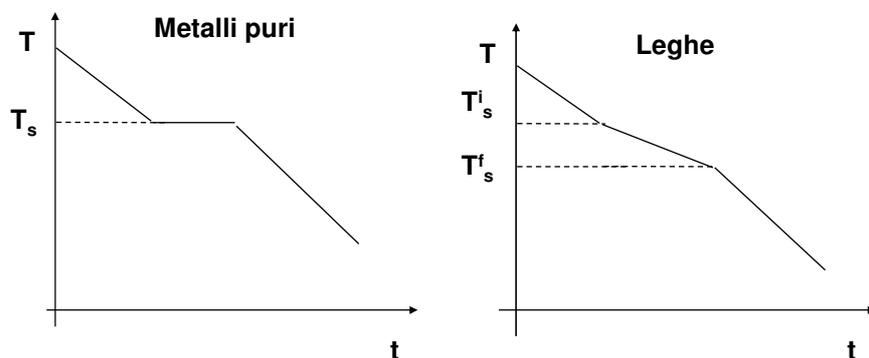


Fonderia

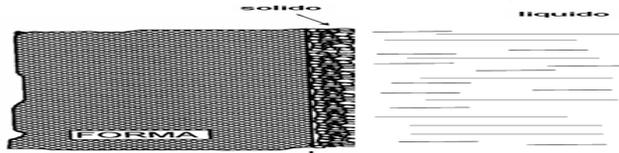
“La solidificazione di metalli”

Meccanismi di solidificazione



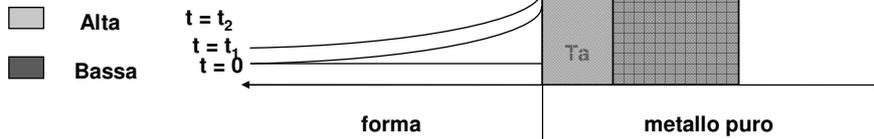
Meccanismi di solidificazione

Metallo puro: formazione dei grani con fronte piano



- $t = 0$ alto gradiente termico
- Gradiente sempre minore al passare del tempo

Effetto della velocità di raffreddamento:



Meccanismi di solidificazione

Metallo puro: formazione dei grani

$t \approx 0$

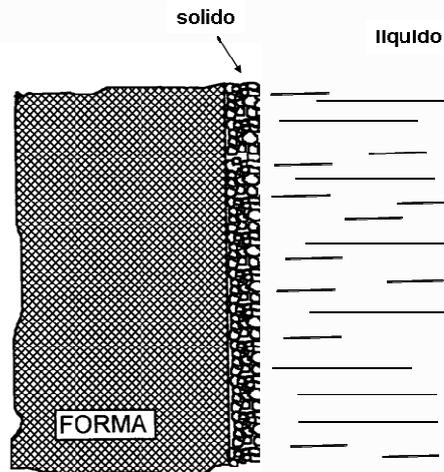
alta differenza di temperatura

⇒ grosso sottoraffreddamenti

⇒ molti grani piccoli

⇒ buone caratteristiche meccaniche

crosta dura che può dare problemi nelle lavorazioni meccaniche successive



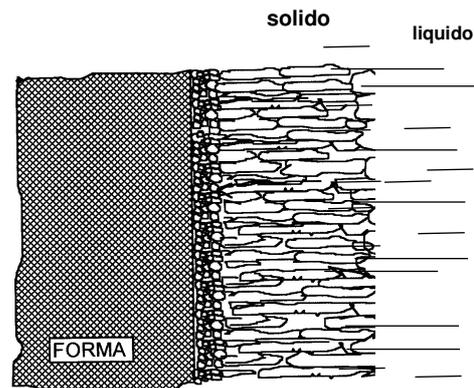
Meccanismi di solidificazione

Metallo puro: formazione dei grani

$t = t_1$

contrazione di volume
distacco del getto dalla forma

- strato di aria interposto
(bassa conducibilità)
- velocità di raffreddamento più bassa
- flusso direzionale
- grani allungati, anisotropia

