



# Corso di Tecnologia Meccanica

## Modulo 2.2

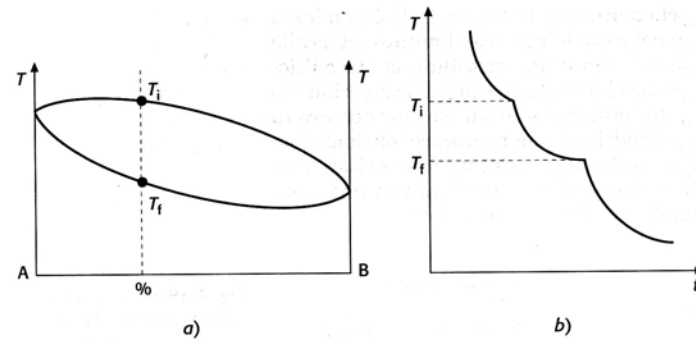
### Tecniche di fonderia



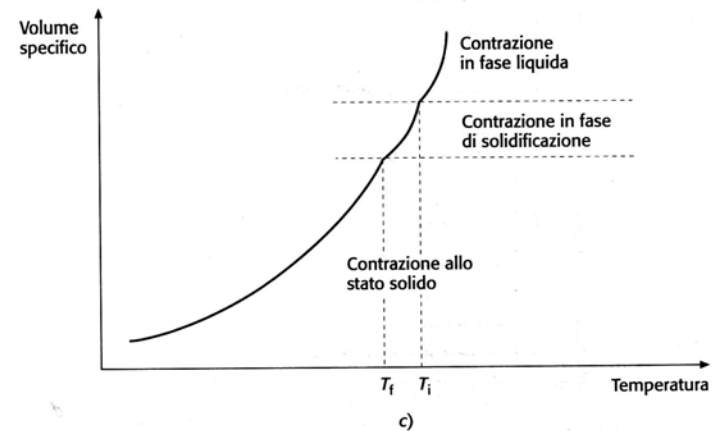
# La solidificazione del getto

# Volume dei materiali e temperatura

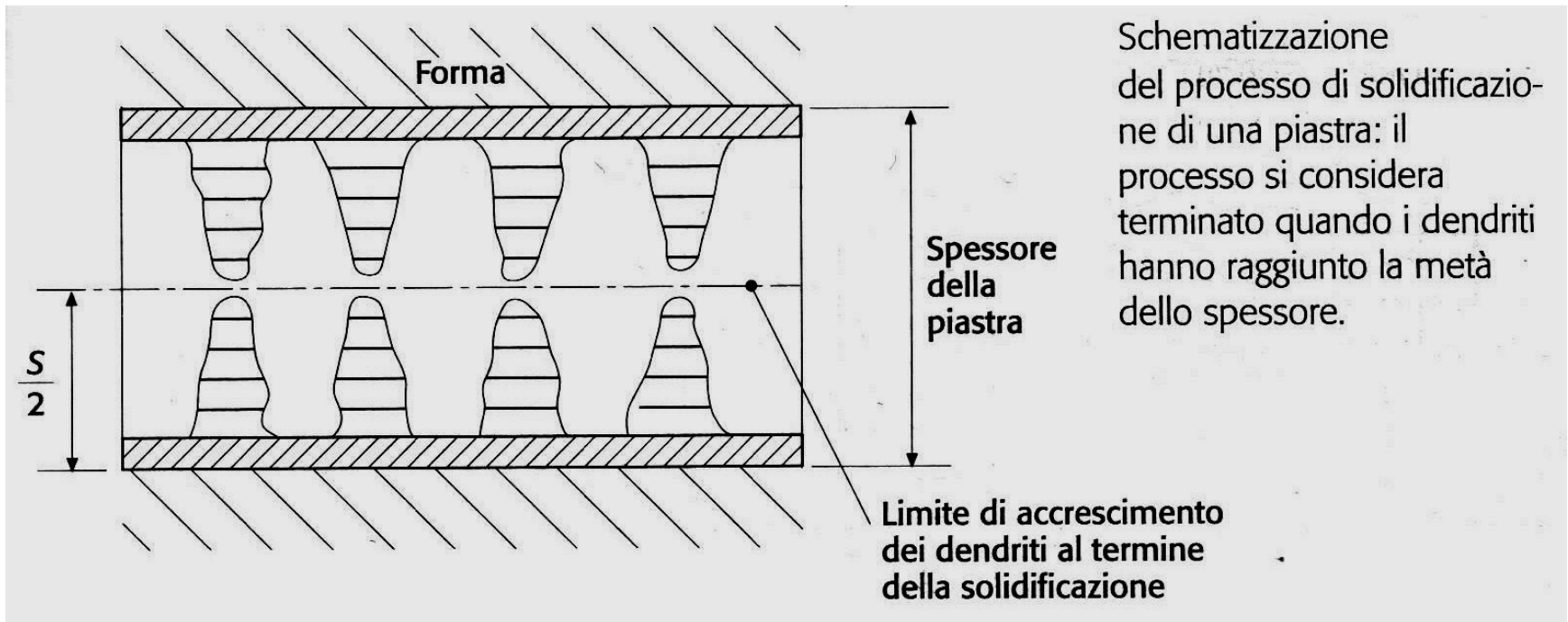
- Tutti i materiali sono soggetti ad una contrazione volumetrica in funzione della riduzione della temperatura
- Per tale ragione sarà necessario provvedere a compensare la mancanza di materiale che si verrà a verificare durante la solidificazione ed il raffreddamento di quest'ultimo dallo stato di colata fusa.
- A ciò pensano appunto le cavità (materozze) di allocazione di materiale in eccedenza durante la colata



