a quella ambiente) una quantità di calore pari a:

$$Q = c \cdot m \cdot (T - T_a) = c \cdot \rho \cdot V \cdot (T - T_a)$$

Portando agli infinitesimi:

$$dQ = c \cdot \rho \cdot V \cdot dT$$

accoppiando con l'equazione di Fourier:

$$dQ = k \cdot S \cdot (T - T_a) \cdot dt$$

si ha l'equazione differenziale:

$$c \cdot \rho \cdot V \cdot dT = k \cdot S \cdot (T - T_a) \cdot dt$$

la soluzione può essere trovata per separazione di variabili:

$$\frac{dT}{(T - T_a)} = \frac{k}{c \cdot \rho} \cdot \frac{S}{V} \cdot dt$$

dipendono solo dalla temperatura $h(T)$

$\frac{1}{M}$



$$\frac{dT}{(T - T_a)} = h(T) \cdot \frac{S}{V} \cdot dt$$

Condizioni al contorno: $\begin{cases} t = t_0 = 0 & T = T_s \\ t \rightarrow \infty & T = T_a \end{cases}$

Integrando: $\int_T^{T_s} \frac{dT}{(T - T_a)} = \int_0^t \frac{h(T)}{M} \cdot dt$

Trascurando la variazione di k , c e ρ con la temperatura

$$\ln(T - T_a) \Big|_T^{T_s} = \frac{h}{M} t \Big|_0^t$$

$$\ln(T_s - T_a) - \ln(T - T_a) = \frac{h}{M} t$$

$$\ln \frac{(T_s - T_a)}{(T - T_a)} = \frac{h}{M} t$$

$$\frac{(T_s - T_a)}{(T - T_a)} = e^{\frac{h}{M} t}$$

$$(T - T_a) = (T_s - T_a) e^{-\frac{h}{M} t}$$

In definitiva: $T = (T_s - T_a) e^{-\frac{h}{M} t} + T_a$



Per le due barre le temperature sono:

$$\begin{cases} T_A = (T_S - T_a) e^{-\frac{h}{M_A}t} + T_a \\ T_B = (T_S - T_a) e^{-\frac{h}{M_B}t} + T_a \end{cases}$$

Mentre le velocità:

$$\begin{cases} \dot{T}_A = \frac{\partial T_A}{\partial t} = -\frac{h}{M_A} (T_S - T_a) e^{-\frac{h}{M_A}t} \\ \dot{T}_B = \frac{\partial T_B}{\partial t} = -\frac{h}{M_B} (T_S - T_a) e^{-\frac{h}{M_B}t} \end{cases}$$

le velocità di raffreddamento sono uguali e la differenza di temperatura è massima quando:

$$\dot{T}_A = \dot{T}_B$$



Da cui esiste t^* tale che:

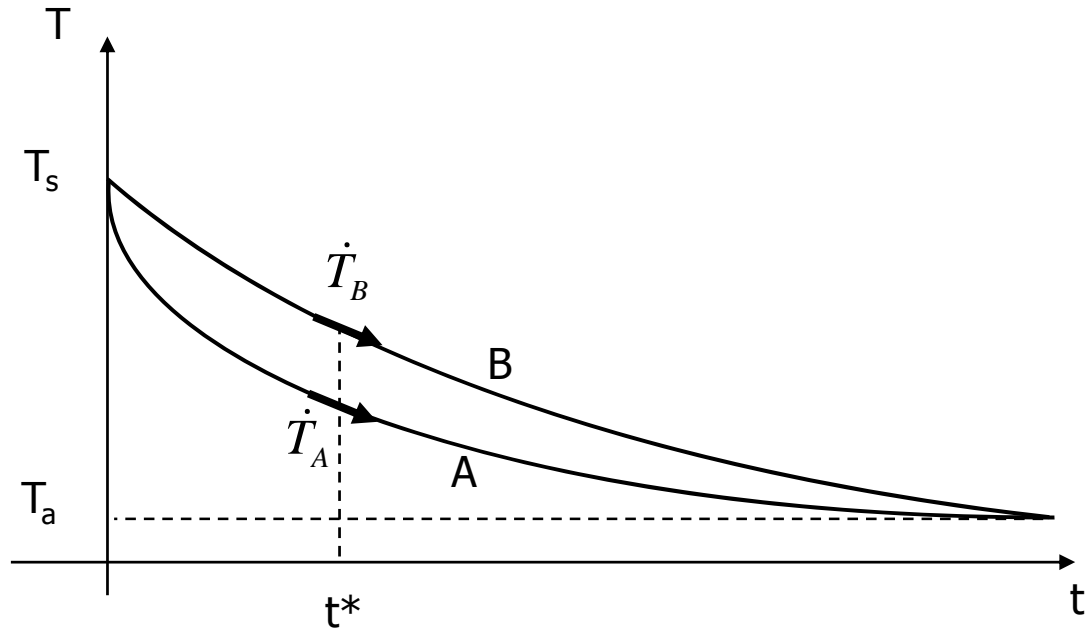
$$-\frac{h}{M_A}(T_S - T_a)e^{-\frac{h}{M_A}t^*} = -\frac{h}{M_B}(T_S - T_a)e^{-\frac{h}{M_B}t^*}$$

$$\frac{1}{M_A}e^{-\frac{h}{M_A}t^*} = \frac{1}{M_B}e^{-\frac{h}{M_B}t^*}$$

$$\frac{M_B}{M_A} = \frac{e^{-\frac{h}{M_B}t^*}}{e^{-\frac{h}{M_A}t^*}}$$

$$\ln \frac{M_B}{M_A} = -\frac{h}{M_B}t^* - \left(-\frac{h}{M_A}t^* \right)$$

$$t^* = \frac{\ln \frac{M_B}{M_A}}{h \left(\frac{1}{M_A} - \frac{1}{M_B} \right)}$$





In un generico istante:

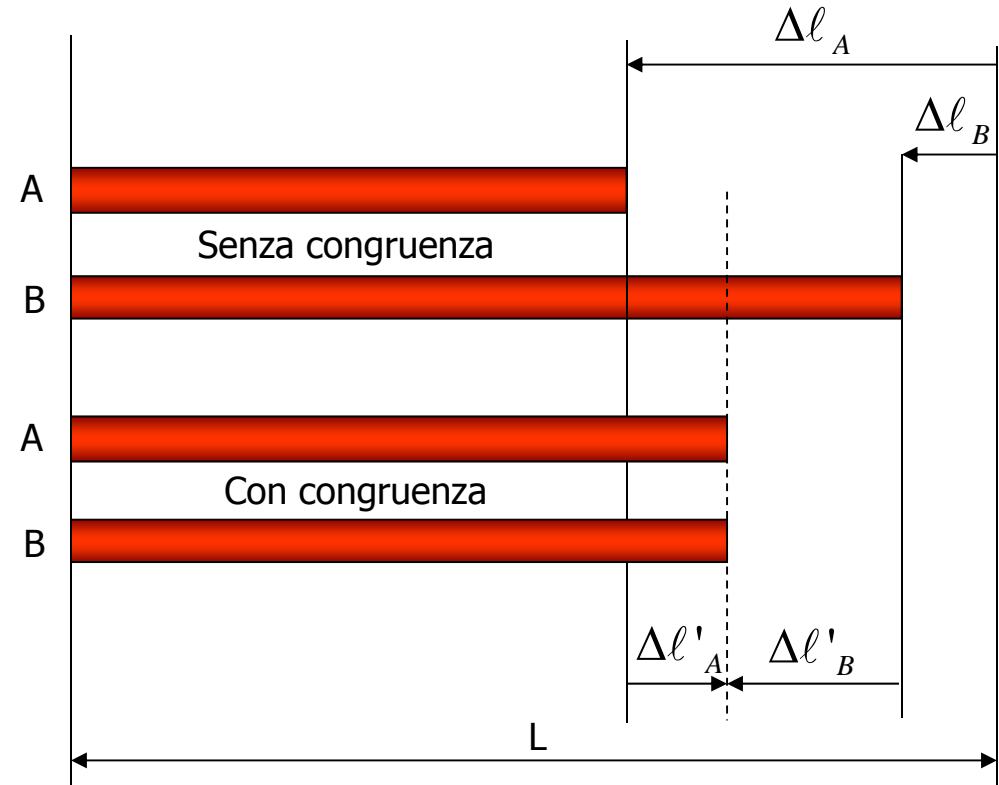
$$\begin{cases} \Delta l_A = \alpha L (T_S - T_A) \\ \Delta l_B = \alpha L (T_S - T_B) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_A = \frac{\Delta l'_A}{L} = \frac{\sigma_A}{E} \\ \varepsilon_B = \frac{\Delta l'_B}{L} = \frac{\sigma_B}{E} \end{cases}$$

$$\Delta l_A - \Delta l_B = \Delta l'_A + \Delta l'_B$$

$$\alpha L (T_S - T_A) - \alpha L (T_S - T_B) = L \frac{\sigma_A}{E} + L \frac{\sigma_B}{E} \quad \longrightarrow \quad \alpha L (T_B - T_A) = \frac{L}{E} (\sigma_A + \sigma_B)$$

Approssimazione: α , E indipendente dalla temperatura, ipotesi di elasticità

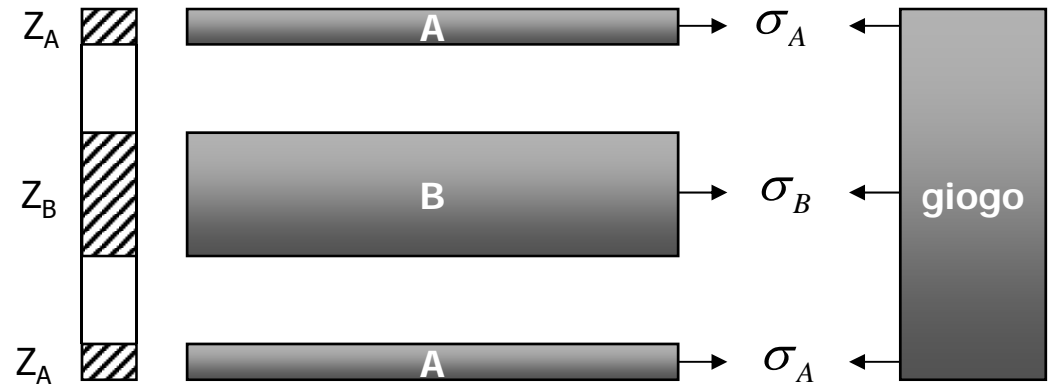




$$E\alpha(T_B - T_A) = (\sigma_A + \sigma_B)$$

Per l'equilibrio delle forze:

$$2 \cdot \sigma_A \cdot Z_A = \sigma_B \cdot Z_B$$



da cui: $\sigma_A = \sigma_B \cdot \frac{Z_B}{2 \cdot Z_A}$ $(\sigma_A + \sigma_B) = \frac{Z_B}{2 \cdot Z_A} \cdot \sigma_B + \sigma_B = \sigma_B \cdot \left(\frac{Z_B + 2 \cdot Z_A}{2 \cdot Z_A} \right)$

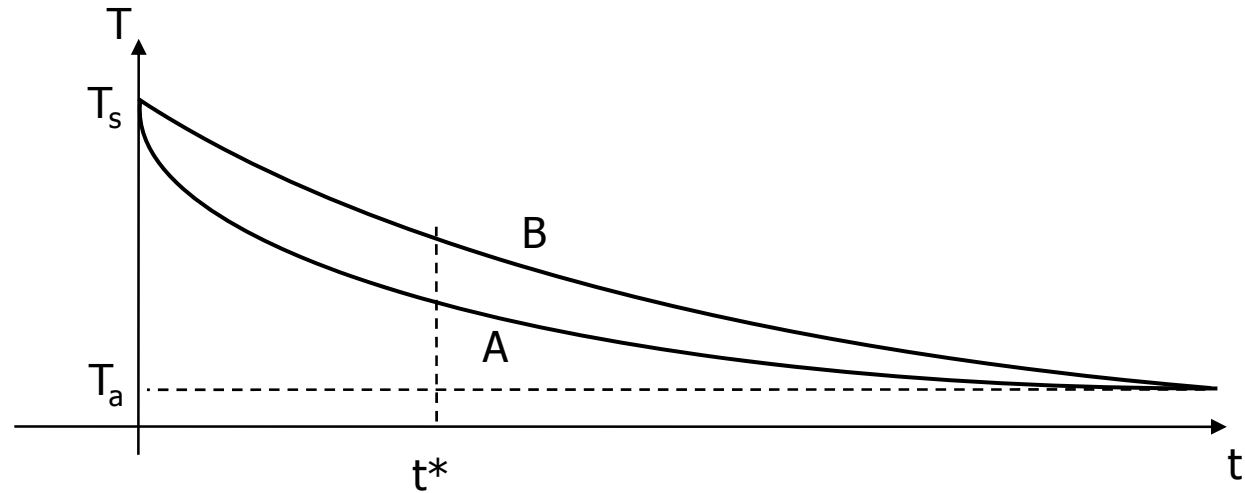
$$\sigma_B = \frac{2 \cdot Z_A}{Z_B + 2 \cdot Z_A} E\alpha(T_B - T_A)$$

$$\sigma_A = \frac{Z_B}{Z_B + 2 \cdot Z_A} E\alpha(T_B - T_A)$$

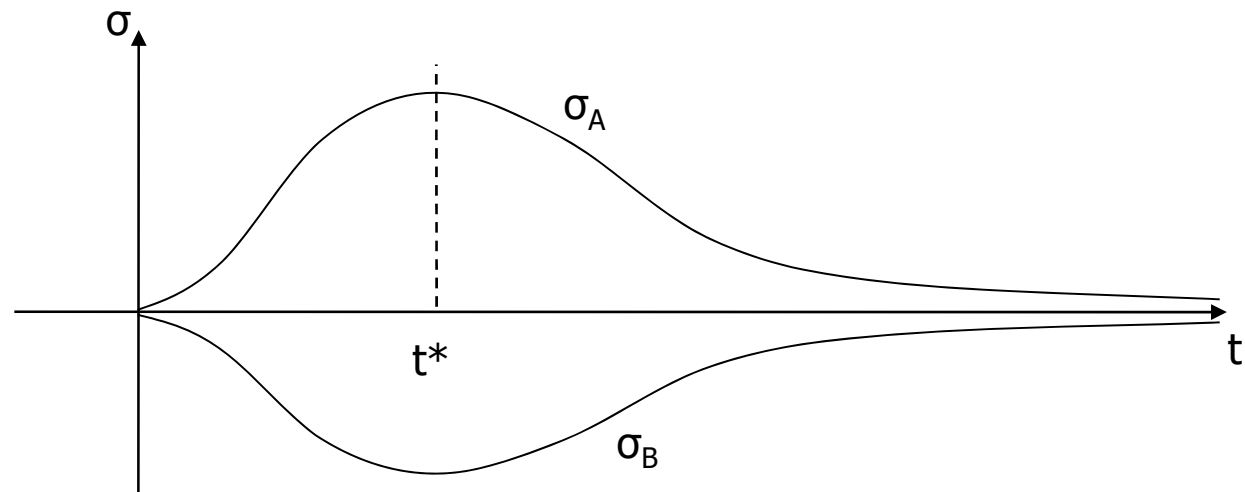
Approssimazione: E indipendente dalla temperatura



Le temperature T_A e T_B vanno secondo curve esponenziali



Le tensioni σ_A e σ_B vanno secondo le curve accanto (circa)





Si ha:

$$Z_A = a^2$$

$$Z_B = a \cdot b$$

Allora:

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_B} = \frac{Z_B}{2 \cdot Z_A} = \frac{b}{2a}$$

se:

$$\frac{b}{a} > 2 \rightarrow \frac{\sigma_A}{\sigma_B} > 1$$

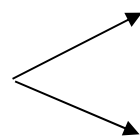
ma:

$$T_B > T_A$$

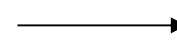
si può avere cedimento di A più freddo ma più sollecitato oppure il cedimento di B, più caldo e meno sollecitato

Supponiamo che alle temperature rispettive, si superi il carico di snervamento in una barra, ad esempio A (in trazione)

si possono avere due casi:

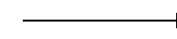


$$\sigma_A > \sigma_r$$



Rottura del pezzo

$$\sigma_r > \sigma_A > \sigma_s$$

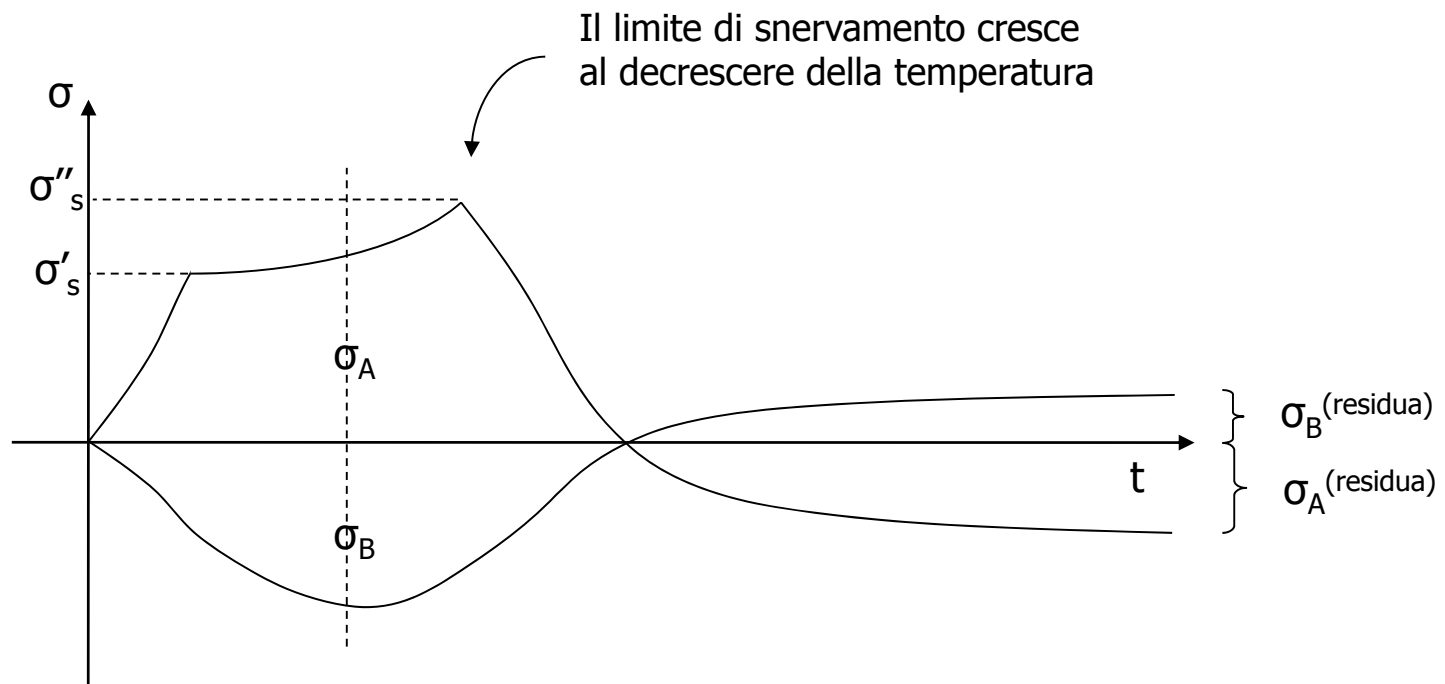


Tensione residua



nel secondo caso, la lunghezza di A al t^* è maggiore del previsto, quindi, aspettandosi ancora un certo ΔT fino alla T_a e quindi un corrispondente Δl , a T_a la barra A sarà più lunga del previsto. Ciò non è possibile per la presenza dei gioghi e quindi necessariamente A sarà sollecitata a compressione. Per l'equilibrio, corrispondentemente, B sarà sollecitata a trazione.

Ovviamente, $\sigma_A^{(residua)} \neq \sigma_B^{(residua)}$





Nella realtà sono diversi i casi in cui si ha rottura o snervamento

Ciò dipende da:

- il materiale ha un comportamento plastico per gran parte del raffreddamento
- la tensione di snervamento cambia sia per la barra A che la B poiché si trovano a temperature sempre differenti

In genere è difficile prevedere se e quale barra subirà snervamento o se addirittura lo subiranno entrambe.

Ad esempio la barra B che si trova sempre ad una temperatura più alta avendo un limite di snervamento più basso potrebbe cedere anche a tensioni più basse e quindi prima della A

Ad esempio la barra A raggiunge lo snervamento che però gradualmente si alza con l'abbassarsi della temperatura più velocemente che per B; quest'ultima, non avendo ancora raggiunto il t^* , si trova in una fase crescente del modulo della tensione raggiungendo anch'essa lo snervamento.



Metodi per ridurre le tensioni di ritiro e residue

- progettazione del prodotto

- processo

- sistema di formatura

- raffreddatori

- coibenti

- design for casting

- trattamenti termici

raccordi
sezioni
moduli termici

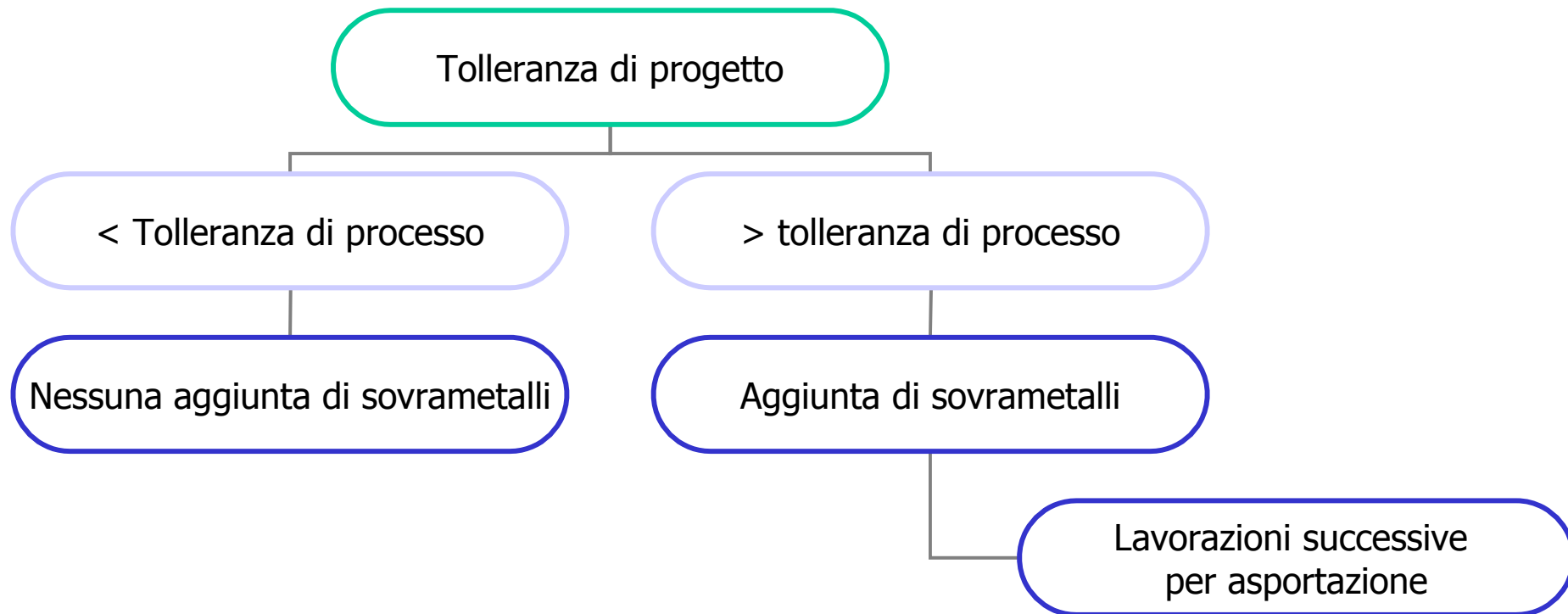
controllo velocità di
raffreddamento e
quindi dei gradienti
di temperatura

ricottura
normalizzazione



Tolleranze di processo

In base alle tolleranze ottenibili dal processo è possibile stabilire se è necessario aggiungere materiale per ottenere le tolleranze richieste successivamente per asportazione di materiale





Nella tabella **UNI 6225-73** sono precisate le tolleranze dimensionali e i sovrametalli per la lavorazione meccanica dei getti di acciaio non legato (UNI 3150-68), colati in sabbia.
Le tolleranze sono bilaterali (disposte a cavallo della linea dello zero).

Tolleranze dimensionali

Massima dimensione del getto grezzo (mm)	Dimensione nominale (mm)																										
	fino a 80 mm			oltre 80 fino a 180			oltre 180 fino a 315			oltre 315 fino a 500			oltre 500 fino a 800			oltre 800 fino a 1250			oltre 1250 fino a 1600			oltre 1600 fino a 2500					
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C			
fino a 120	6	4	3	7	5	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
oltre 120 fino a 500	7	5	4	8	5	5	10	6	6	14	8	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
oltre 500 fino a 1250	8	5	5	9	6	6	11	7	7	15	9	8	18	11	9	20	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
oltre 1250 fino a 2500	9	6	6	10	7	7	12	8	8	16	10	9	20	12	10	22	14	11	25	15	-	30	17	-	-	-	-

si distinguono 3 gradi di precisione:

Grado di precisione	Tolleranza	Numerosità
A	Ampia	Getti singoli
B	Media	Getti ripetuti
C	Stretta	Getti di serie

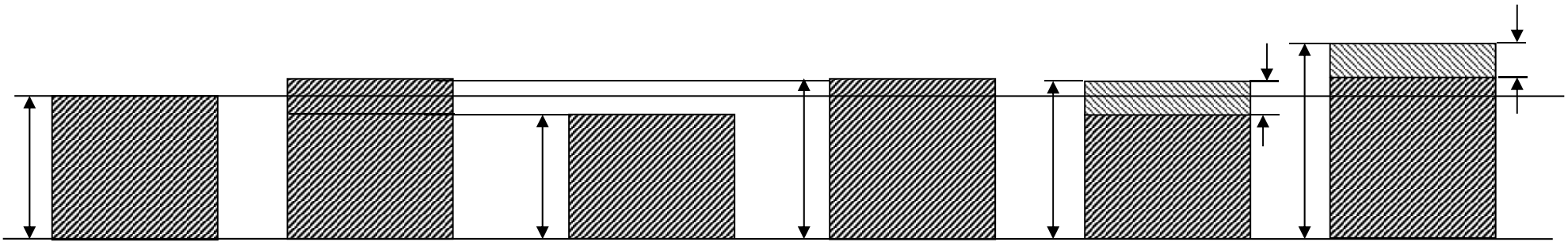


Nel caso in cui le tolleranze ottenibili sono più larghe di quelle richieste occorre aggiungere sovrametallo in dipendenza delle dimensioni (massime e nominali) e della tipologia del getto

Sovrametalli

Massima dimensione del getto grezzo (mm)	Dimensione nominale (mm)																							
	fino a 80 mm			oltre 80 fino a 180			oltre 180 fino a 315			oltre 315 fino a 500			oltre 500 fino a 800			oltre 800 fino a 1250			oltre 1250 fino a 1600			oltre 1600 fino a 2500		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C			
fino a 120	6	3	4	7	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
oltre 120 fino a 500	6	4	5	7	5	5	8	6	6	10	7	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
oltre 500 fino a 1250	7	5	5	8	6	6	9	7	7	11	8	8	12	9	8	13	10	-	-	-	-	-	-	-
oltre 1250 fino a 2500	8	7	6	9	7	7	10	9	8	12	10	9	13	10	9	14	12	10	15	13	-	17	14	-

Vale lo stesso discorso nel caso di rugosità ottenibili più scadenti di quelle richieste: occorre aggiungere sovrametallo al fine di permettere mediante lavorazioni successive di produrre le finiture desiderate.



Quota
nominale
del grezzo

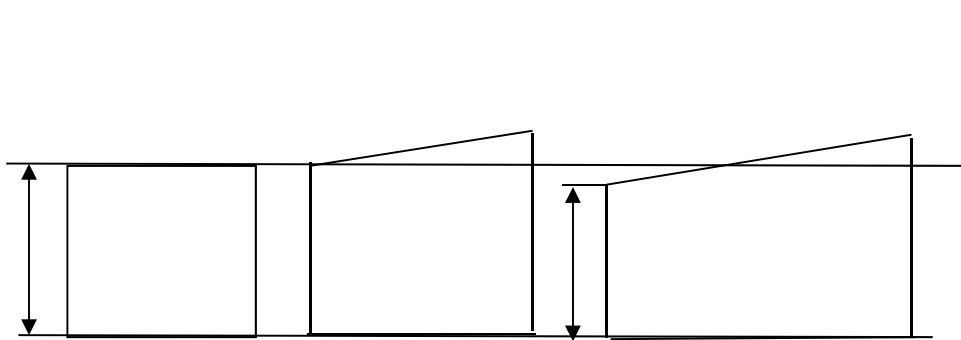
Tolleranza
intrinseca
del processo

Caso 1

Caso 2

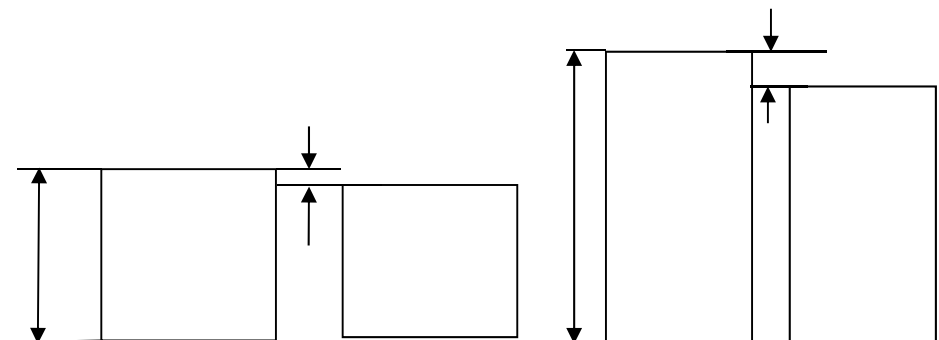
Caso 1 con
sovrametallo

Caso 2 con
sovrametallo



Effetto dimensioni massime

errore = 1° di inclinazione



Effetto della dimensione da lavorare

errore = 1% sul ritiro



Sovrametallo (considerazioni)