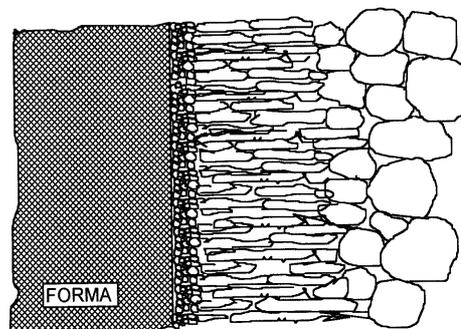


Meccanismi di solidificazione

Metallo puro: formazione dei grani

$t = t_2$

- bassi gradienti termici
- bassa conducibilità
- flusso termico non direzionale
- grani grossi, equiorientati

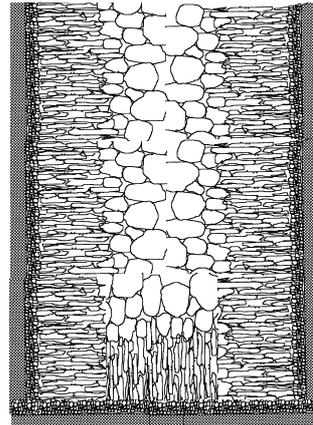


Meccanismi di solidificazione

Metallo puro: struttura finale di un getto fuso

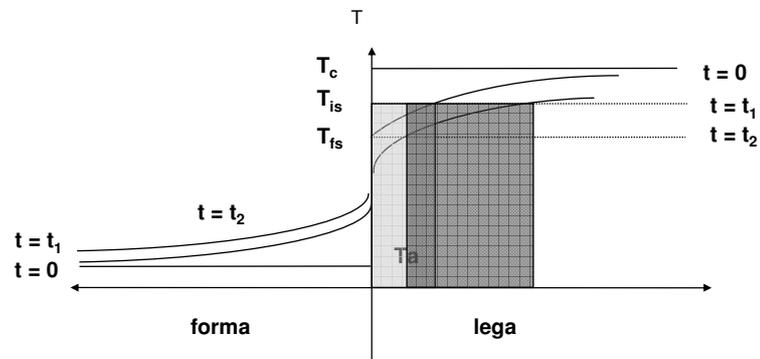
È auspicabile avere:

- elevata velocità di raffreddamento
- spessori ridotti
- rugosità della forma



Meccanismi di solidificazione

Leghe: formazione dei grani

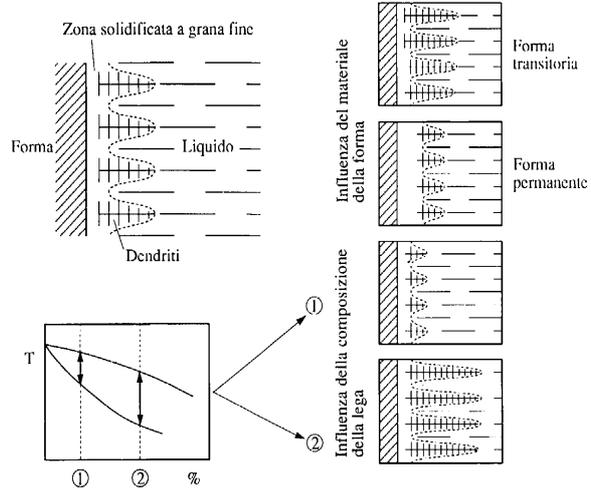


Meccanismi di solidificazione

Lega: struttura dendritica

Problemi:

- microsegregazione
- anisotropia
- porosità interdendritica

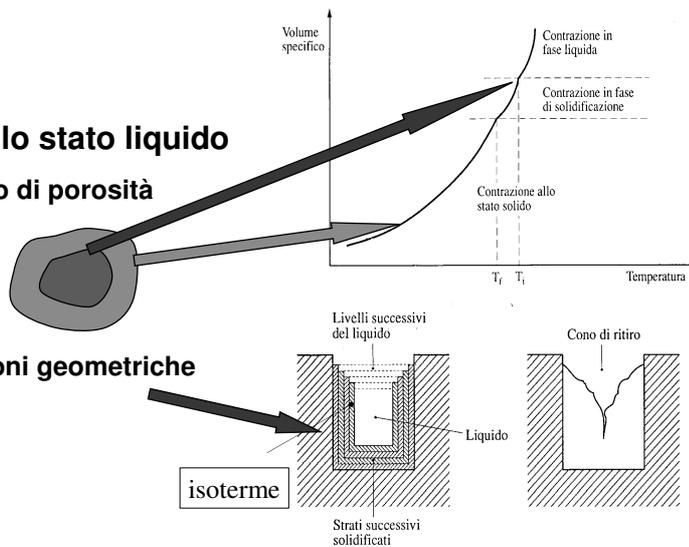


Il fenomeno del ritiro

Ritiro allo stato liquido

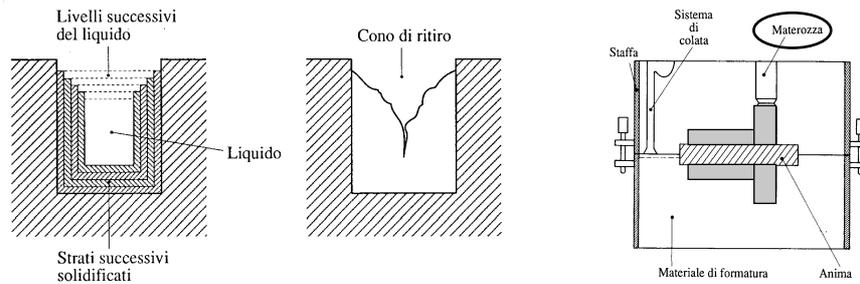
- pericolo di porosità

- variazioni geometriche



Il fenomeno del ritiro

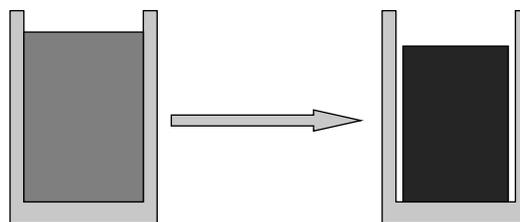
La materozza



- evita la formazione del cono di ritiro all'interno del getto
- compensa la contrazione di volume nel raffreddamento in fase liquida e nel passaggio liquido / solido

Il fenomeno del ritiro

Ritiro allo stato solido



variazione dimensionale



necessità di aumentare le dimensioni della forma

Il fenomeno del ritiro

Per progettare il sistema di alimentazione occorre decidere:

- dove posizionare le materozze
- quante materozze posizionare
- scegliere il tipo di materozza
- dimensionare ogni singola materozza
- dimensionare il collare (canale tra la materozza e il pezzo).

La velocità di solidificazione

Per fare in modo che la zona del pezzo cui è collegata la materozza sia l'ultima parte del pezzo a solidificare possiamo suddividere il pezzo in parti elementari e calcolare il modulo termico di ogni singola parte.

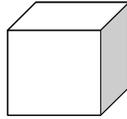
Per il calcolo del modulo termico delle parti non si considerano come scambianti le superfici di sezione ideale tra le parti:

$$M_x = \frac{\text{Volume parte } X}{\text{Superficie scambiante parte } X}$$

La velocità di solidificazione

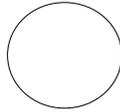
Alcune considerazioni sui moduli termici di elementi geometrici elementari:

- cubo di lato L



$$M_{cubo} = \frac{L^3}{6L^2} = \frac{L}{6}$$

- sfera di raggio R

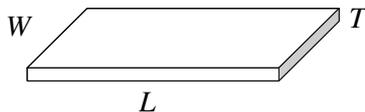


$$M_{sfera} = \frac{4/3\pi R^3}{4\pi R^2} = \frac{R}{3}$$

La velocità di solidificazione

Alcune considerazioni sui moduli termici di elementi geometrici elementari:

- piastra



$$M_{piastra} = \frac{LWT}{2[LW + LT + WT]} = \frac{1}{2\left[\frac{1}{L} + \frac{1}{T} + \frac{1}{W}\right]}$$