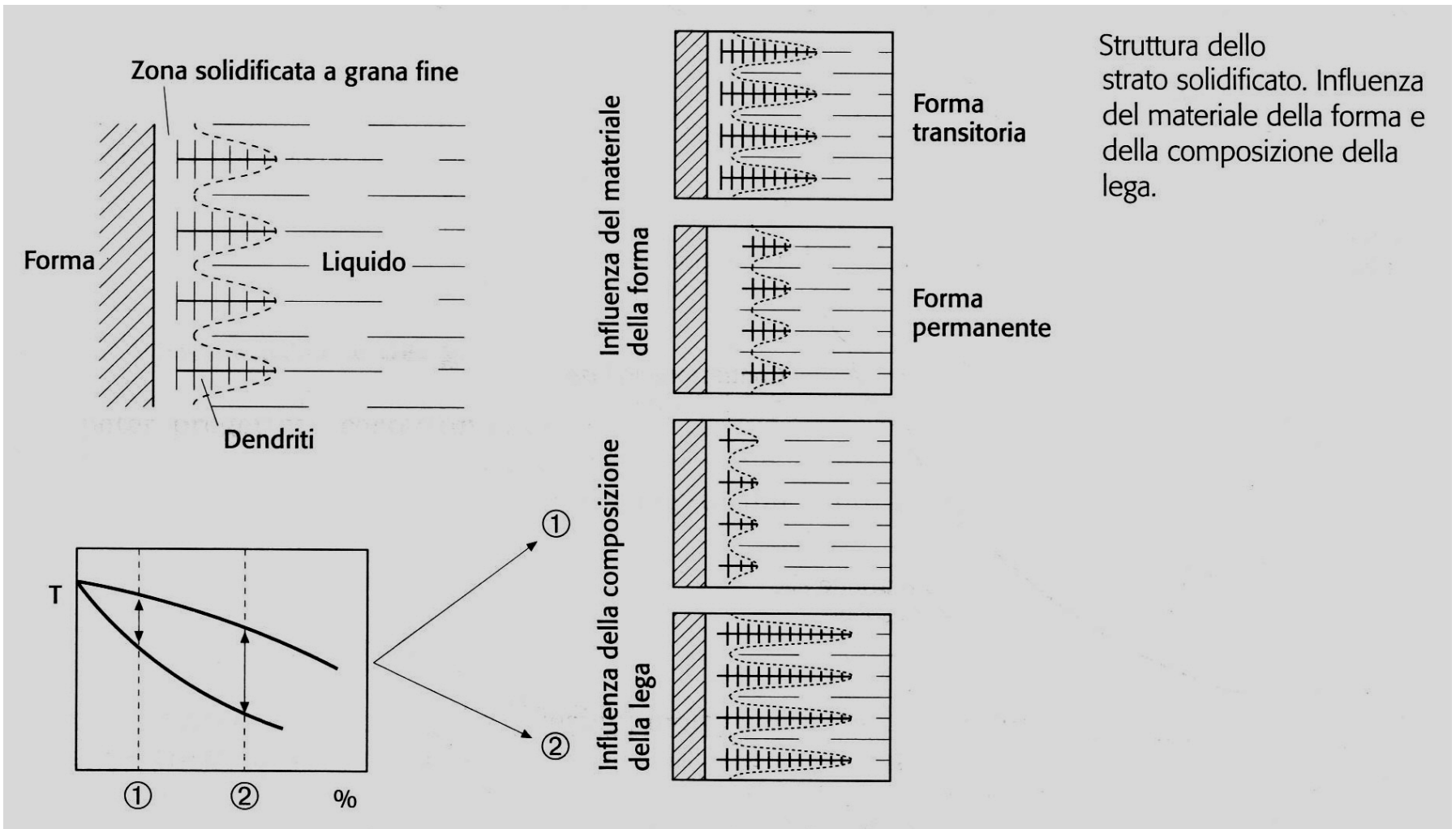
Solidificazione delle leghe: diagramma di stato a), diagramma di raffreddamento b), andamento del volume specifico in funzione della temperatura c).



# Processo di solidificazione

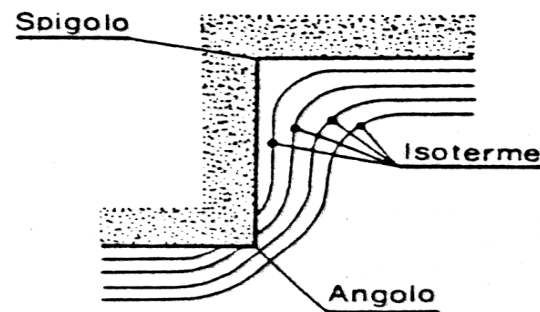
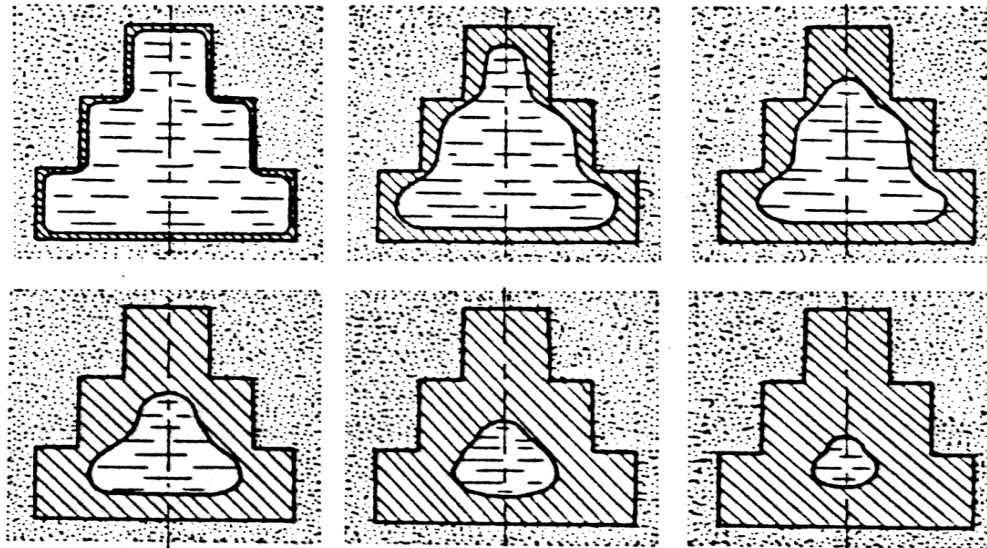


# Processo solidificazione



Struttura dello strato solidificato. Influenza del materiale della forma e della composizione della lega.

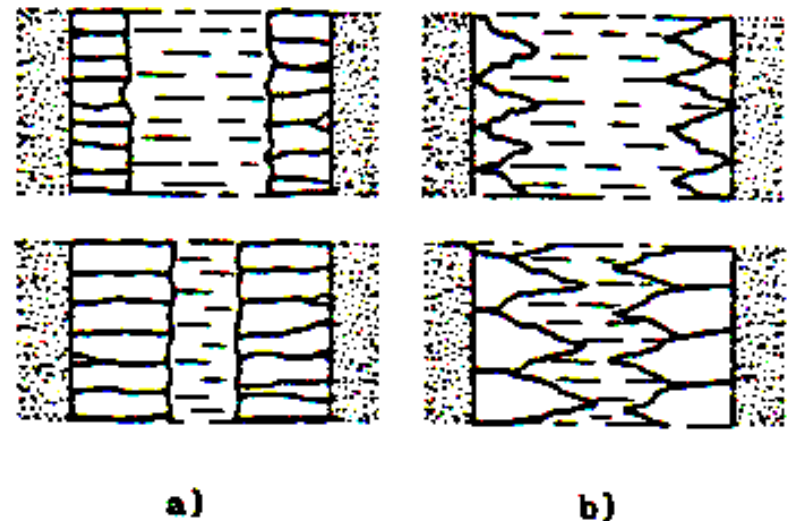
# Andamento della solidificazione



Varie fasi di solidificazione e andamento delle isoterme in un angolo e in uno spigolo del getto.