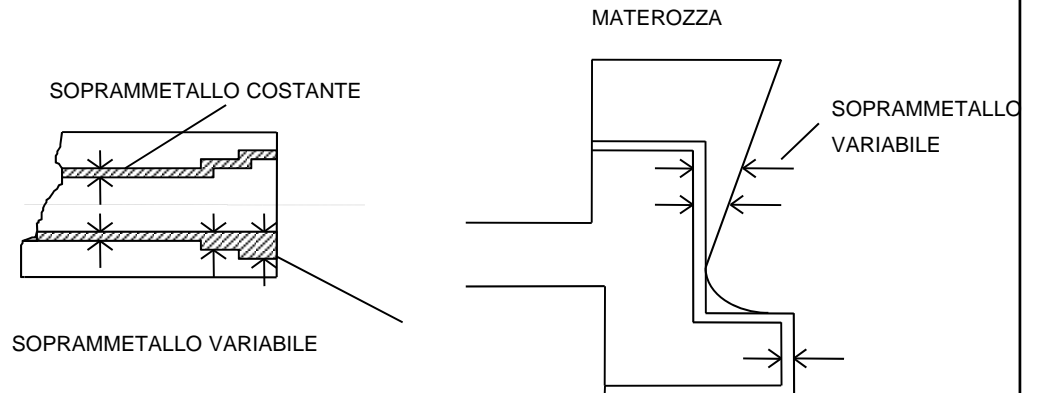
sovrammetallo
aumenta - all'aumentare delle dimensioni
- all'aumentare della precisione richiesta

diminuisce
- fusioni di serie

costante

variabile

- per semplificare l' anima
- favorire la solidificazione direzionale



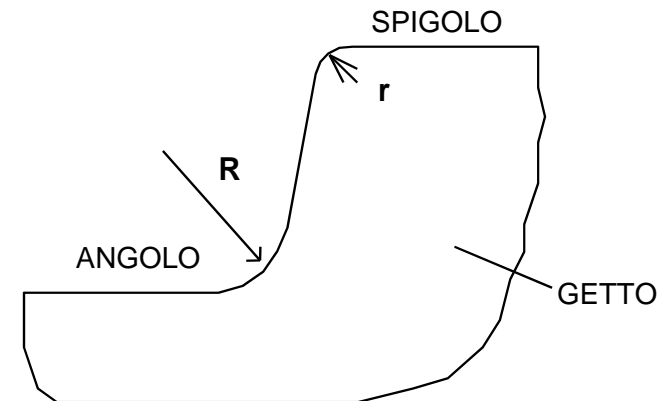
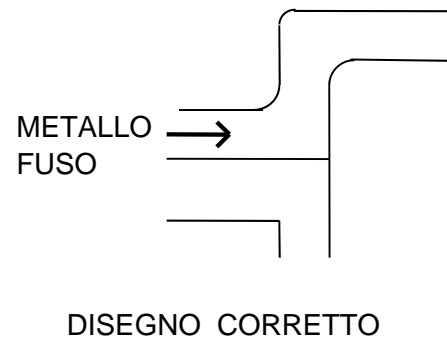
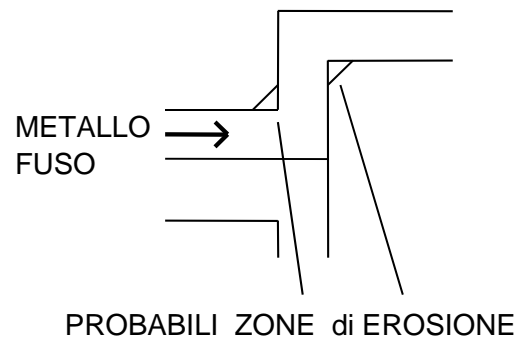


Raggi di raccordo

per ridurre erosione della forma durante la colata

per ridurre rischi di rottura durante la solidificazione

per ridurre concentrazioni di tensioni durante l'uso



Diverse condizioni per angoli e spigoli



Ritiro

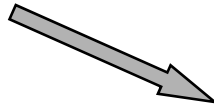
T_{fs} → T_a

$$L_f = L_i (1 - \alpha \Delta T)$$

La forma ha modificato le sue dimensioni

Il metallo si ritira in modo dipendente anche dalla configurazione geometrica

Le anime funzionano da vincoli



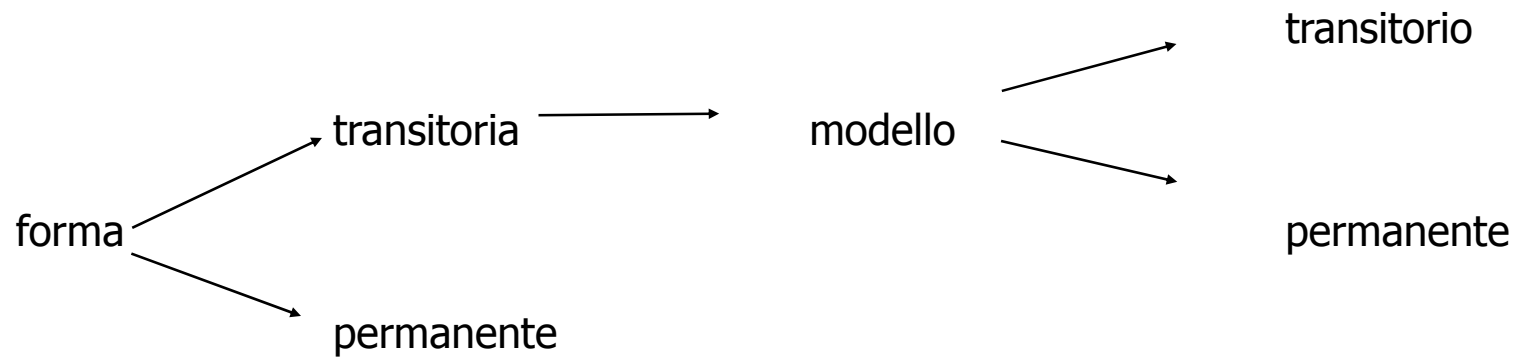
Ritiri lineari per getti colati in sabbia (valori indicativi)

MATERIALI	RITIRO (%)		
	Getti piccoli	Getti medi	Getti grandi
GHISE GRIGIE	1	0.85	0.7
GHISE MALLEABILI	1.4	1	0.75
GHISE LEGATE	1.3	1.05	0.35
ACCIAIO	2	1.5	1.2
ALLUMINIO e LEGHE	1.6	1.4	1.3
BRONZI	1.4	1.2	1.2
OTTONI	1.8	1.6	1.4
LEGHE di MAGNESIO	1.4	1.3	1.1



PROGETTAZIONE DELLA FORMA

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

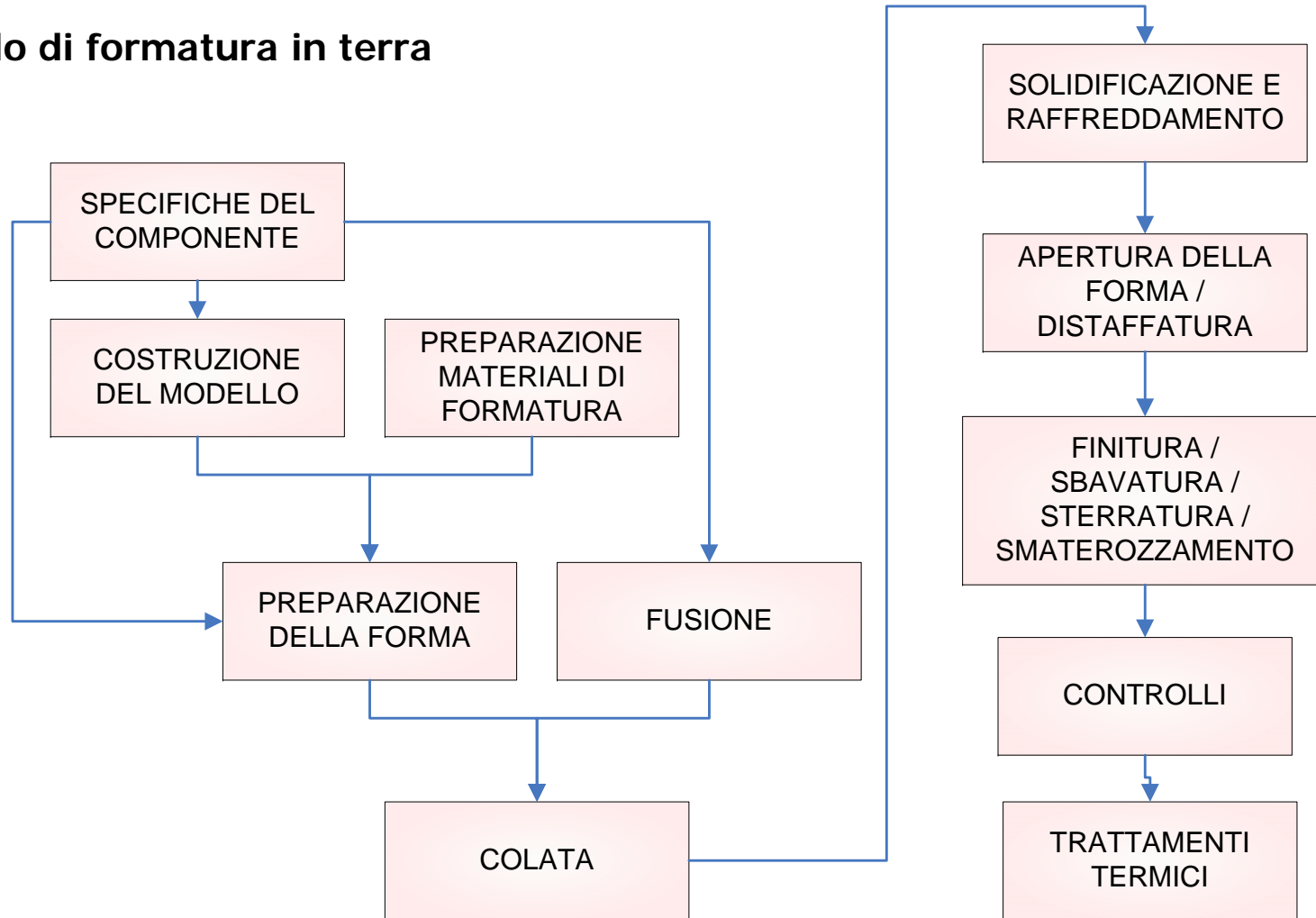


forme transitorie - possono essere distrutte dopo la colata → materiale: terra di fonderia
- devono permettere l'estrazione del modello → piano di separazione

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

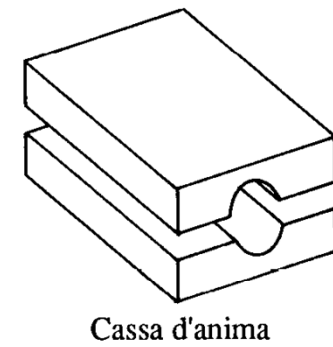
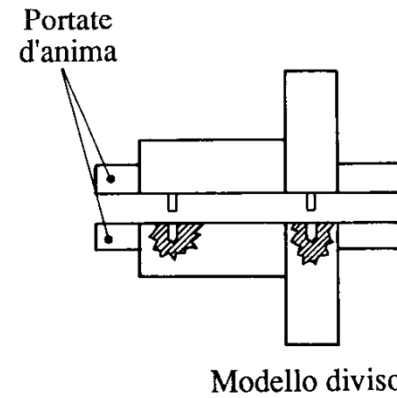
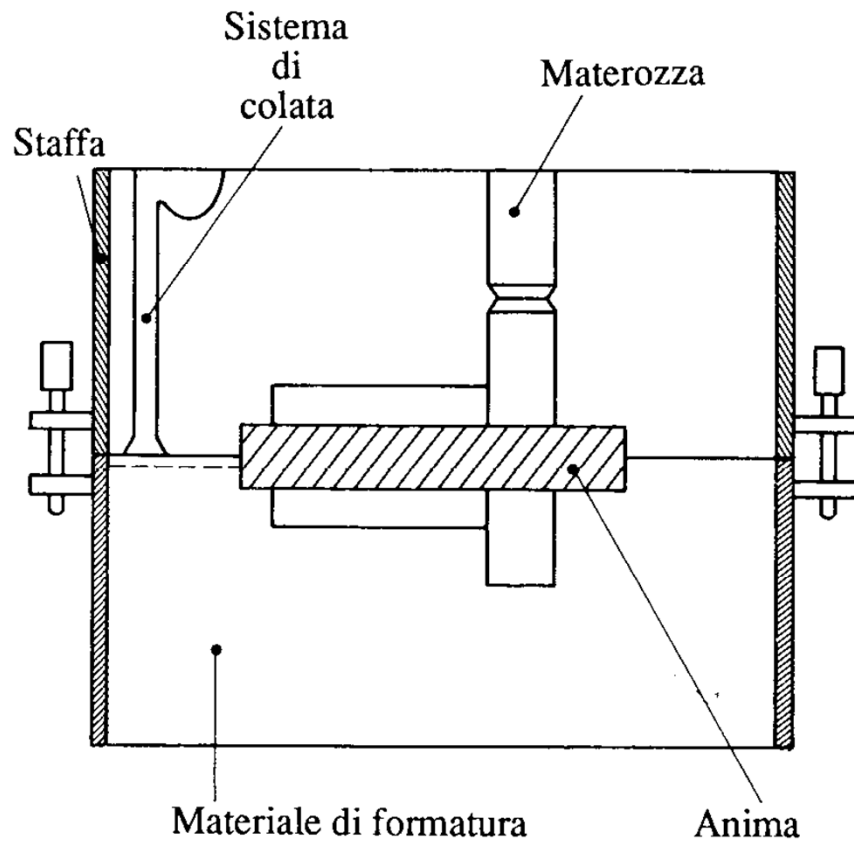


Ciclo di formatura in terra





Forma e modello



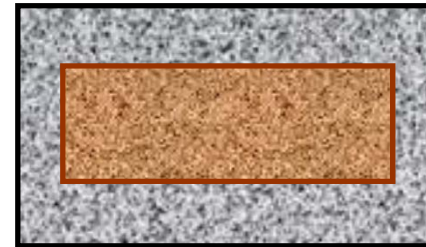


Scelta del piano di separazione

modello
dell'oggetto
da produrre

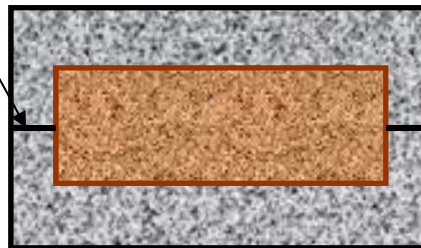


modello all'interno della staffa



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

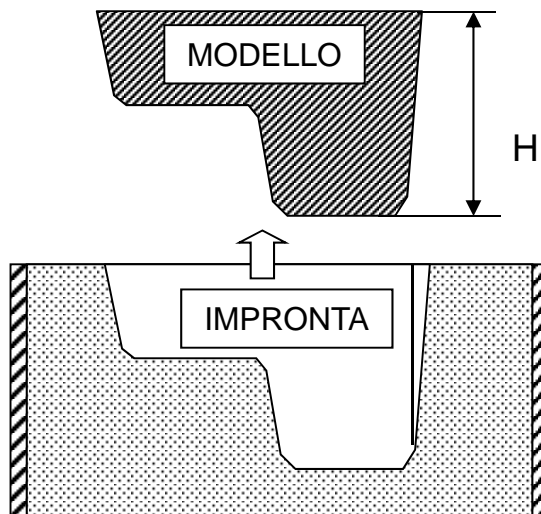
piano di separazione delle staffe



Angoli di sformo

VALORI DELLO SFORMO s in mm e in %
dell' ANGOLO di SFORMO β

per permettere
estrazione del modello



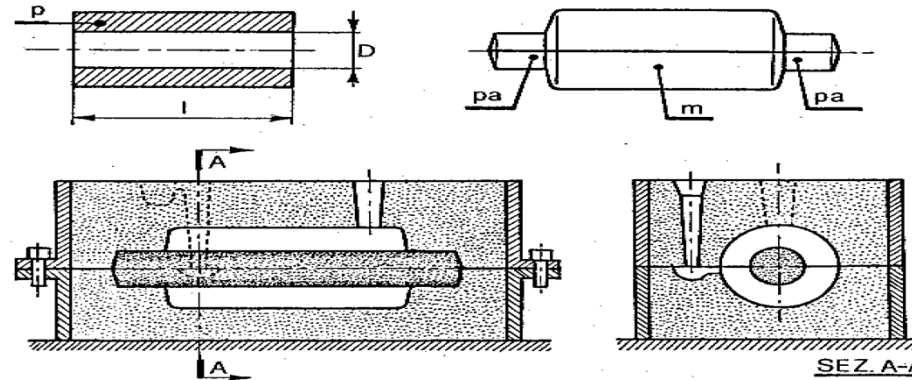
ALTEZZA del MODELLO (mm)	SFORMO		Angolo di sformo β
	s (mm)	(%)	
fino a 40	0.5	1.25	1'30"
40 - 59	0.75	1.8 - 1.2	1'
60 - 119	1	1.7 - 0.8	40"
120 - 159	1.5	1.7 - 0.8	40"
160 - 199	1.75	1.1 - 0.9	40"
200 - 249	2	1.0 - 0.8	30"
250 - 299	2.5	1.0 - 0.8	30"
300 - 399	3	1.0 - 0.75	30"
400 - 499	3.5	0.9 - 0.8	30"
≥ 500	4	≤ 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 sformatura dovrà essere fatta con vibrator e con guide o, meglio, su macchine a sformare.