- piastra infinita (superfici laterali non scambiano calore)

$$W \rightarrow \infty$$

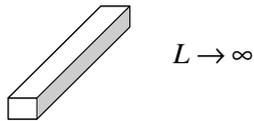
$$L \rightarrow \infty$$

$$M_{piastra} \approx \frac{T}{2}$$

La velocità di solidificazione

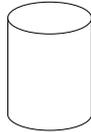
Alcune considerazioni sui moduli termici di elementi geometrici elementari:

- barra indefinita



$$M_{barra} = \frac{1}{2 \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{T} + \frac{1}{W} \right]} \approx \frac{1}{2 \left[\frac{1}{T} + \frac{1}{W} \right]}$$

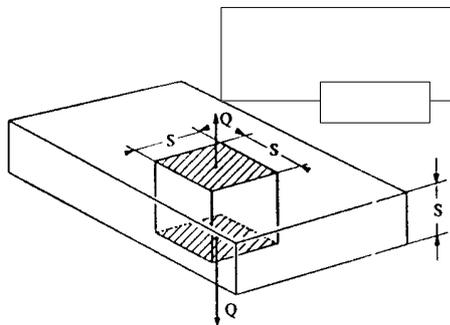
- cilindro di raggio R e altezza H



$$M_{cilindro} = \frac{\pi R^2 H}{2\pi R^2 + 2\pi R H} = \frac{1}{2 \left[\frac{1}{R} + \frac{1}{H} \right]}$$

La velocità di solidificazione

MODULO DI RAFFREDDAMENTO DI UNA PIASTRA



Il fenomeno del ritiro

Per decidere **dove posizionare le materozze** dobbiamo ricordare che deve essere l'ultima a solidificare.

Quindi devono essere verificate due condizioni:

- la zona del pezzo cui è collegata la materozza deve essere l'ultima parte del pezzo a solidificare (solidificazione direzionale)
- la materozza deve solidificare dopo quest'ultima.

Per verificare entrambe le condizioni occorre determinare il tempo di solidificazione, cioè quanto tempo passa tra la colata e l'inizio della solidificazione di una generica parte del getto e della materozza.

La velocità di solidificazione

Per valutare il tempo di solidificazione in Chvorinov ha sperimentalmente dimostrato che il tempo di solidificazione è legato alla geometria del pezzo attraverso il modulo termico con una legge del tipo:

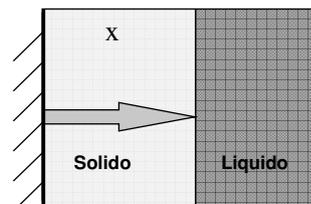
$$x = k \cdot \sqrt{t}$$

**Legge della diffusione
(Chvorinov)**

X = spessore strato solidificato

Materiale	k
Acciaio	0.09
Alluminio	0.12
Rame	0.07

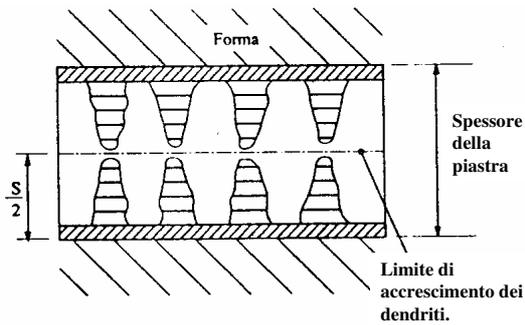
per x in cm e t in secondi



La velocità di solidificazione

VALUTAZIONE DEL TEMPO DI SOLIDIFICAZIONE

La solidificazione di una piastra di spessore S si può ritenere terminata quando lo spessore dello strato solidificato è pari alla metà dello spessore della piastra stessa.



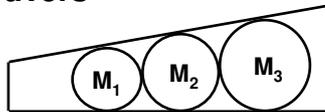
$$t_s = \left(\frac{x}{k}\right)^2 = \left(\frac{M}{k}\right)^2$$