# Solidificazione esogena

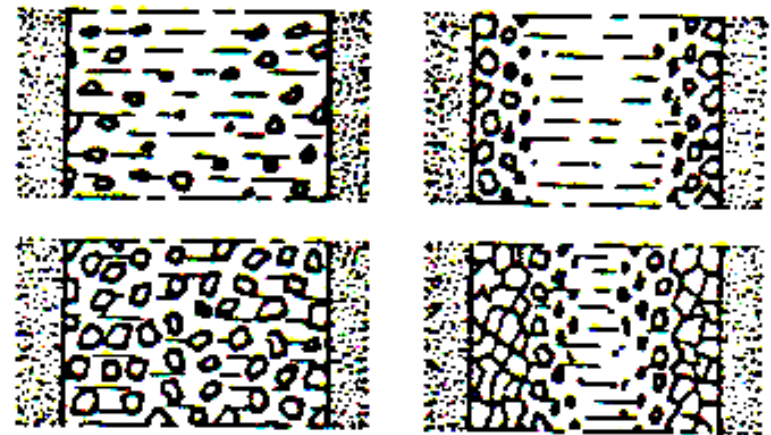
- La solidificazione di un getto comincia dall'involucro esterno a contatto con le pareti della forma e procede verso l'interno con diversi comportamenti:
  - A fronte liscio, tipica dei metalli puri con un fronte regolare (ottoni, bronzi)
  - A fronte scabro, tipica delle leghe quando i grani si aggregano verso il centro creando un fronte frastagliato (acciaio, ghisa bianche)



Differenti tipi di solidificazione:  
a) a fronte liscio,  
b) a fronte scabro.

# Solidificazione endogena

- La solidificazione nasce con grani sparsi nella forma:
  - A centri dispersi, quando i cristalli si formano ed accrescono in tutta la massa liquida (acciaio, ghisa sferoidale)
  - A guscio, quando i cristalli si formano e si accrescono in forma endogena i grani solidificano in maniera minore nel centro della forma creando così una sorta di guscio solido esterno (ghisa grigia)



c) a centri dispersi,  
d) a guscio.



# Alimentazione del getto

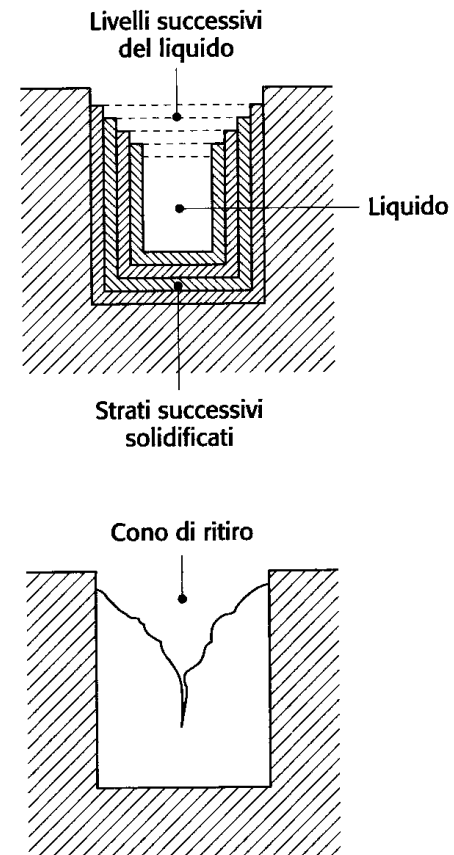
- Il tipo di solidificazione influenza le condizioni di alimentazione del getto:
  - Un'alimentazione completa si ha con la solidificazione a fronte liscio
  - La solidificazione a fronte scabro può ostacolare molto l'alimentazione che avviene per filtrazione intercristallina
  - La solidificazione a centri dispersi e a guscio diventa critica solo ad una certa dimensione dei grani cristallini

# Tipi di ritiro

- Tre tipi di ritiro da studiare e risolvere in funzione della temperatura e della fase in cui si trova il greggio
  - In fase liquida: occorre tenerne conto in fase di progetto del getto e del sistema di colata
  - In fase di solidificazione: può causare lo scarto del getto con la creazione del “cono di ritiro”. Occorre tenerne conto con la presenza di materozze
  - In fase solida: occorre tenere in conto in fase di progetto (ad.es tenendo costanti gli spessori) per evitare tensioni di ritiro che possono deformare od addirittura danneggiare il getto a solidificazione avvenuta

# Solidificazione delle leghe

- Le leghe solidificano a temperatura variabile e ciò può provocare una disuniformità della superficie di solidificazione detta zona dendritica che è causa di 2 difetti:
  - Cono di ritiro in superficie
  - Porosità dendritica all'interno del getto



Schematizzazione del processo di solidificazione di un getto: origine del «cono di ritiro».

# Modulo di raffreddamento

- Si definisce modulo di raffreddamento il rapporto  $M = V / S$
- Si dimostra sperimentalmente che il rapporto tra volume e superficie del getto, ovvero il modulo termico, influenza proporzionalmente il tempo di solidificazione.
- La spiegazione sta nel fatto che a parità di volumi, se la superficie di scambio termico aumenta, minore sarà il tempo  $T$  necessario per il raffreddamento

# Tempo di solidificazione

- Detto  $M = V / S$ , Chvorinov ha dimostrato sperimentalmente che:

$$T = M^a$$

Ove “a” dipende da fattori legati ai materiali, alla geometria del pezzo, etc....