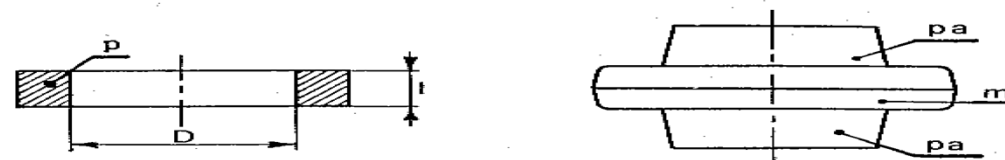
Il modello deve essere modificato per una necessità tecnologica



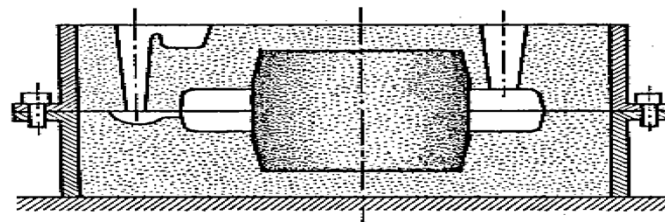
Disposizione dell'impronta nella forma



$L/D \gg 1$



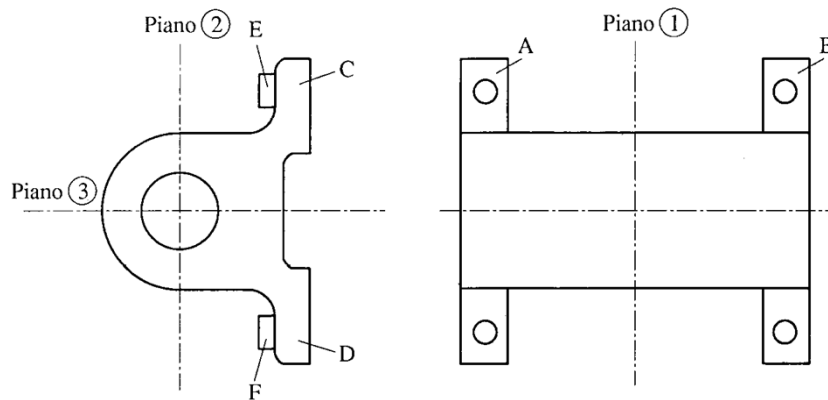
$L/D \ll 1$



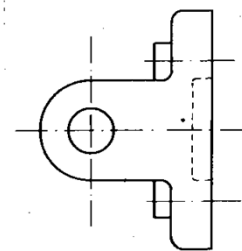


Eliminazione sottosquadri

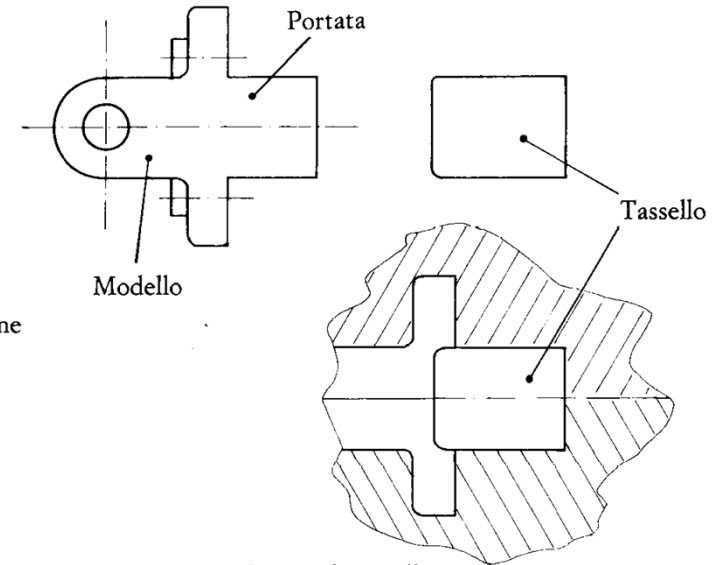
problema



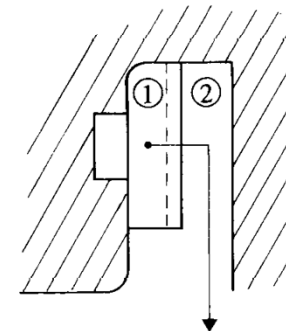
soluzioni



Soluzione a: Formaggele alla francese ed eliminazione parte tratteggiata



Soluzione b: Uso di tasselli



Soluzione c: Modello scomponibile in 1 e 2

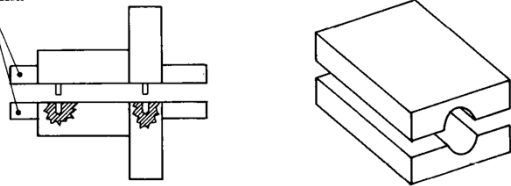
Scelta del piano di divisione per l'eliminazione dei sottosquadri: il piano 1 trova il sottosquadro in A e B, il piano 2 trova il sottosquadro in C e D, il piano 3 trova il sottosquadro in E, C, D, F.

Direzione di estrazione di 1

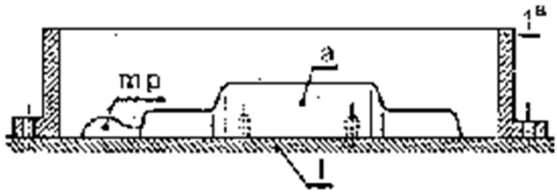


Preparazione della forma

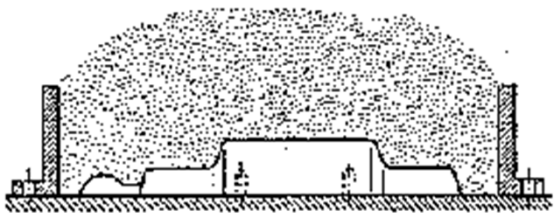
Portate
d'anima



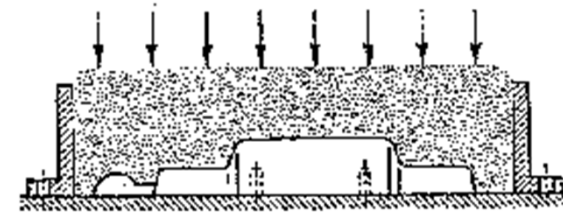
0: preparazione del modello



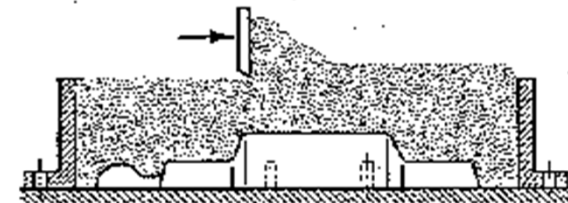
1. Semimodello con i fori di riferimento appoggiato su un piano



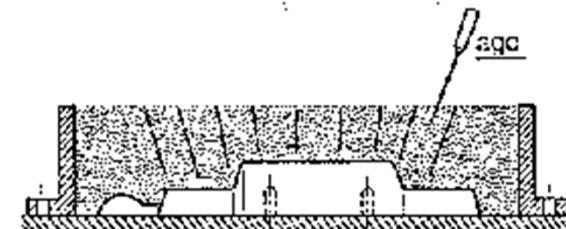
2. Riempimento



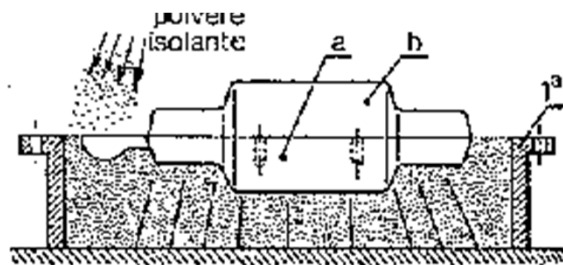
3. Compressione



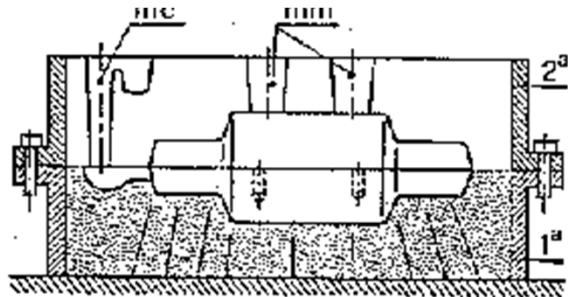
4. Eliminazione terra in eccesso



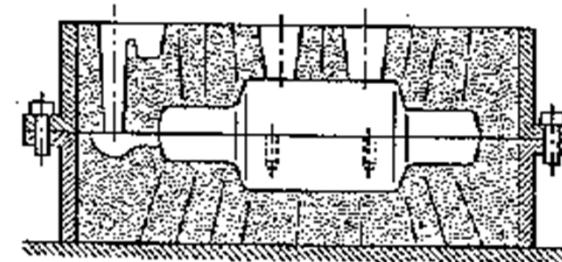
5. Realizzazione tirate d'aria



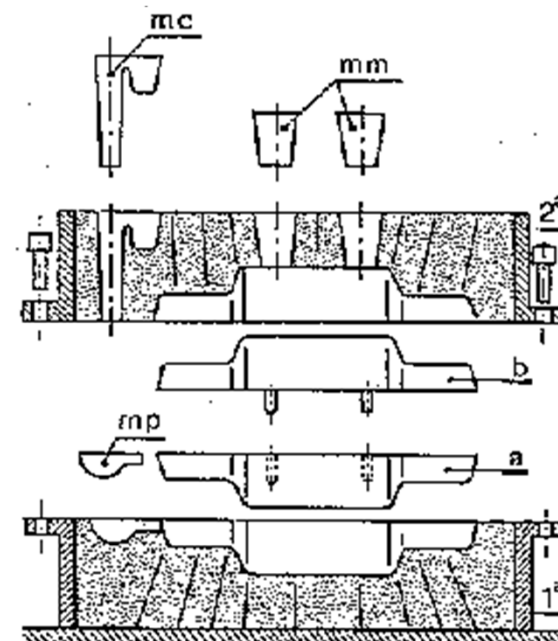
6. Staffa rovesciata, applicazione seconda parte del modello, polvere di carbone (distaccante).