Legge di Chvorinov

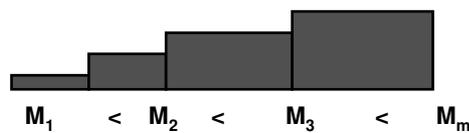
La solidificazione direzionale

Metodi pratici per assicurare una solidificazione direzionale

- Cerchi di Heuvers



Divisione in parti



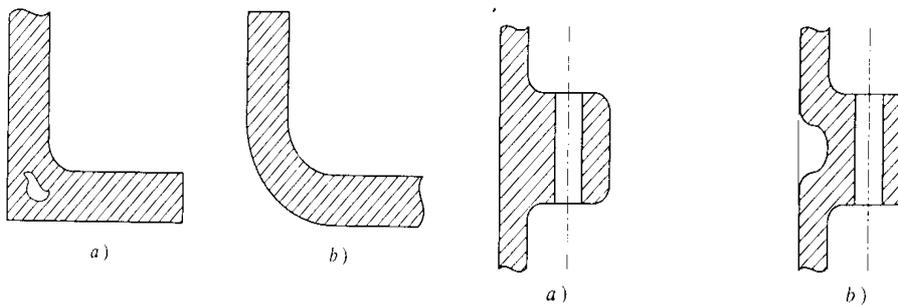
Regola empirica:

$$M_{i+1} = 1.1 - 1.2 M_i$$

La solidificazione direzionale

Metodi pratici per assicurare una solidificazione direzionale

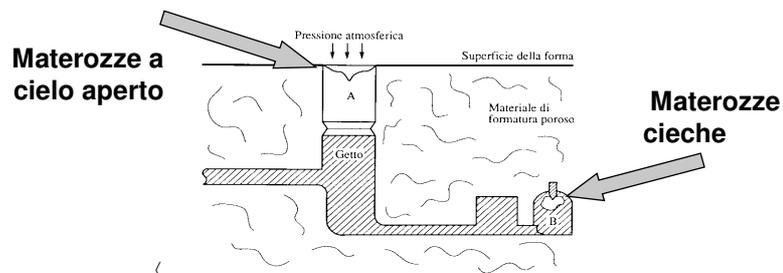
- Individuazione di zone di possibile difettosità dovuta a ritiro in fase liquida
- Eventuale variazione della geometria



La materozza ed il suo dimensionamento

La materozza (alimentatore) deve:

- A) rifornire il getto (o una sua parte) di metallo liquido, per compensare il ritiro in fase liquida
- B) contenere completamente il difetto provocato dal ritiro



La materozza ed il suo dimensionamento

A) rifornimento del getto

La materozza deve solidificare dopo il getto

- Regola pratica

$$M_m = 1.2 M_g$$

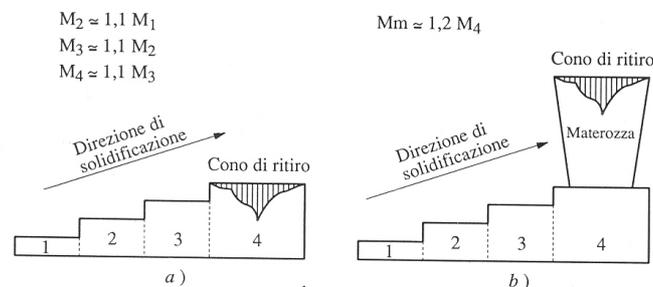
M_m = modulo di raffreddamento della materozza

M_g = modulo di raffreddamento del getto (zona adiacente la materozza)

La materozza ed il suo dimensionamento

Attraverso il calcolo del modulo termico delle parti in cui scomponiamo il pezzo siamo in grado di determinare come evolve la solidificazione nel pezzo.

Durante la solidificazione le parti vicine a quelle che solidificano forniscono materiale liquido e compensano al ritiro, cioè fungono da alimentatori.



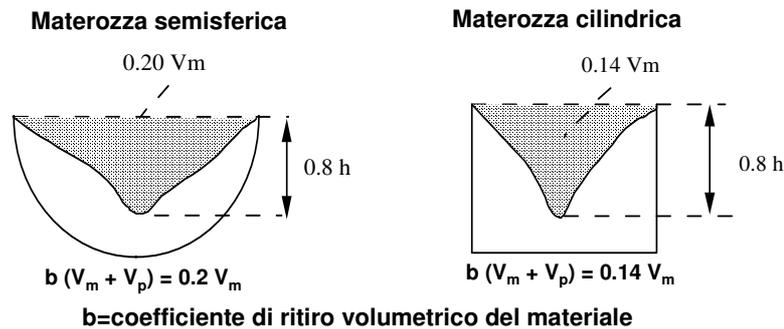
$$M_m = 1.2 M_g$$

La materozza ed il suo dimensionamento

B) verifica del cono di ritiro

Il cono di ritiro deve essere integralmente contenuto nella materozza

Per sicurezza: altezza del cono di ritiro pari all'80% dell'altezza h della materozza.