- Determinare il tempo di solidificazione è fondamentale per individuare la direzione di solidificazione, ovvero essere certi che il modulo termico del getto aumenti con l'avvicinarsi agli alimentatori e sia massimo in corrispondenza di questi che devono essere gli ultimi a solidificare

# Tesi di Chvorinov per pezzi di basso spessore

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

Ove

x è lo spessore del getto

k è una costante dipendente dal materiale:

- k = 0,089 acciaio
- k = 0,115 leghe leggere
- k = 0,070 leghe di rame

# Raffreddamento

- Nell'ipotesi generica di una piastra si assume che questa sia solidificata quando i dendriti formati all'interno raggiungono metà del suo spessore
- In questa assunzione il tempo di raffreddamento risulta:

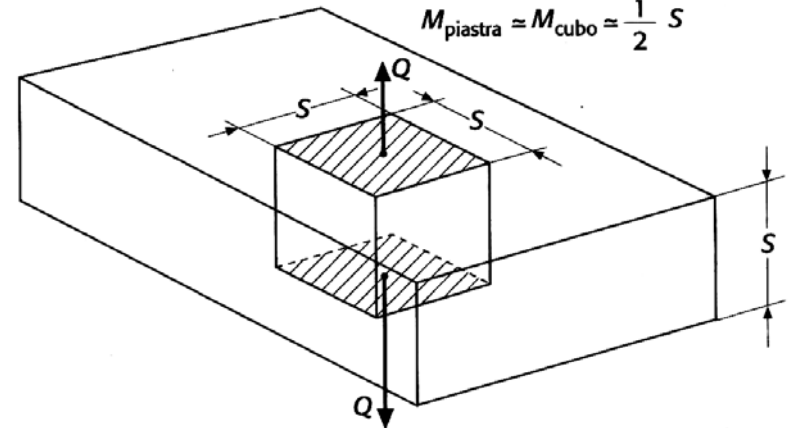
$$T = (x/k)^2 = (M/k)^2 = M^2/k^2$$

- Dunque, in definitiva il tempo di raffreddamento è proporzionale al quadrato del suo modulo di raffreddamento
- Si può sperimentare che tale assunzione è valida in prima approssimazione anche per altri casi
- È possibile affrontare il calcolo di raffreddamento di un getto scomponendolo in tanti solidi elementari

Valutazione approssimata del modulo di raffreddamento di una piastra, trascurando gli effetti ai bordi.

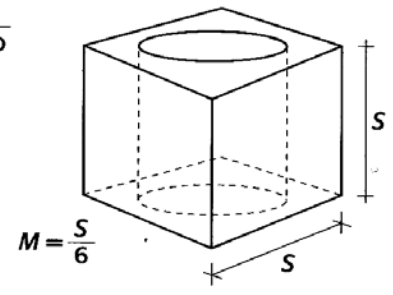
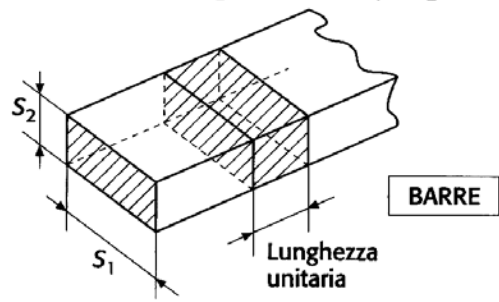
$$M_{\text{cubo}} = \frac{S^3}{2S^2} = \frac{1}{2} S$$

$$M_{\text{piastra}} \approx M_{\text{cubo}} \approx \frac{1}{2} S$$



$$V = S_1 \cdot S_2 \cdot 1$$

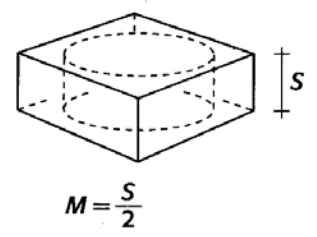
$$S = 2(S_1 + S_2) \cdot 1 \quad M = \frac{S_1 \cdot S_2}{2(S_1 + S_2)} = \frac{\text{Area}}{\text{Perimetro}}$$



CUBI, CILINDRI, SFERE

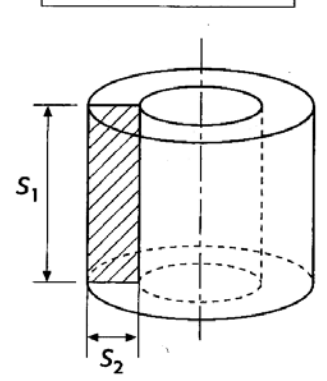
Barre piegate

PIASTRE E DISCHI

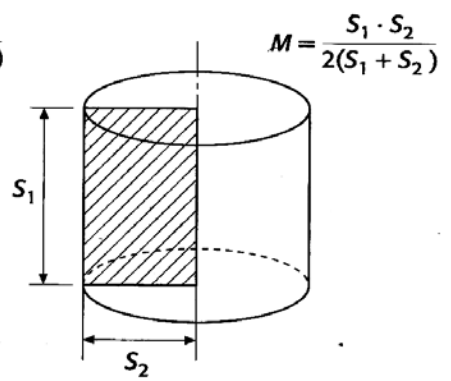


Metodi approssimati per il calcolo del modulo di raffreddamento di figure solide elementari.

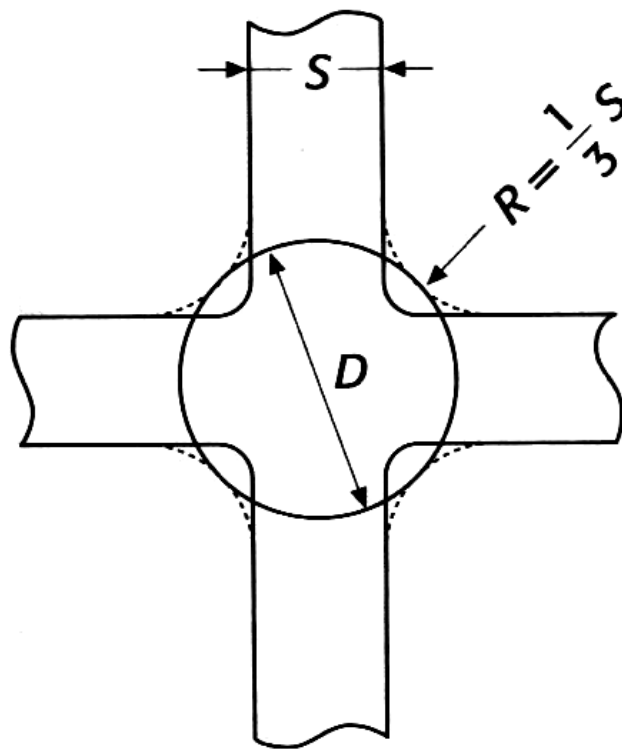
CORPI TOROIDALI



Caso limite







Raccordo tra piastre

$$M = \frac{D}{2}$$

Raccordo tra barre di spessore S

$$M = \frac{D \cdot S}{2(D + S)}$$

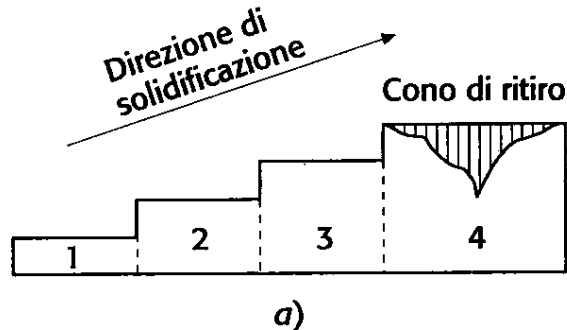
Metodo pratico  
per la determinazione del  
modulo di raffreddamento  
di una zona di intersezione  
di pareti.