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



8. Riempimento, compressione, tirate d'aria

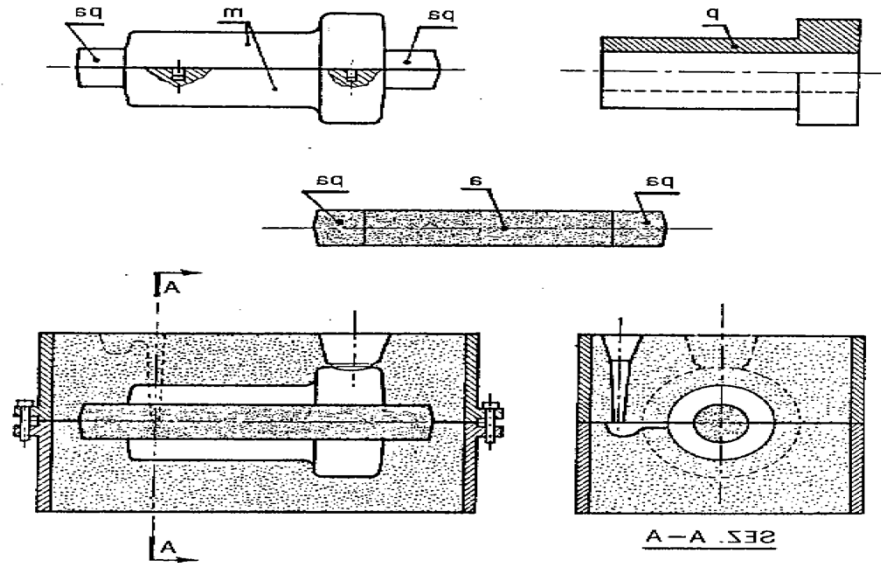


9. Separazione staffe, estrazione modello, ramolaggio anime, ricomposizione

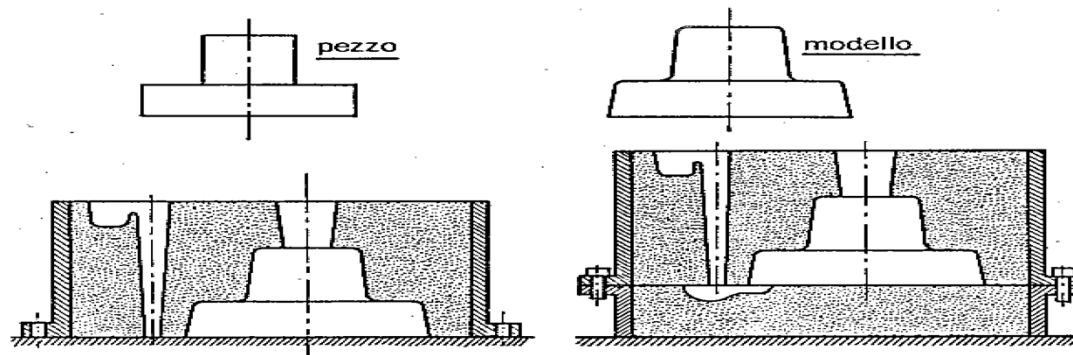


Esempi di forme allestite

Pezzo forato

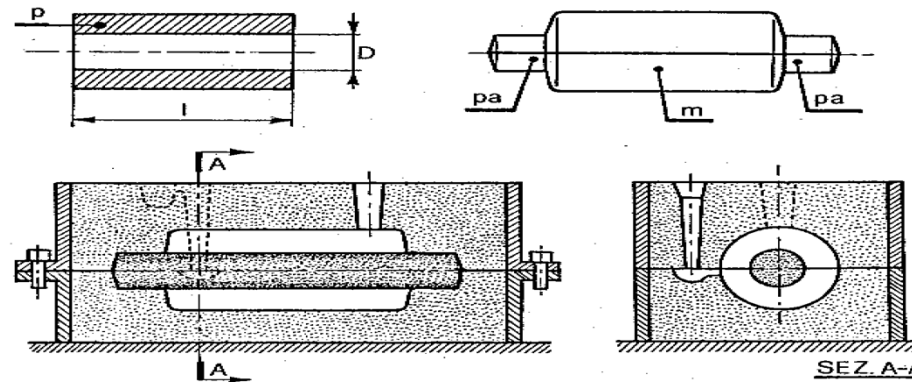


Pezzo con una superficie piana





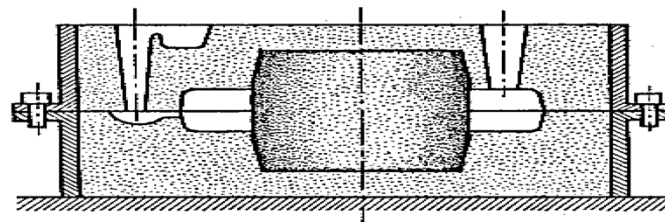
Disposizione dell'impronta nella forma



$L/D \gg 1$

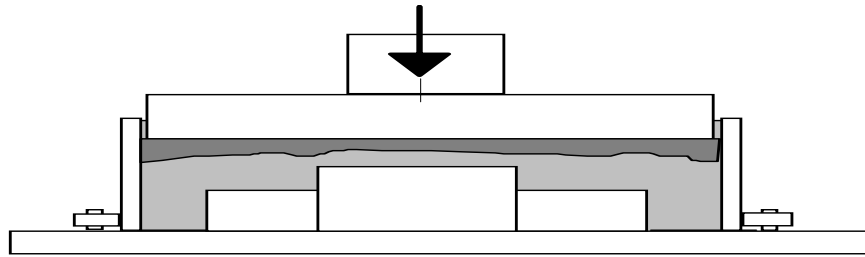


$L/D \ll 1$

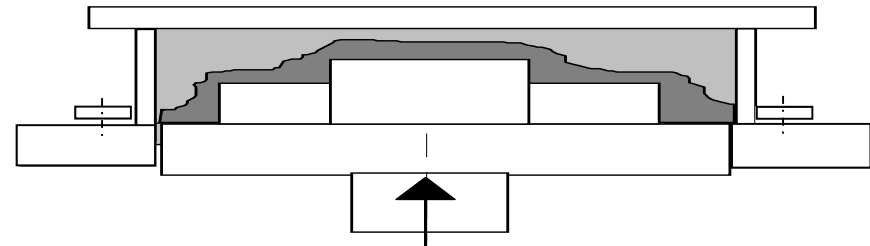




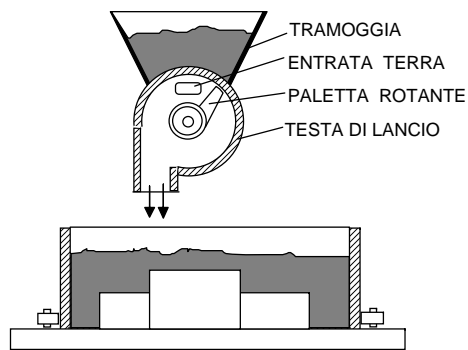
Macchine per formatura



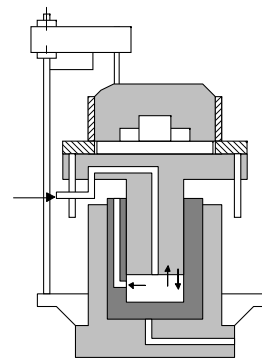
FORMATURA DALL' ALTO



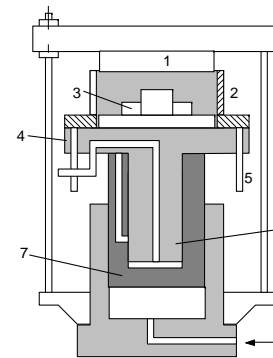
FORMATURA DAL BASSO



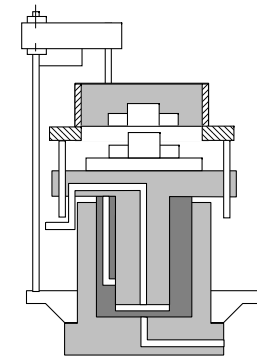
FORMATURA A LANCIO CENTRIFUGO



SCOSSA



COMPRESIONE



SFORMATURA

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



Materiali per la formatura in terra

Caratteristiche richieste

- 1 plasticità (scorrevolezza)
- 2 coesione
- 3 refrattarietà
- 4 permeabilità
- 5 sgretolabilità

- Sabbia silicea (SiO_2)
- argilla (soprattutto bentonite)
- acqua (ha il compito di conferire potere legante all'argilla)



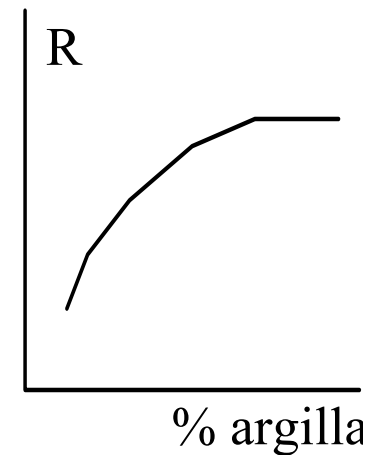
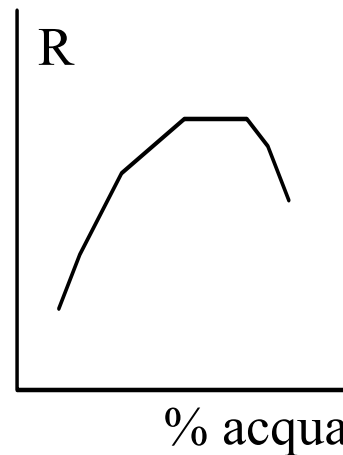
grani tondeggianti
diametro uniforme



grani grossi e piccoli
- porosità
+ resistenza



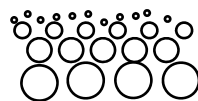
grani spigolosi
+ legante
+ resistenza
- refrattarietà





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	
Indice di finezza			4096 / 87.2 47		



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

+

forma del grano

+

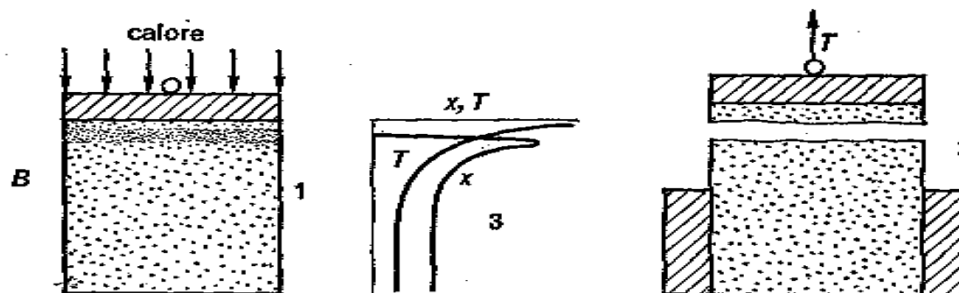
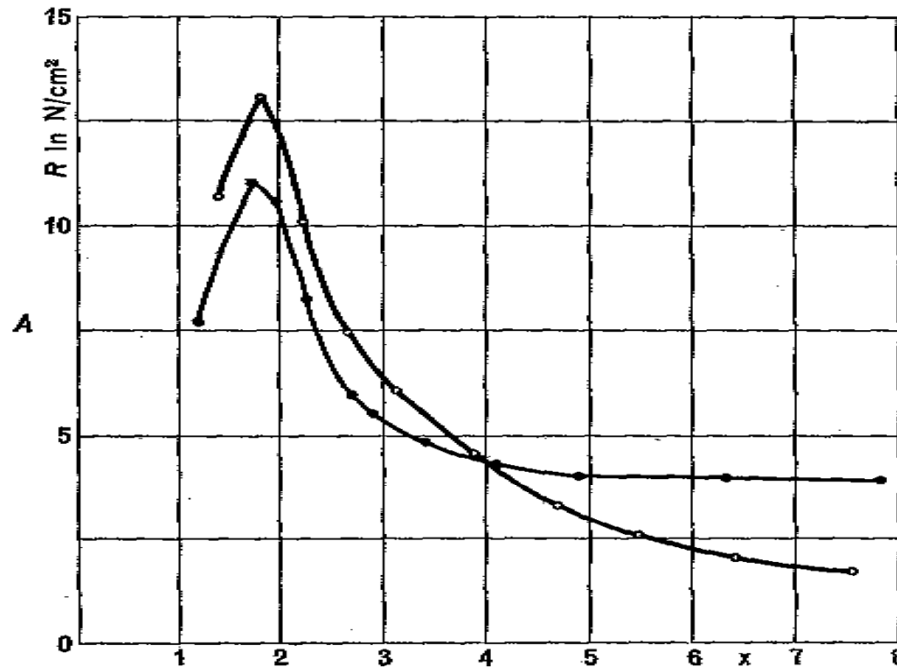
distribuzione granulometrica



finitura superficiale



Influenza
dell'evaporazione
dell'acqua
superficiale e
condensazione
negli strati più
profondi





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

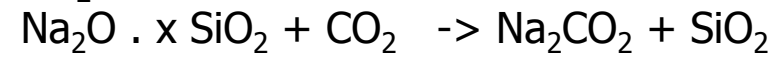


indurimento

T_a

aria

CO_2



forno

campi alta frequenza

a caldo 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

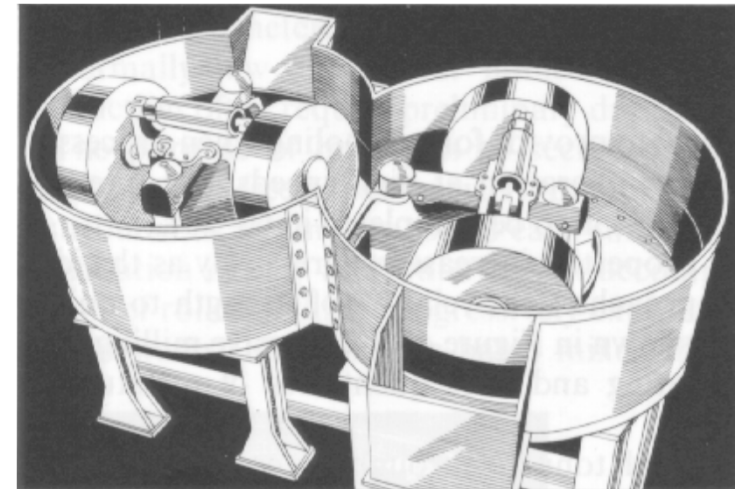
sabbia nuova

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 CaC_2 che reagisce con
l'acqua provocando un aumento di pressione.

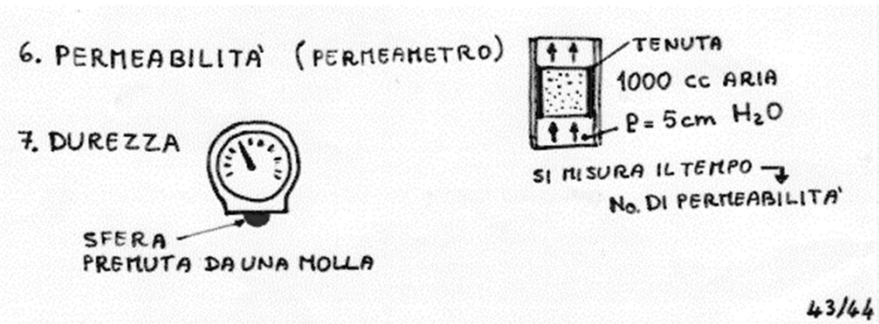
4. Prove meccaniche



IMPORTANTE: COMPATTAZIONE UNIFORME !

5. COESIONE A VERDE / SECCO

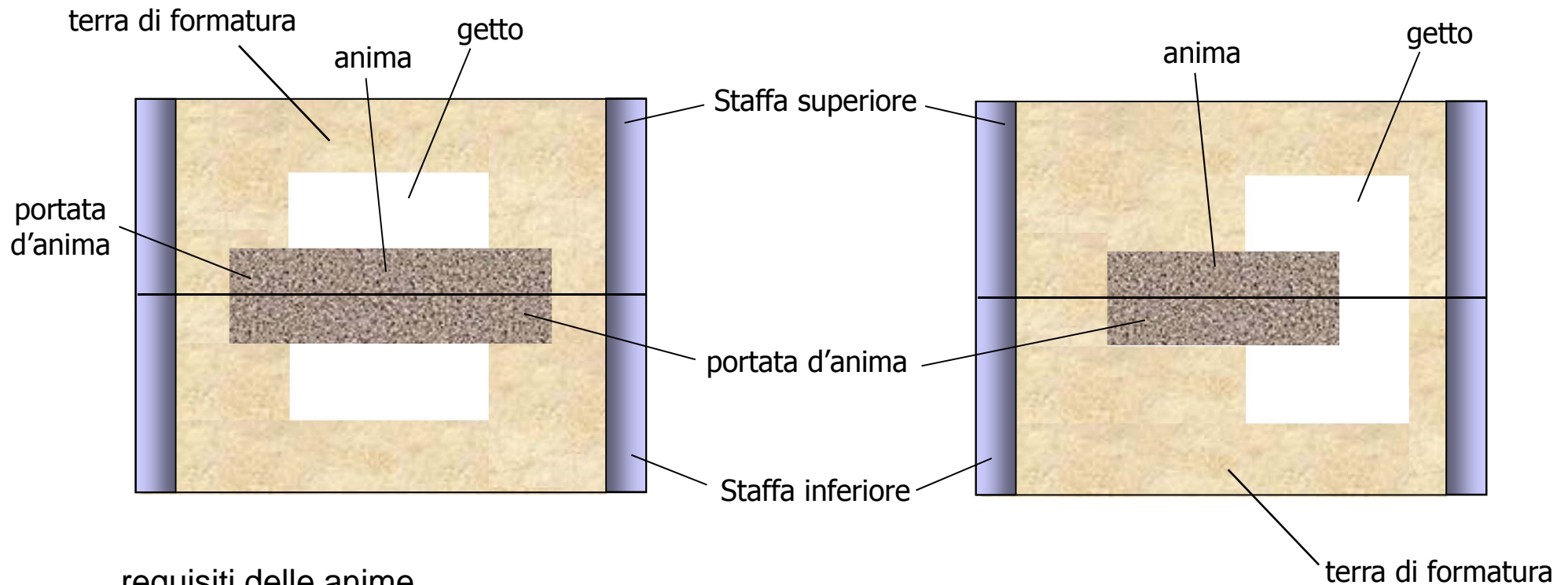
Compressione statica e dinamica mediante "coesimetri"





Anime

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



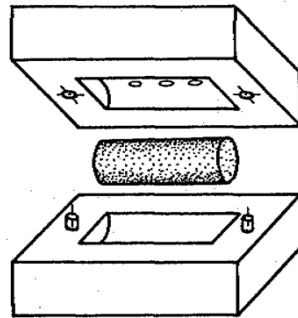
requisiti delle anime

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

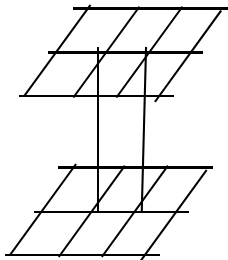
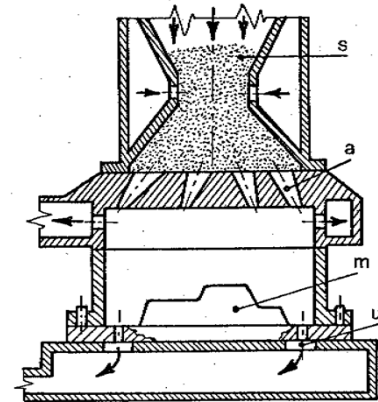