La materozza ed il suo dimensionamento

Il metodo basato sull'**entità del cono di ritiro** parte dall'osservazione sperimentale che quando il getto è sano il volume di liquido nella materozza a fine solidificazione si è ridotto di una percentuale pari al

- 14% per materozze cilindriche e ovali
- 20% per materozze emisferiche e sferiche

Quindi, indicando con a la percentuale sopra descritta si ha:

$$V_r = aV_m$$

Il volume V_r è anche pari a:

$$V_r = \frac{b}{100} [V_m + V_p]$$

dove b è la contrazione volumetrica del metallo colato, V_m e V_p il volume della materozza e della parte del pezzo alimentata dalla materozza, rispettivamente

La materozza ed il suo dimensionamento

Unendo le due relazioni si ottiene il volume della materozza in relazione al volume della parte del pezzo che questa deve alimentare:

$$V_m = V_p \left[\frac{b}{a-b} \right]$$

Questa è la seconda relazione che cercavamo. Il sistema:

$$M_m = 1.2M_x$$

$$V_m = V_p \left[\frac{b}{a-b} \right]$$

consente di definire le dimensioni della materozza.

La materozza ed il suo dimensionamento

metodo di Caine

Valori tipici di b

Materiale	b (%)
Acciai	7 - 10
Ghisa bianca	6
Ghisa grigia	0.4 - 3
Bronzo	4.5
Ottone	6.7
Rame-Alluminio	4
Allum.-Silicio	3.5

Espressione analitica:

$$\left(\frac{M_m}{M_g} - c \right) \cdot \left(\frac{V_m}{V_g} - b \right) = 0.1$$



Costante = f (coef. trasm calore materozza/ coef. trasm calore pezzo)

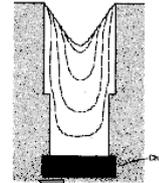
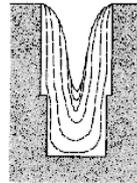
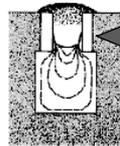
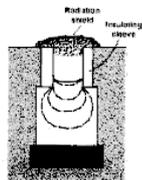
N.B. Allo scopo di rallentare il raffreddamento della materozza e diminuire il volume, è possibile inserire un materiale coibente.

La materozza ed il suo dimensionamento

metodo di Caine

$$\left(\frac{Mm}{Mg} - c\right) \cdot \left(\frac{Vm}{Vg} - b\right) = 0.1$$

Metodi per ridurre le dimensioni delle materozze



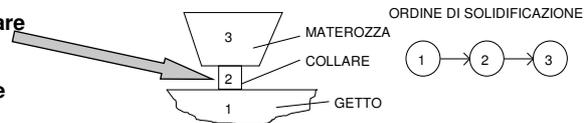
Raffreddatore

Coibente

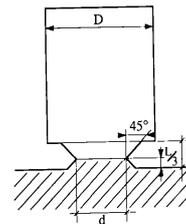
La materozza ed il suo dimensionamento

Collare di attacco delle materozze

- piccola sezione per facilitare asportazione
- non strozzatura per evitare solidificazione prematura
- superfici piane piuttosto che curve
- in corrispondenza di zone da lavorare successivamente



Materiale	d/D	L/D
Acciaio	0.4	0.16
Ghisa	0.66	0.16
Rame	0.66	0.35
Leghe leggere	0.75	0.49