# Solidificazione direzionale

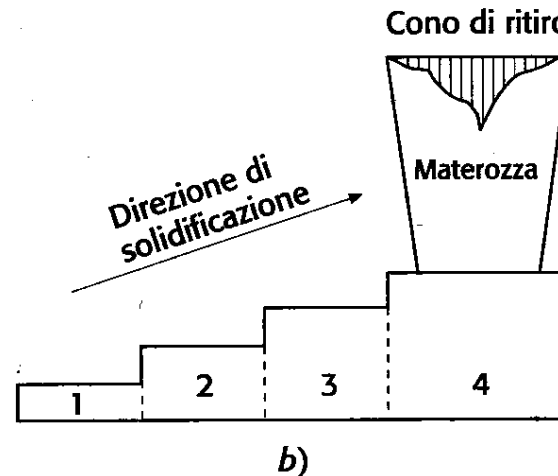
$$M_2 \approx 1,1 M_1$$

$$M_3 \approx 1,1 M_2$$

$$M_4 \approx 1,1 M_3$$



$$M_m \approx 1,2 M_4$$



Solidificazione direzionale: il cono di ritiro si forma nella zona a modulo maggiore a); il cono di ritiro si sposta nella materozza b), che viene poi asportata.

- Il getto in figura inizia a solidificare dal gradino più basso per procedere quindi con gli altri che fungono da alimentatori fino all'ultimo che per evitare il cono di ritiro necessita di una materozza
- Scopo della materozza è dunque quello di spostare il baricentro termico del pezzo all'esterno di quest'ultimo

# Solidificazione direzionale

- Diventa necessario valutare che tutte le zone critiche siano all'interno del raggio R di influenza della materozza individuato da:

$$R = k \cdot S$$

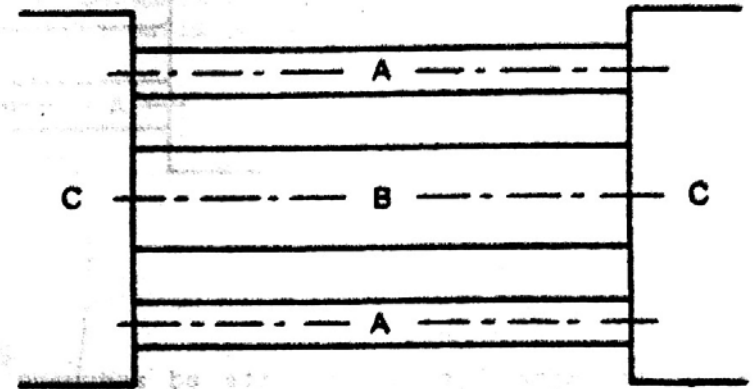
ove

S è lo spessore medio del pezzo nella zona di attacco della materozza

k dipende dal materiale ed assume diversi valori, ad esempio

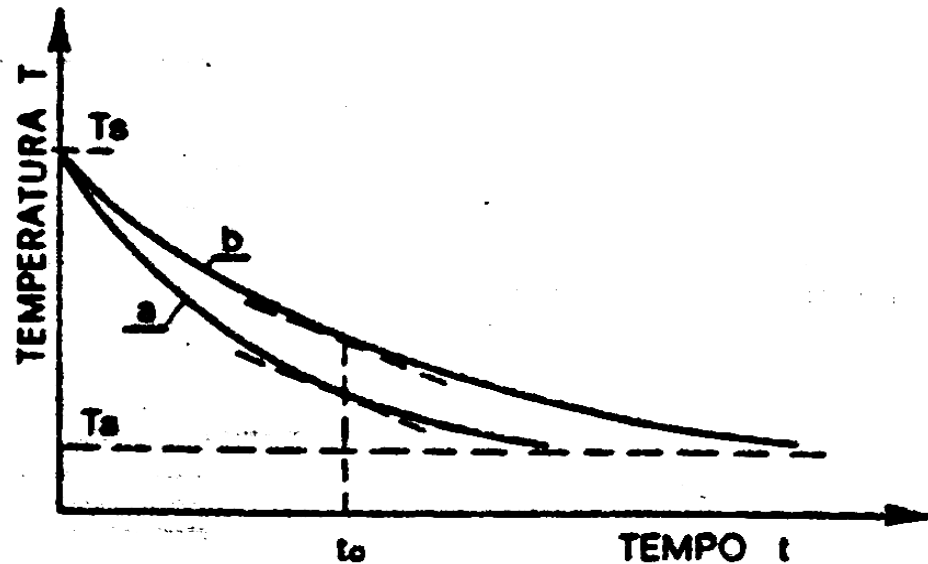
- 3,5 acciaio
  - 5 ghisa
  - 7 leghe leggere
  - 8 bronzo
- L'effetto estremità è pari a 2,5 volte lo spessore
  - Tale effetto può essere aumentato con raffreddatori esterni che prolungano il raggio di azione di circa 50 mm

# Tensioni di ritiro



- Considerando il pezzo asimmetrico formato da una sezione minore ed una maggiore come quello in figura, lo stato di tensioni che si viene a creare porterà ad una situazione di deformazione nel tempo
- L'eventuale accortezza di prevedere una sezione simmetrica potrebbe comunque portare ad una situazione di deformazione qualora non si considerasse una successiva asportazione di sovrametallo per asportazione di truciolo
- Tale stato tensionale può quindi alla lunga, magari in una situazione di sollecitazioni esterne, dare luogo al manifestarsi di cricche a freddo