Realizzazione delle anime

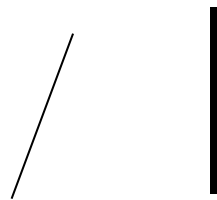
cassa d'anima



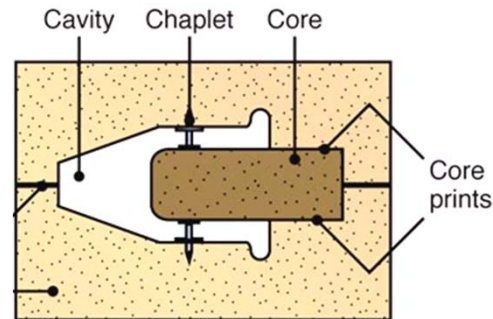
soffiaggio delle anime



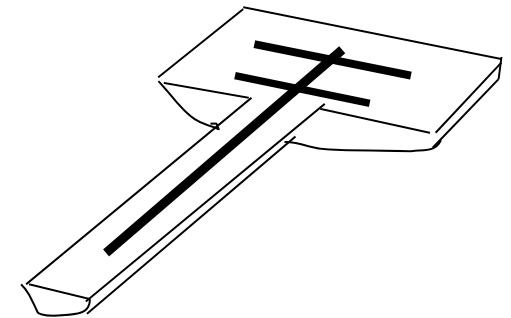
armatura



armature semplici



sostegni

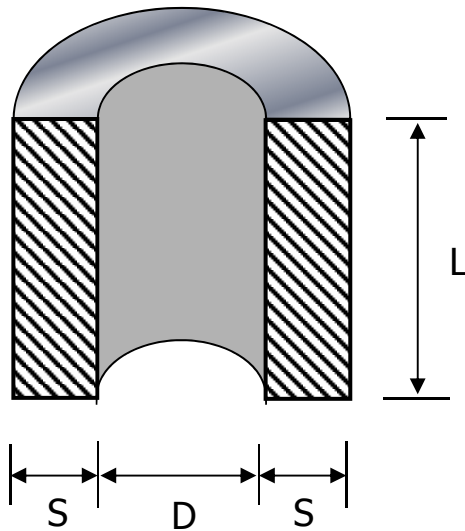


tirate d'aria interne all'anima

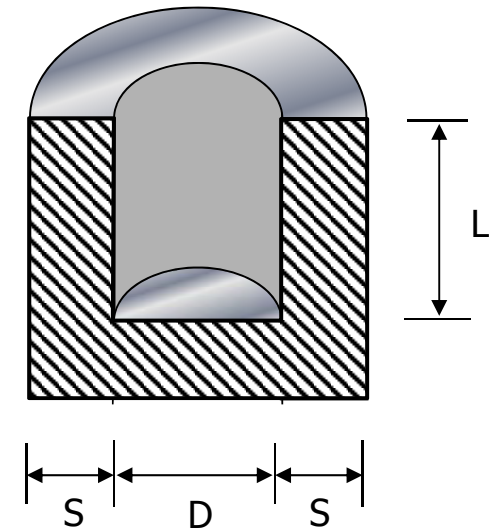


Dimensionamento delle anime

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

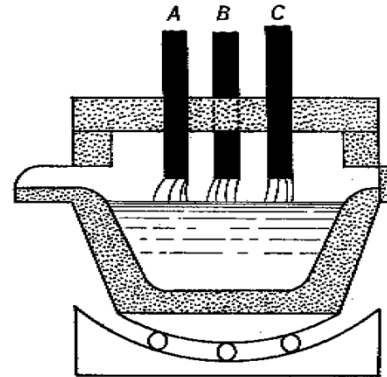


Fig. 161.

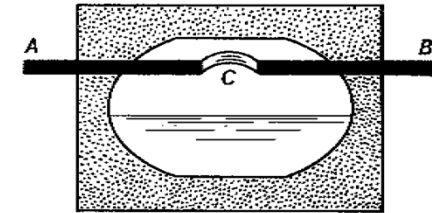


Fig. 162.

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

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

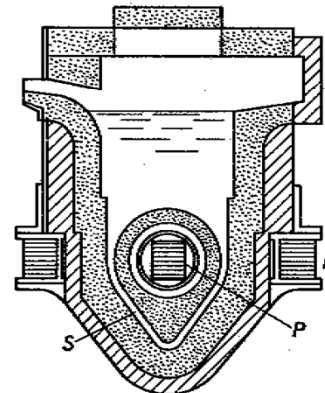


Fig. 163.

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

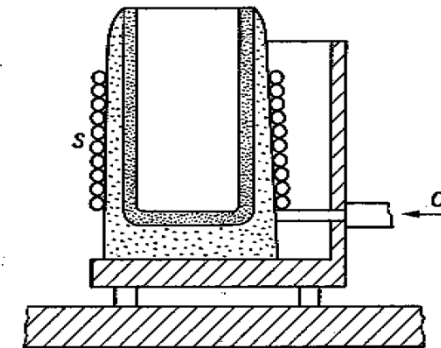
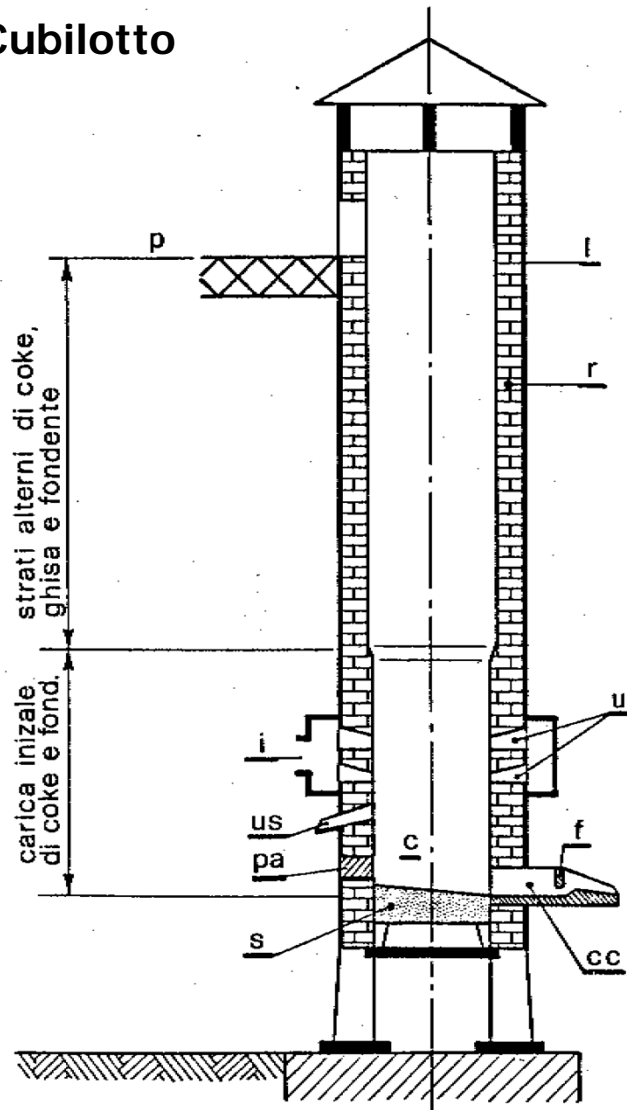


Fig. 164.

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

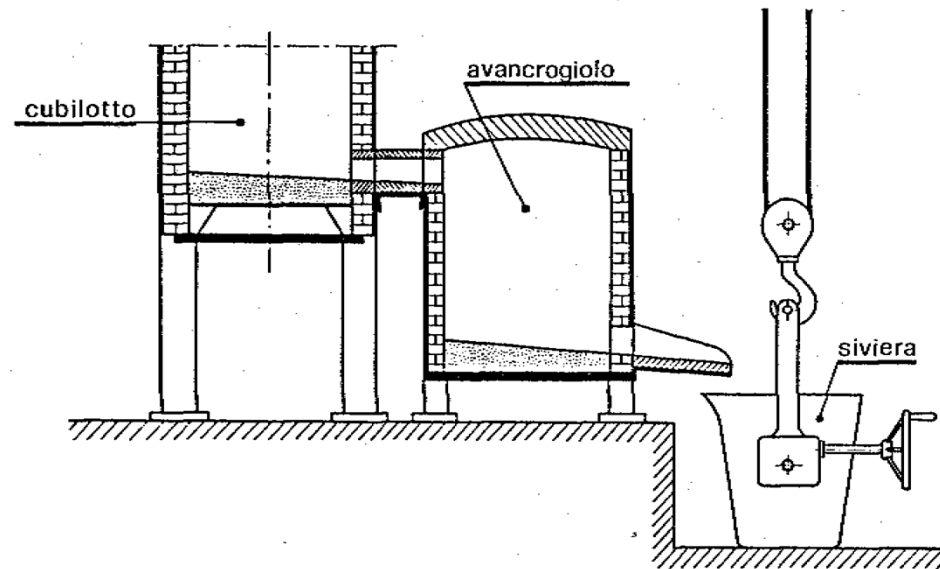


Cubilotto



Carica: strati alterni di

- coke
- fondente
- metallo



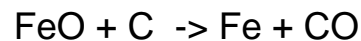
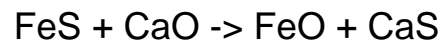


Impiegato per la rifusione di ghise comuni e speciali.

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

Rivestimento:

- acido (mattoni siliciosi a base SiO_2 , 90%) : il più usato, economico, ottima resistenza agli sbalzi termici ;
- basico (dolomite calcinata: ossidi CaO e MgO): favorisce la desolforazione



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

- neutro (a base di magnesite calcinata (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 (CaCO_3), dolomite ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), magnesite (MgCO_3)
 - * fluorite (CaF_2), cenere di soda (Na_2CO_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

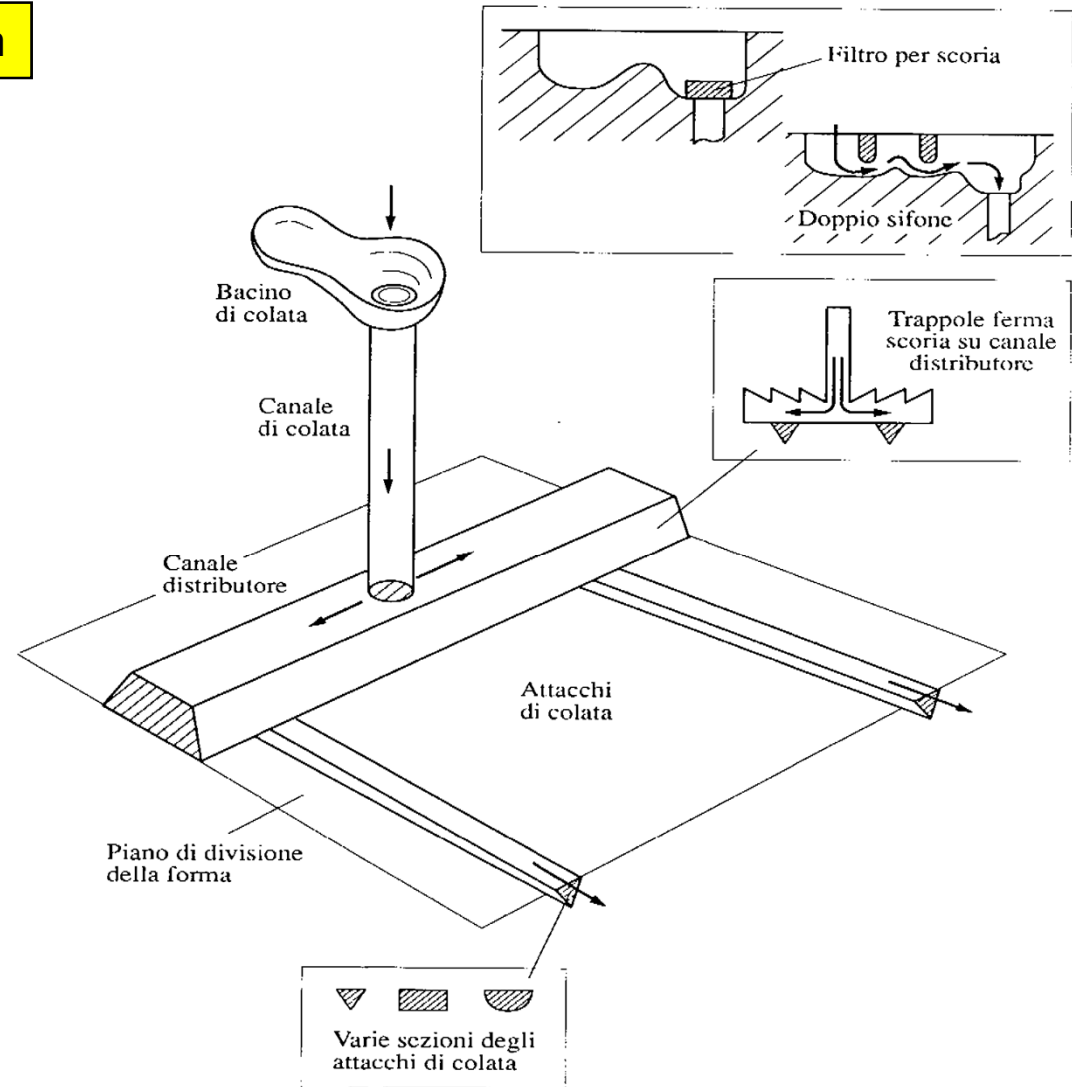
Sistema di colata per fonderia in terra

Sistema principale - bacino di colata

- canale di colata
- canale orizzontale
- attacco di colata

Altri elementi

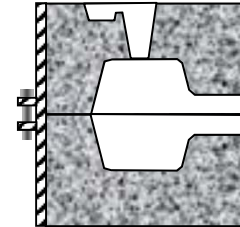
- filtri
- pozzetti
- sfiati
- trappole





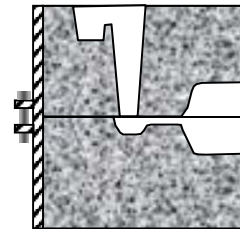
Sistemi di colata

diretta



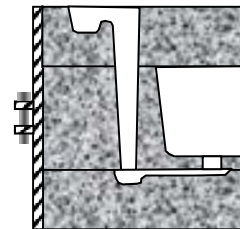
Danni alla forma
Gocce fredde

sul piano di
separazione



Facile realizzazione

con tre staffe



Forma in tre parti
Colata in sorgente

dimensionamento

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

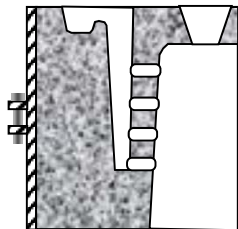
le sezioni dei canali di colata



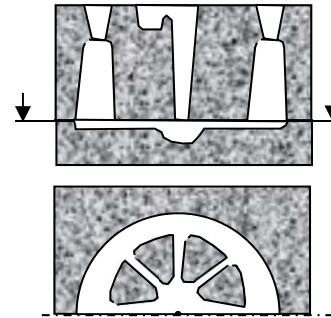
Altri sistemi di colata



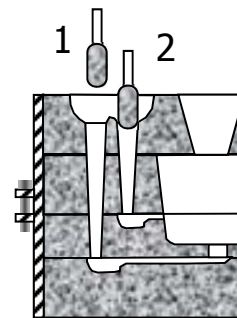
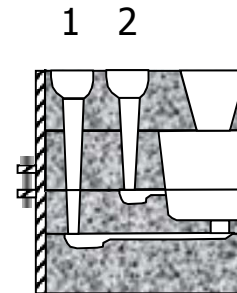
Colata a pioggia
Getti larghi e bassi