La materozza ed il suo dimensionamento

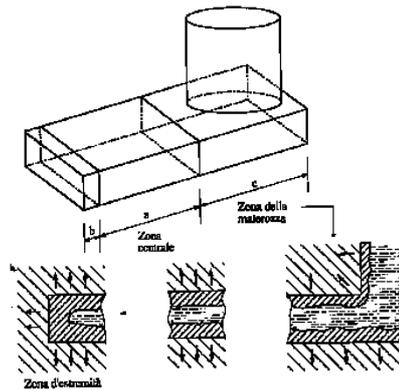
Zone protette

- Zona di influenza materozza

Acciaio	3 - 5 s
Ghisa	4 - 5 s
Bronzo	6 - 8 s
Leghe leggere	5 - 7 s

- Effetto di bordo $\approx 2.5 s$

L'utilizzo di "Raffreddatori Esterni" permette di aumentare l'effetto di bordo di 50mm

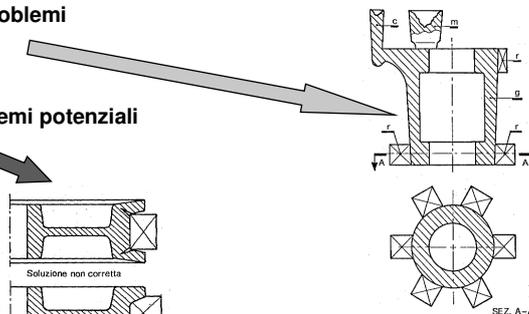


La materozza ed il suo dimensionamento

Raffreddatori

- Soluzione di problemi

- Nascita di problemi potenziali



Cricche a caldo dovute alla forma non corretta dei raffreddatori

Posizionamento raffreddatori

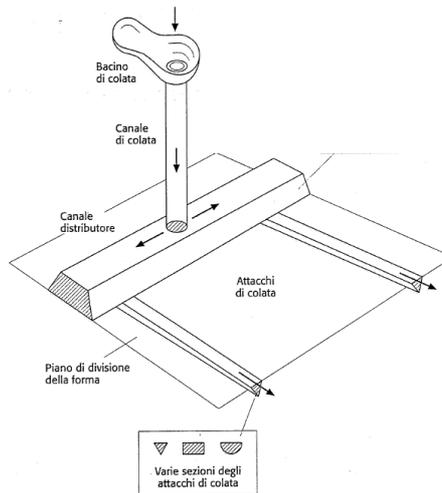
Sistema di colata "per fonderia in terra"

Regole pratiche

- La forma deve essere riempita rapidamente
- Devono essere evitate forti velocità e turbolenze
- Devono essere trattenute le scorie
- Il tipo di riempimento deve favorire la solidificazione direzionale
- Devono essere evitati lunghi percorsi

Elementi del sistema di colata

- Bacino di colata
- Canale di colata
- Canale distributore
- Attacchi di colata



Sistema di colata "per fonderia in terra"

a) Calcolo del tempo di colata, T

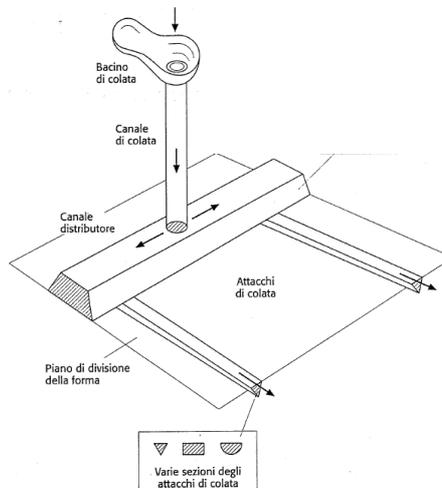
- T piccolo \Rightarrow portate eccessive
- T grande \Rightarrow prematura solidificazione

Formula empirica

$$T = 6.4 s G^{0.4}$$

dove:

- T = tempo in secondi
- s = spessore medio del getto (cm)
- G = peso del getto (Kg)