# Tensioni di ritiro



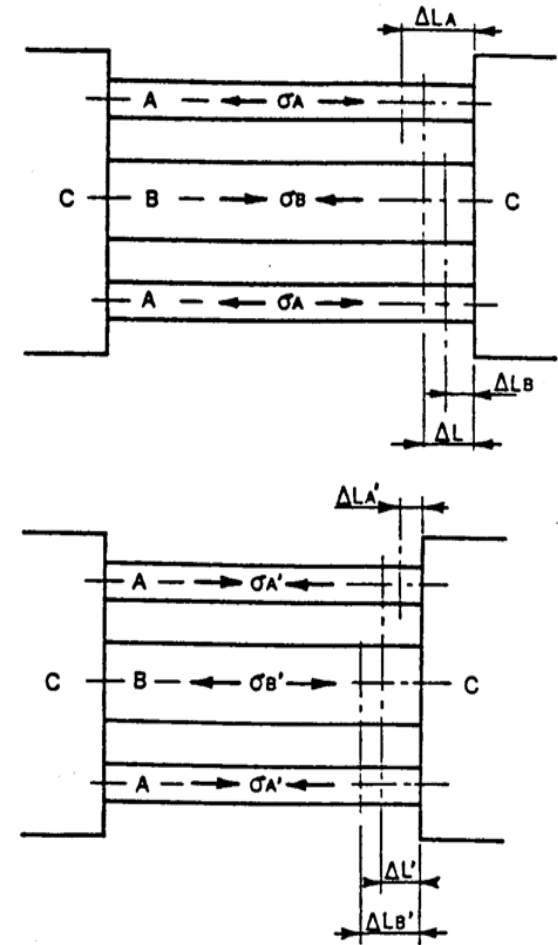
Legge di raffreddamento delle parti a piccolo (A) e a grosso (B) spessore.

- Considerando il pezzo formato dalle 3 barre a b a, si consideri il diagramma  $T/t$  del grafico a lato.
- La velocità di raffreddamento è data da  $dT/dt$  ed è rappresentato dalla pendenza delle due curve

# Tensioni di ritiro

- Si evidenzia che
  - Per  $T < T_0$  le barre A si raffreddano più velocemente della barra B la quale sarà sottoposta a compressione
  - Per  $T > T_0$  le barre A si raffreddano più lentamente della barra B la quale sarà sottoposta a trazione.
  - Nella parte terminale del raffreddamento tuttavia, a temperature più basse, le componenti elastiche delle tensioni sono maggiori e dunque alla fine le tensioni che permarranno nel pezzo saranno di trazione nella barra B e di compressione nelle barre A

Genesi delle tensioni di ritiro nel getto illustrato nella figura precedente.

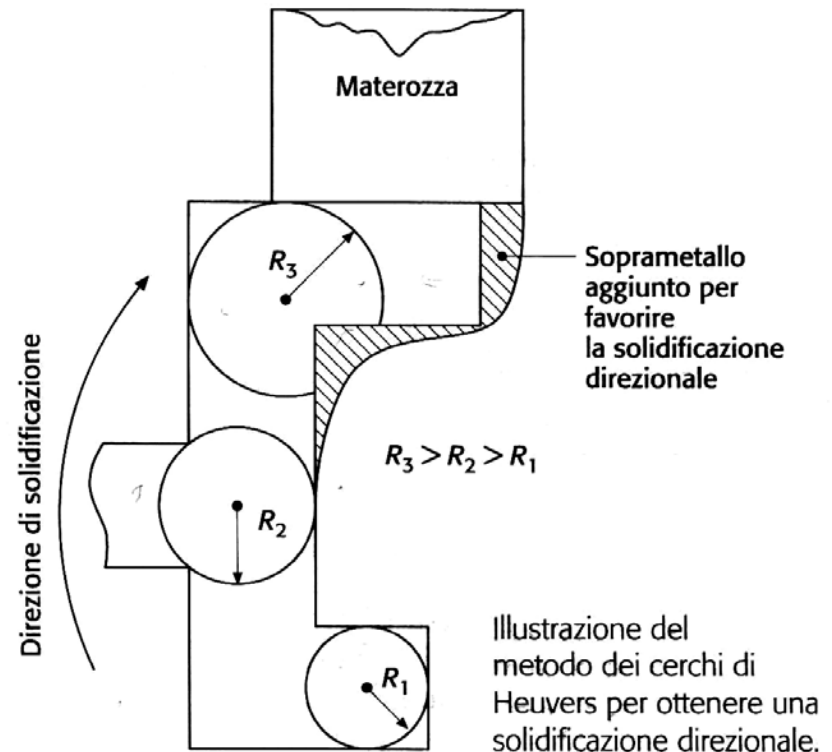


# Cricche a caldo

- La presenza di particolari forme e di spigoli vivi può dar luogo anche alla formazione di cricche durante la fase di solidificazione
- Si parla in tal caso di cricche a caldo che possono anche essere riparate dallo stesso materiale fuso qualora vi sia ancora possibilità di alimentazione
- La presenza di ampi raccordi tra parti di sezione diversa può risolvere gran parte di tali fenomeni

# Cerchi di Heuwers

- Afferma che affinché un getto sia ben alimentato, il modulo di raffreddamento di ogni sezione, identificato con il raggio dei cerchi detti di Hewers, deve continuamente aumentare avvicinandosi alla materozza (o al canale di colata)





# Materozze

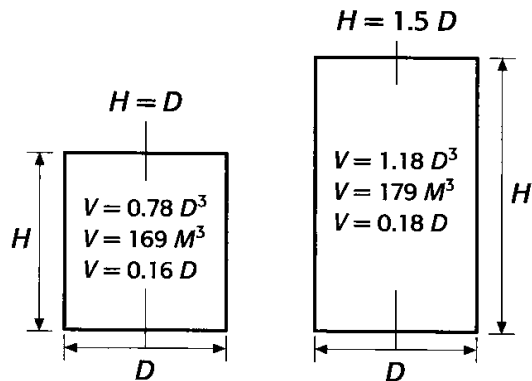
## ■ Tipi di materozza:

- Aperta: se la posizione lo consente. Ha il vantaggio che la pressione atmosferica può spingere il metallo fuso
- Cieca: se deve alimentare una zona interna. E' fattibile predisponendo al di sopra del materiale poroso

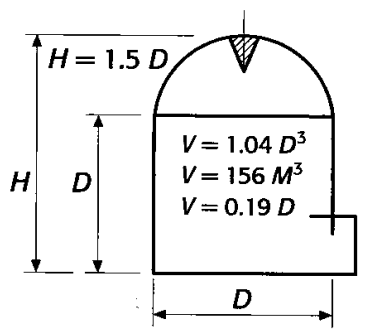
## ■ Considerazioni:

- La scelta dipende appunto dal posizionamento della materozza nella forma
- La volta della materozza è emisferica per raffreddare il contenuto il più tardi possibile
- Esiste la norma dimensionale che il cono di ritiro ipotizzato deve arrivare al massimo all'80% dell'altezza della materozza per essere certi che non interesserà il getto