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

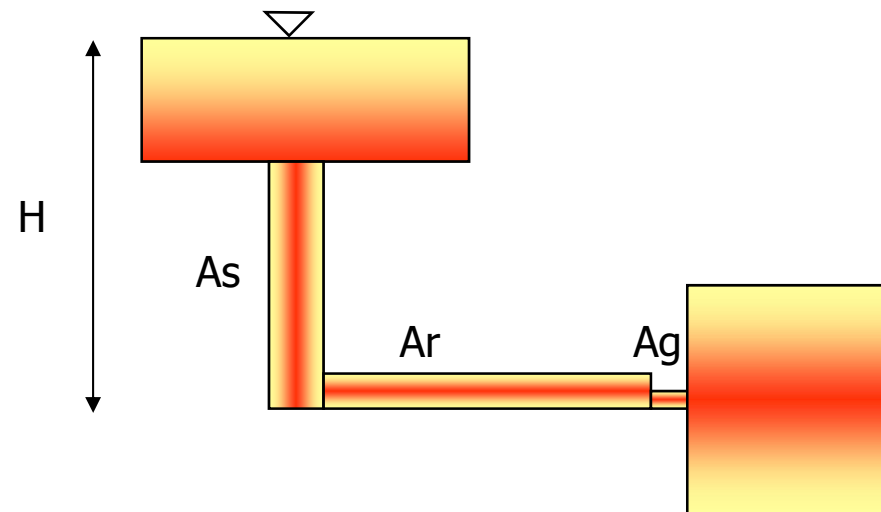
A_{str} = sezione di strozzatura =
conversione energia potenziale
in energia cinetica

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

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

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

- volume del getto
- tempo di riempimento





Tempo di riempimento t_r

$$\frac{V_g}{V_g + \text{accessori}}$$

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

(attenzione alle unità di misura)

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

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

$$t_r = \sqrt{V_g}$$

(formula di Dietert per acciai)

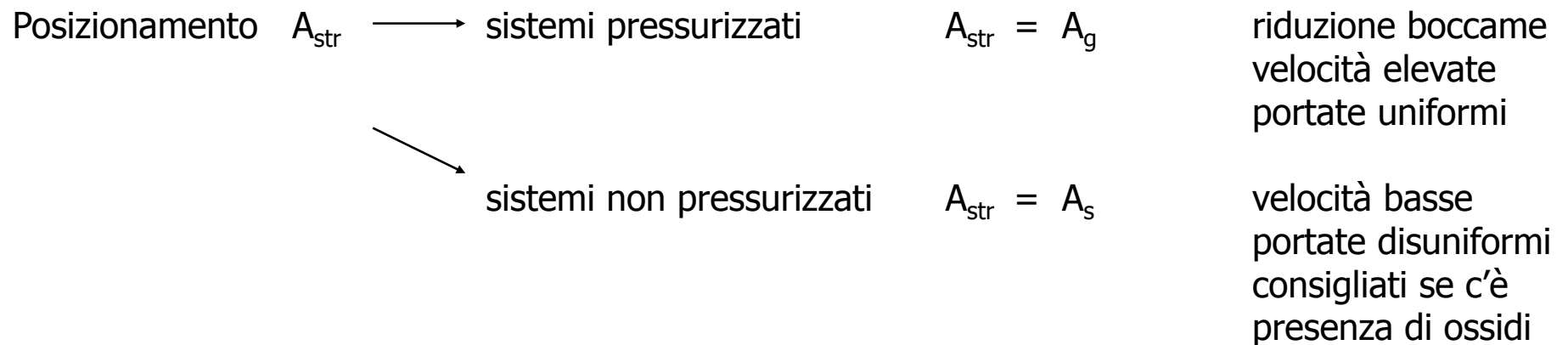


Nota la portata posso calcolare la sezione A_{str}

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

Verificare che:

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





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	:	$\sqrt{\frac{H}{2}}$:	$\sqrt{\frac{H}{2}}$

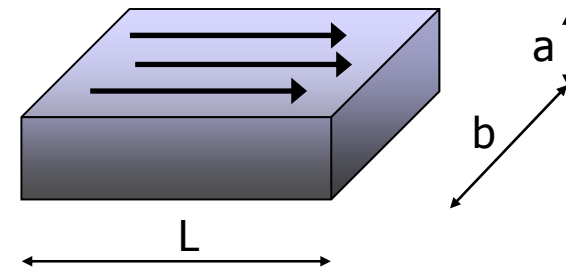
[H] dm

Attacchi di colata (sezione rettangolare)

$$b \geq 4a$$

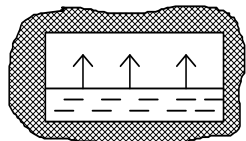
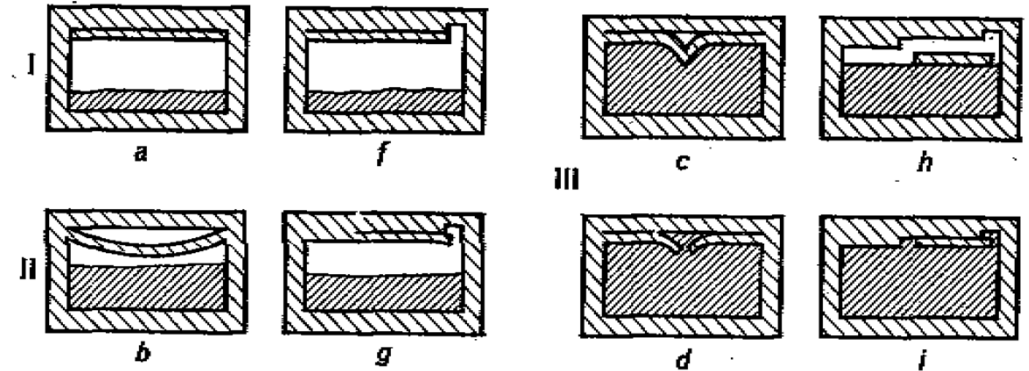
$$L \approx b$$

altre sezioni

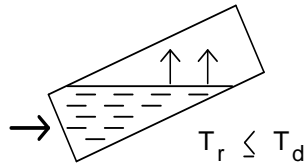




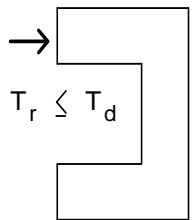
Meccanismi di danneggiamento
della forma per irraggiamento



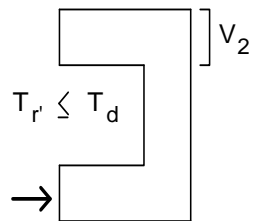
$$T_r \leq T_d$$



$$T_r \leq T_d$$



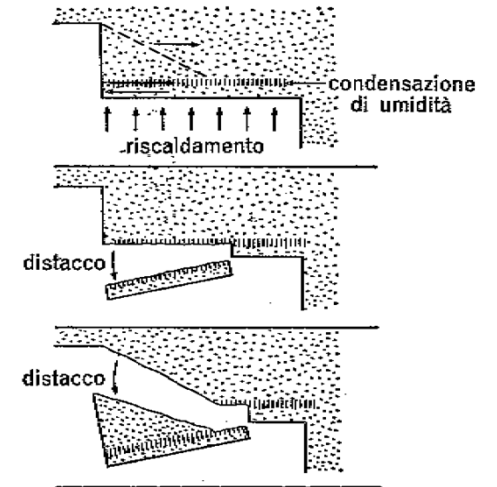
$$T_r \leq T_d$$



$$T_r \leq T_d$$

$$T_r = \text{tempo di riempimento} \cdot V_2$$

Riempimento di getti
di forma particolare





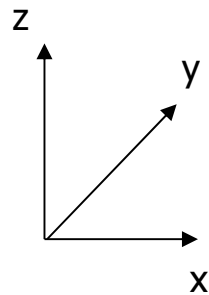
Spinte metallostatiche

Per un liquido si ha:

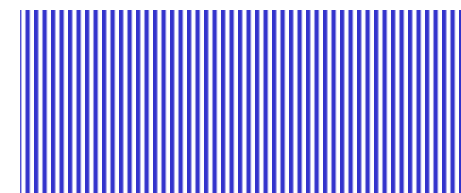
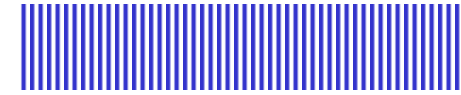
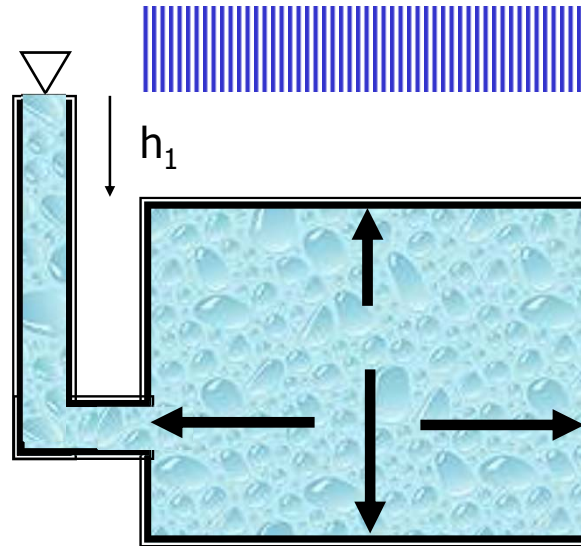
Peso specifico

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

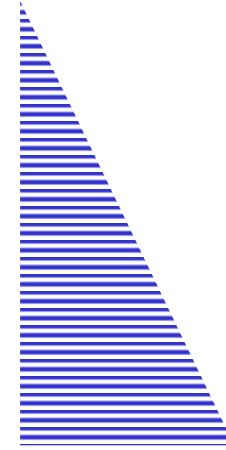
battente



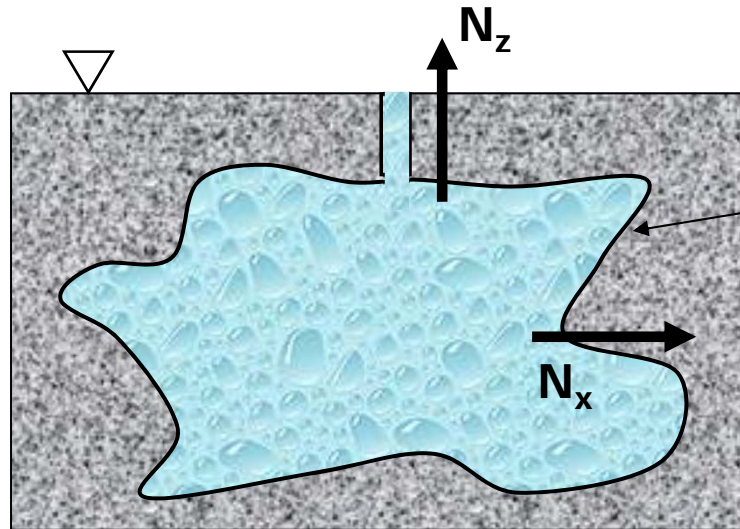
H



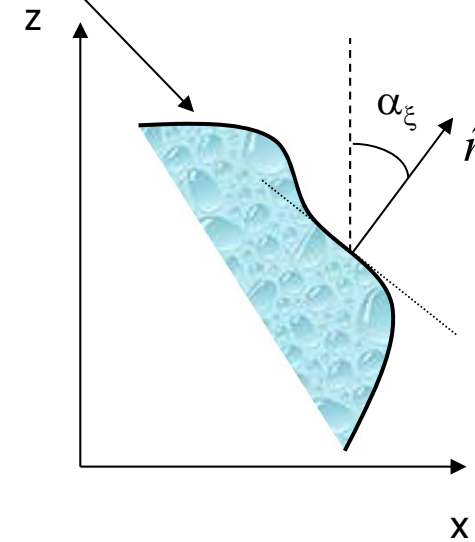
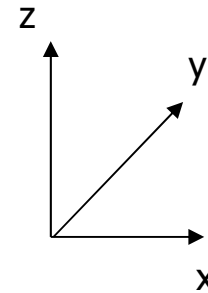
$$p_z = \gamma \cdot h_1$$



$$p_x = \gamma \cdot H$$



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



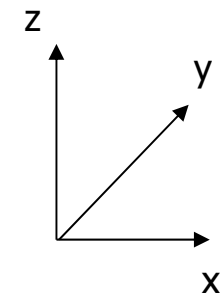
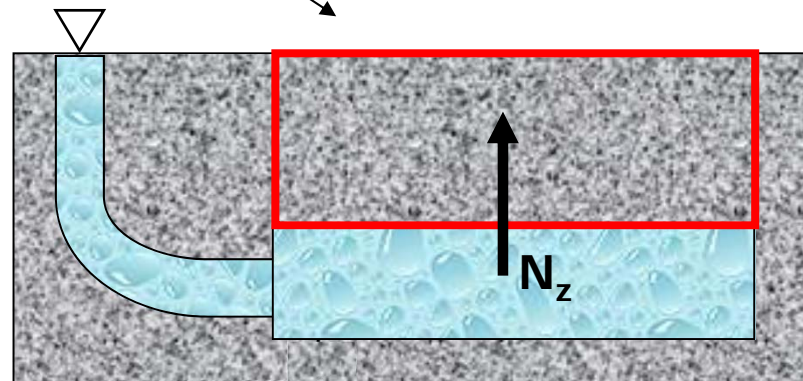
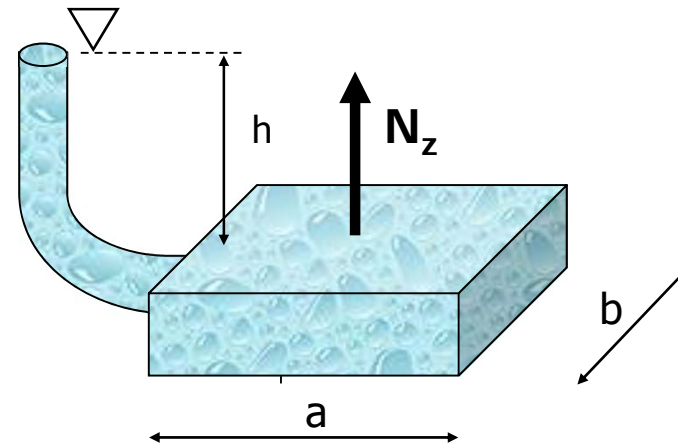
Angolo rispetto alla normale alla superficie

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

Esempio 1: parete orizzontale affondata

$$\vec{N} = \hat{z} \cdot N_z = \hat{z} \cdot \int_{\xi} \gamma \cdot z_{\xi} \cdot \cos \alpha_{\xi} \cdot ds =$$

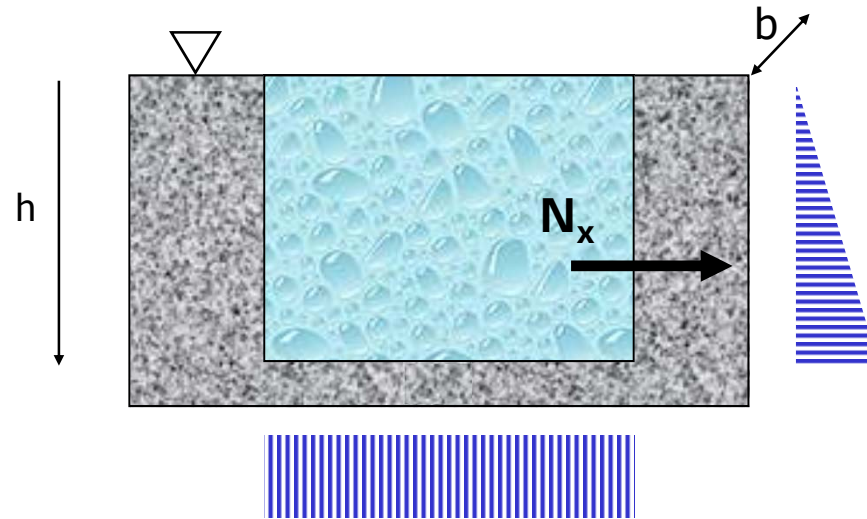
$$= \hat{z} \cdot \int_0^a \int_0^b \gamma \cdot h \cdot dx dy = \hat{z} \cdot \gamma \cdot h \cdot a \cdot b$$