Sistema di colata "per fonderia in terra"

b) sezione totale degli attacchi di colata, S_a

$$S_a = \frac{G}{T \cdot V \cdot \gamma}$$

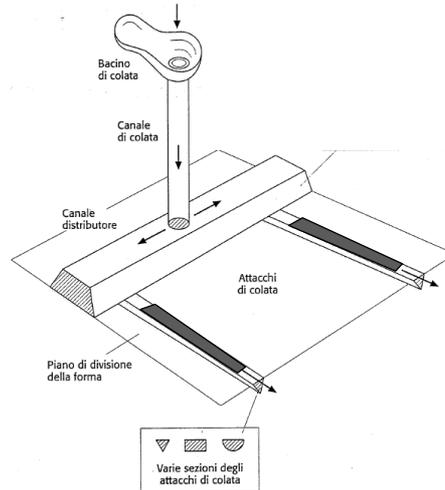
dove:

G = peso del getto (Kg)

T = tempo in secondi

V = velocità del liquido = $(2gh)^{1/2}$

γ = densità del liquido



Sistema di colata "per fonderia in terra"

c) Sezione del distributore

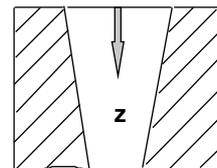
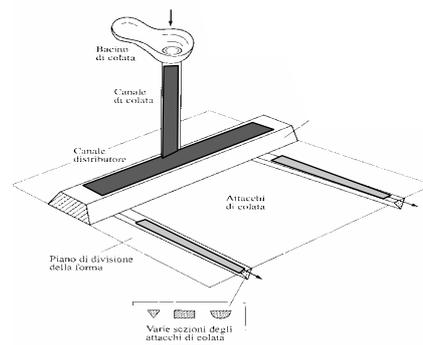
$$S_d = 1.5 S_a$$

d) Sezione finale canale di colata

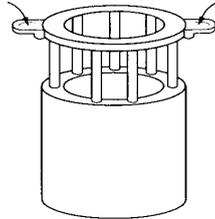
$$S_{cf} \approx 1.3 S_d$$

e) Variazione sezione canale di colata, $S_c(z)$

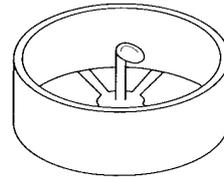
$$S_c(z) \cdot (z)^{1/2} = \text{costante}$$



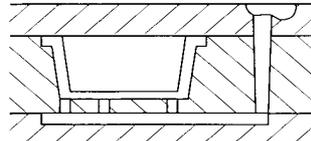
Sistema di colata: soluzioni costruttive



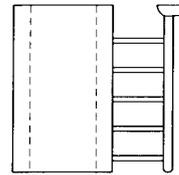
Colata dall'alto a pioggia



Dal basso a stella



Dal basso a sorgente



Colata a pettine

<

LE SPINTE METALLOSTATICHE

Una volta che la forma è stata riempita di metallo liquido, questo esercita una **pressione metallostatica** sulle pareti della forma.

La pressione può generare una deformazione della staffa con conseguente perdita di precisione dimensionale del getto.

Per ovviare a questo problema occorre utilizzare staffe particolarmente rigide e, nel caso di staffe alte, rinforzarle lateralmente.

Inoltre, la pressione metallostatica provoca dei cedimenti nella forma causati dalla presenza di una eventuale non omogeneità della compattazione. Questo cedimento ha un impatto negativo sulla precisione dimensionale del processo.

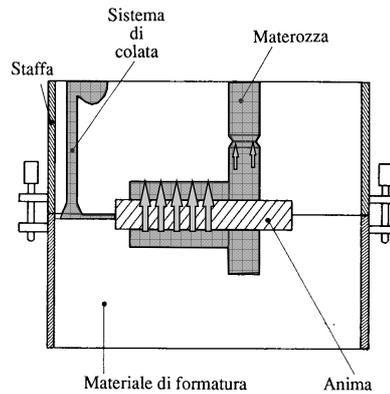
Spinte metallostatiche

Per un liquido perfetto si ha:

$$p = \gamma h$$

= peso specifico

Spinte sullo stampo



LE SPINTE METALLOSTATICHE

L'integrale della pressione metallostatica lungo la superficie dell'impronta dà la **spinta metallostatica**

La spinta metallostatica sulla staffa superiore è diretta verso l'alto e può portare al sollevamento della staffa superiore con fuoriuscita di metallo liquido

Per ovviare a questo problema occorre posizionare dei pesi sulla staffa superiore per impedirne il sollevamento