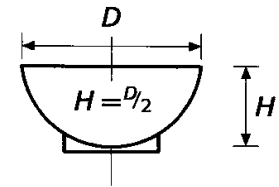
# Materozze



CILINDRICHE A CIELO APERTO

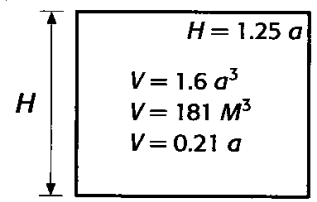
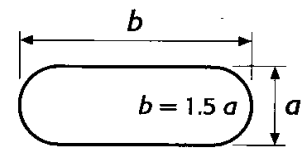


CIECHE



EMISFERICHE A CIELO APERTO

$V = 0.26 D^3$   
 $V = 196 M^3$   
 $V = 0.11 D$

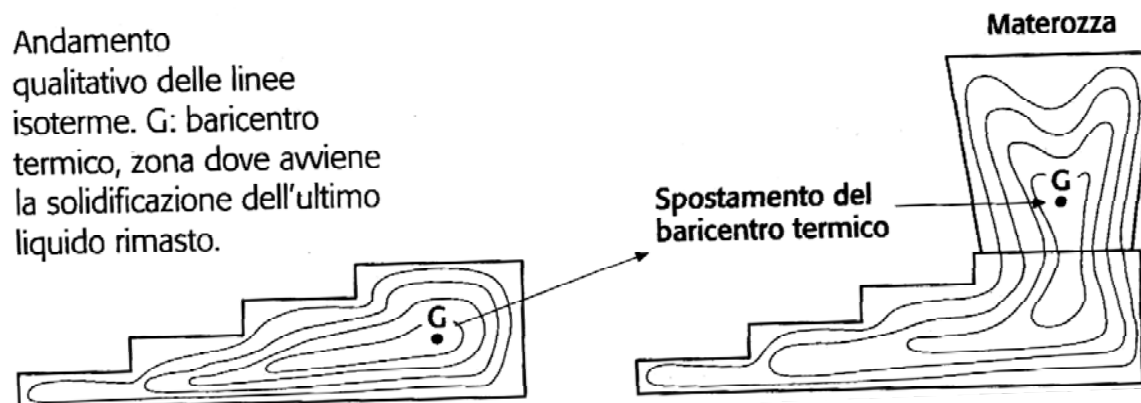


OVALI A CIELO APERTO

Principali forme delle materozze e relazioni che legano il volume  $V$ , il modulo di raffreddamento  $M$  e le dimensioni caratteristiche.

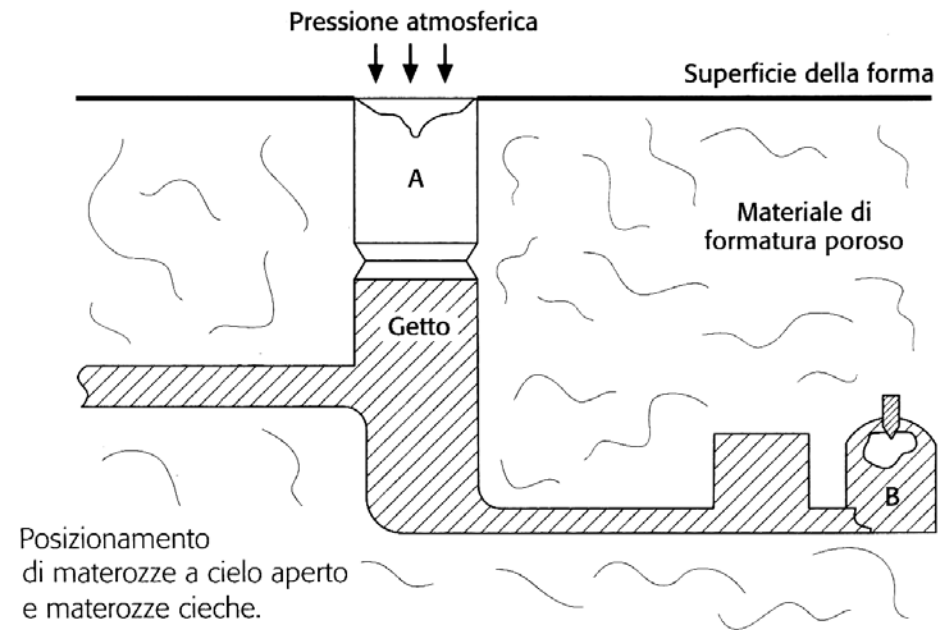
# Progettazione delle materozze

- Conoscenza delle curve isoterme all'interno del getto e del baricentro termico che deve cadere sempre all'interno di esse (è il punto che solidifica per ultimo)
- La forma e la dimensione della materozza sono indispensabili per il posizionamento del baricentro termico



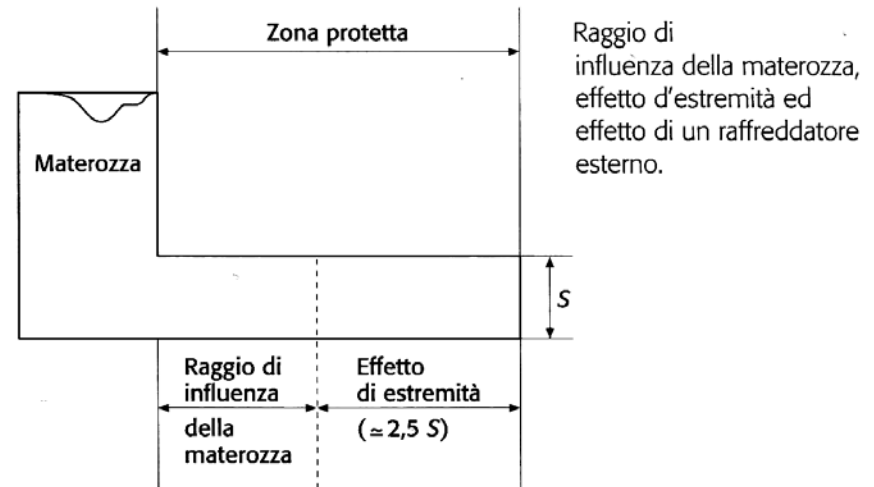
# Progettazione delle materozze

- Al fine di ritardare la solidificazione del materiale nelle materozze è possibile ricorrere ad alcuni espedienti:
  - Posizionamento di manicotti coibentatori
  - Aggiunta di miscele che possano far diminuire il punto di fusione (tale espediente presenta il problema di possibile inquinamento del getto)