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

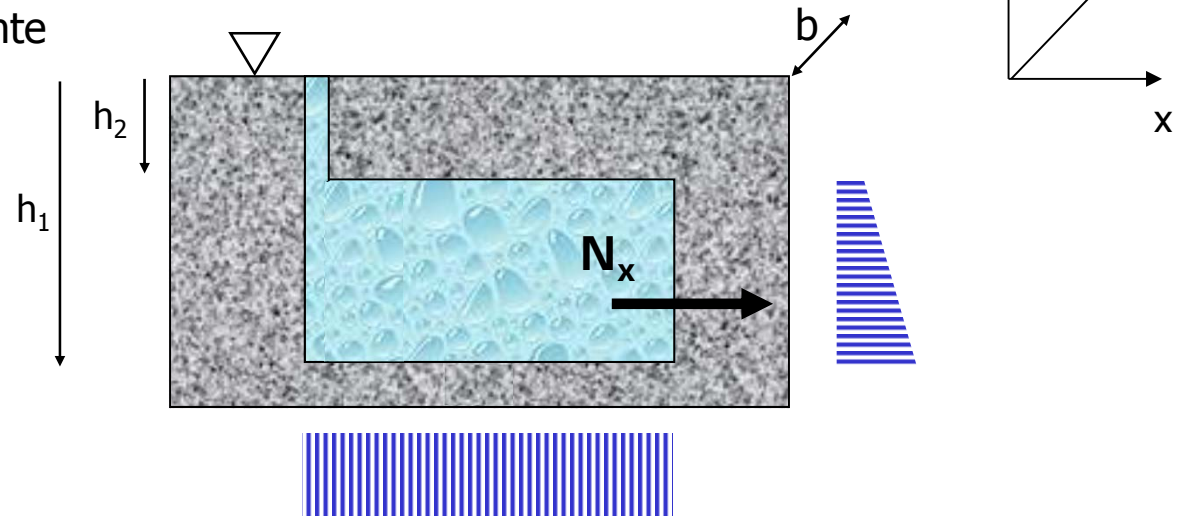
Esempio 2: parete verticale affiorante

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



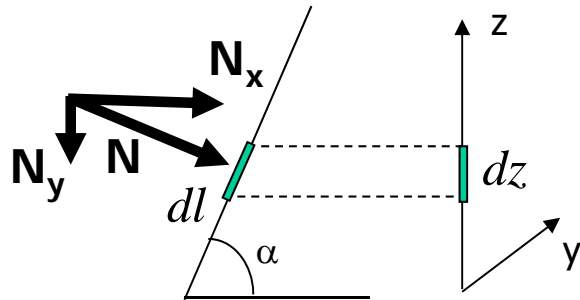
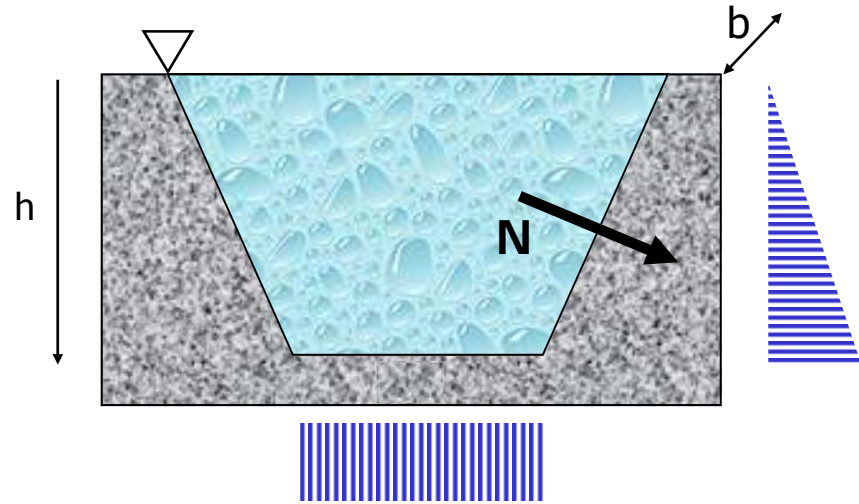
Esempio 3: parete verticale non affiorante

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



Esempio 4: parete inclinata affiorante

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



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

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

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

Esempio 5: parete cilindrica affiorante

$$\vec{N} = \int_{\xi} \gamma \cdot z_{\xi} \cdot \hat{n} \cdot ds = \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \int_0^b \gamma \cdot \hat{n} \cdot z \cdot dy r d\theta =$$

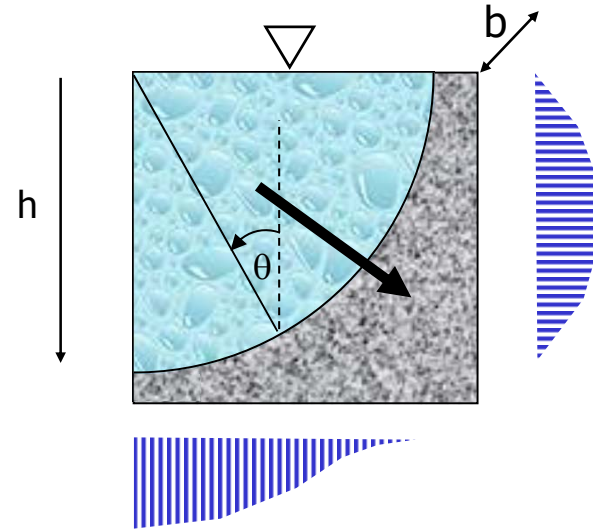
$$= \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \int_0^b \gamma \cdot \hat{n} \cdot (-r \cos \theta) \cdot dy r d\theta$$

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

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

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

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



Esempio 7: Caso reale di getto cilindrico

$$\vec{N} = \int_{\xi} \gamma \cdot z_{\xi} \cdot \hat{n} \cdot ds = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^b \gamma \cdot \hat{n} \cdot z \cdot dyrd\theta =$$

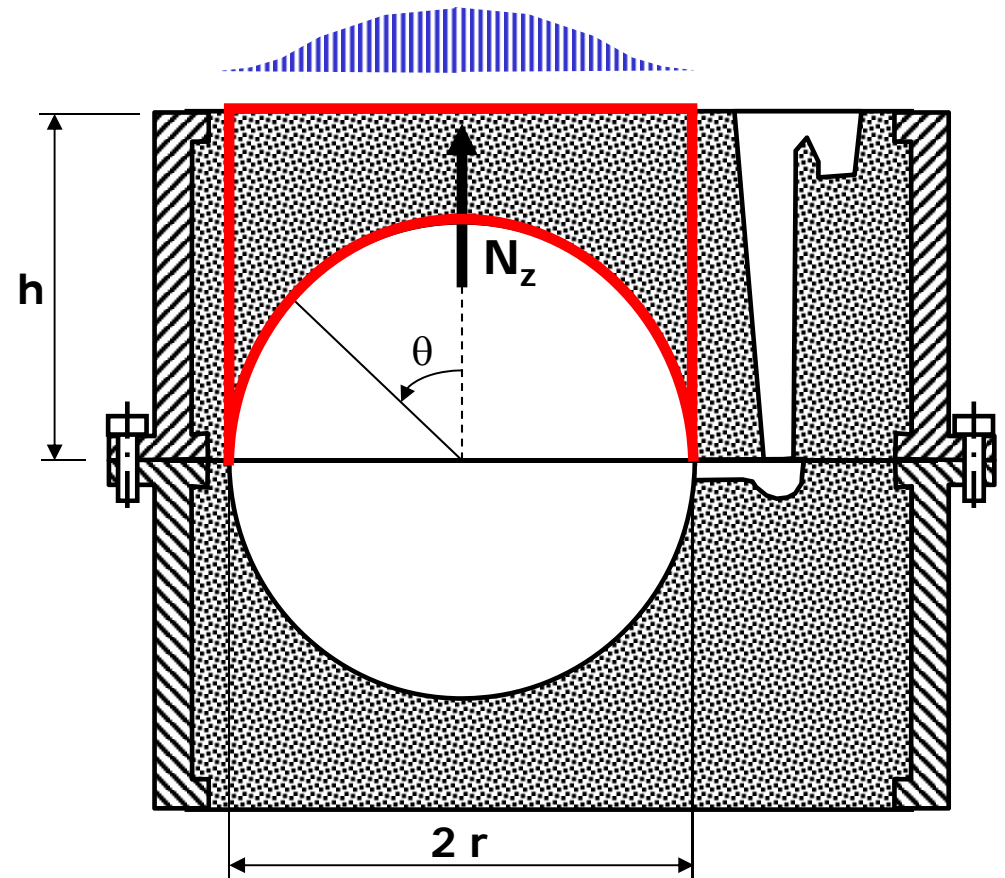
$$= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^b \gamma \cdot \hat{n} \cdot (h - r \cos \theta) \cdot dyrd\theta$$

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

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

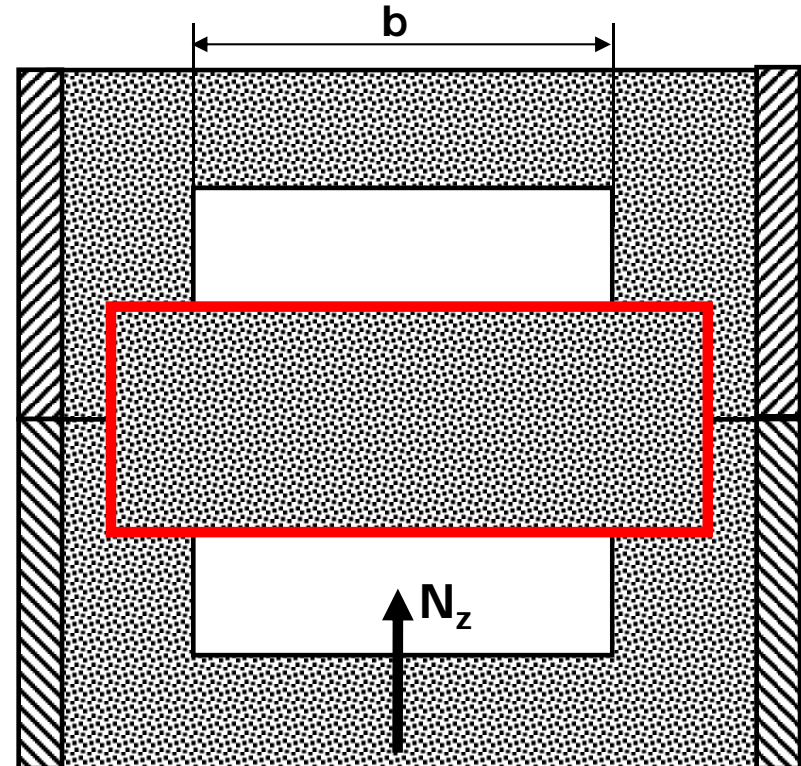
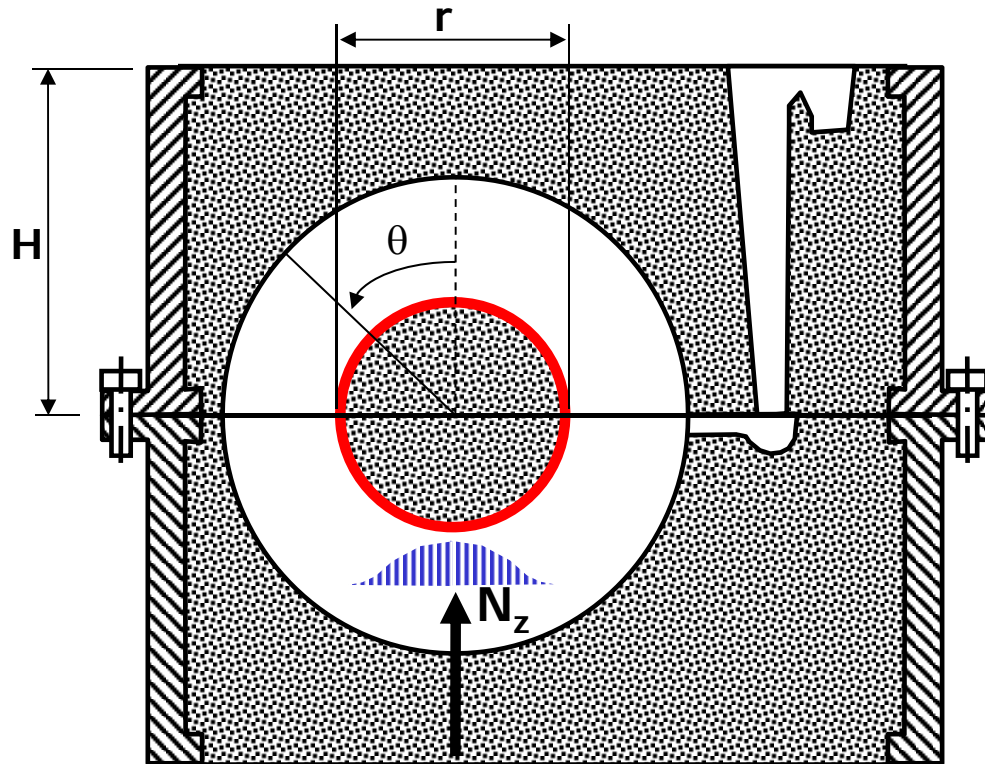
$$= b \cdot r \cdot \left(2h - \frac{\pi r}{2} \right) \gamma$$

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



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

Spinte metallostatiche sulle anime



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

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

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

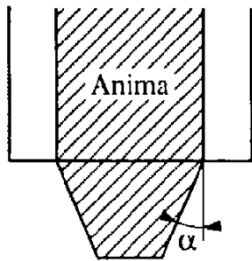


Le anime sono circondate dal metallo liquido ovunque tranne le loro portate.
La spinta di Archimede vale:

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

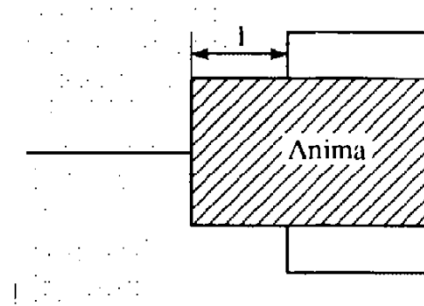
Nel calcolo della resistenza allo scoperchiamento della staffa, a questo valore bisogna sottrarre il peso dell'anima stessa

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

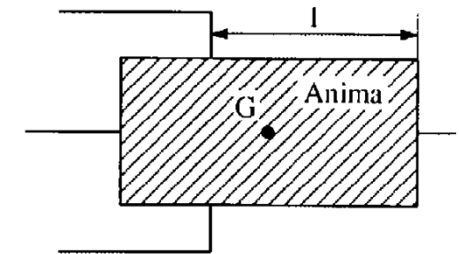


Portata d'anima per anima verticale

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.



Portata d'anima cilindrica per anima orizzontale su due appoggi



Anima a sbalzo