# Raffreddatori

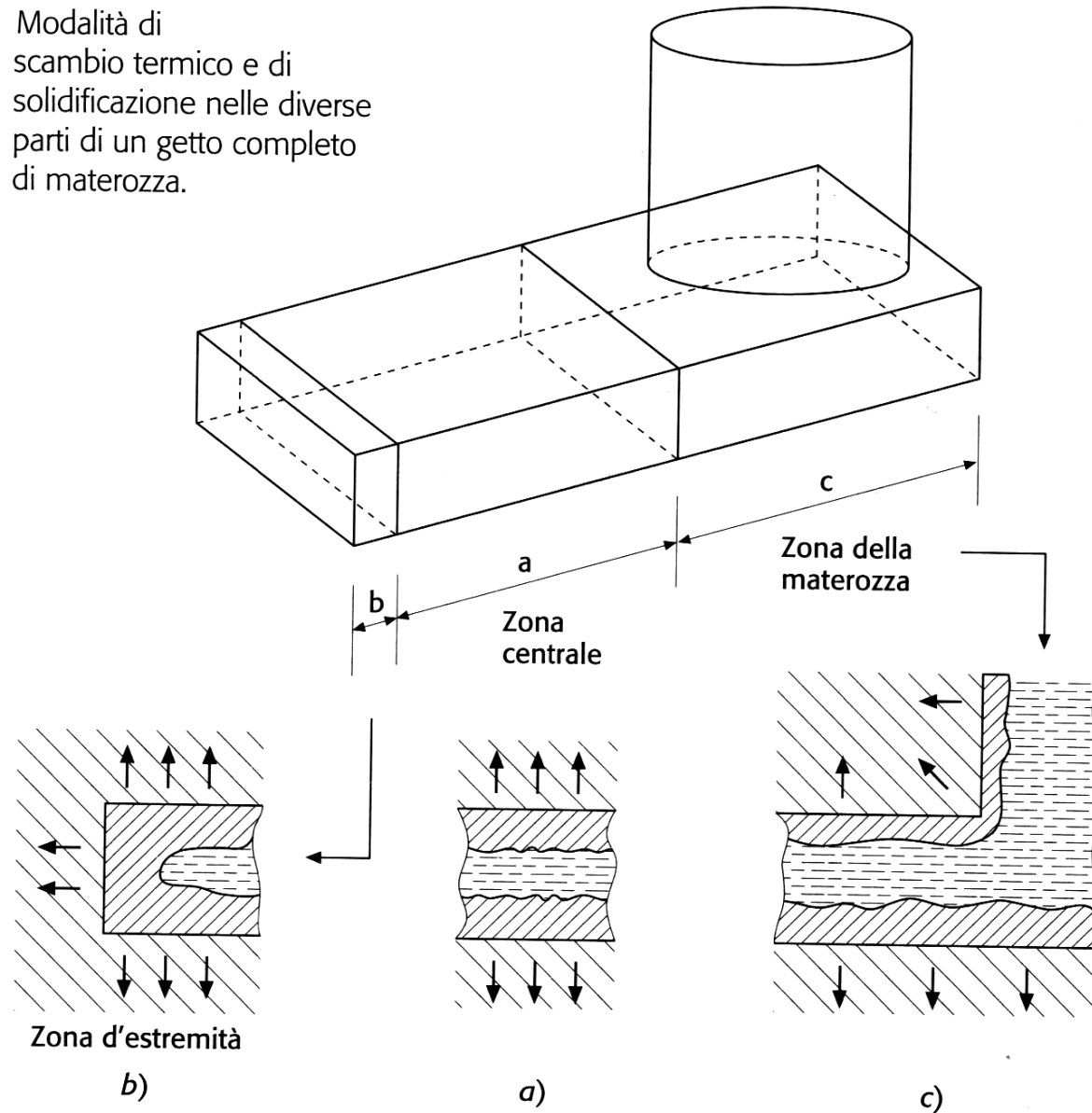
- Sono inserti generalmente metallici che servono per creare dei punti di inizio solidificazione in punti critici e lontani del getto
  - Spostano il baricentro termico
  - Evitano l'insorgenza di problemi di cavità di ritiro



# Calcolo delle materozze

1. Suddividere il getto in forme semplici e calcolare i moduli di raffreddamento di ogni area
2. Verificare se la solidificazione avviene in maniera direzionalmente corretta ed eventualmente apporre modifiche agli spessori
3. Studiare quante materozze sono necessarie tenendo conto del raggio di influenza di quest'ultime
4. Per ogni zona scegliere il tipo di materozza con modulo di raffreddamento pari ad almeno 1,2 volte quello dell'area del getto su cui agiscono, controllando che il volume e l'altezza siano sufficienti in funzione del cono di ritiro

Modalità di scambio termico e di solidificazione nelle diverse parti di un getto completo di materozza.





# Spinta metallostatica



# Spinta metallostatica

- Per tutto il tempo in cui la lega si mantiene liquida, ogni punto della forma è soggetto, secondo il principio di Stevino ad una pressione che dipende:
  - Dalla densità della lega
  - Dalla profondità del punto considerato rispetto al pelo libero del fluido
- Tale pressione esercita su tutte le superfici della forma una spinta detta appunto “metallostatica”
- La componente verticale della spinta assume un’importanza particolare in quanto tende a sollevare la parte superiore della forma lasciando fuoriuscire il metallo fuso dal piano di divisione creando bave e getti incompleti
- Tale spinta può essere compensata dall’apposizione di pesi sopra la staffa superiore

# Calcolo della spinta metallostatica

- La spinta metallostatica può essere calcolata su ogni superficie in cui si può idealmente scomporre il getto. Essa è calcolabile come la pressione  $p$  perpendicolare alla superficie in ogni punto per la superficie stessa e risulta dipendente dalla distanza di quel punto dalla superficie libera del liquido e dal peso specifico  $\gamma$  del liquido

$$F = S \cdot p = S \cdot h \cdot \gamma$$

ove

- $p$  è detta pressione metallostatica
  - $S$  è l'area della superficie considerata
  - $h$  è la profondità del baricentro del metallo fuso rispetto al pelo libero
  - $\gamma$  è il peso specifico della lega liquida
- Nella pratica la spinta metallostatica si calcola come la componente diretta verso l'alto al fine di assicurare la perfetta chiusura delle staffe

# Superficie piana orizzontale

- Tutti i punti della superficie  $S$  si trovano alla stessa distanza dalla superficie libera del liquido, quindi la forza risultante sarà

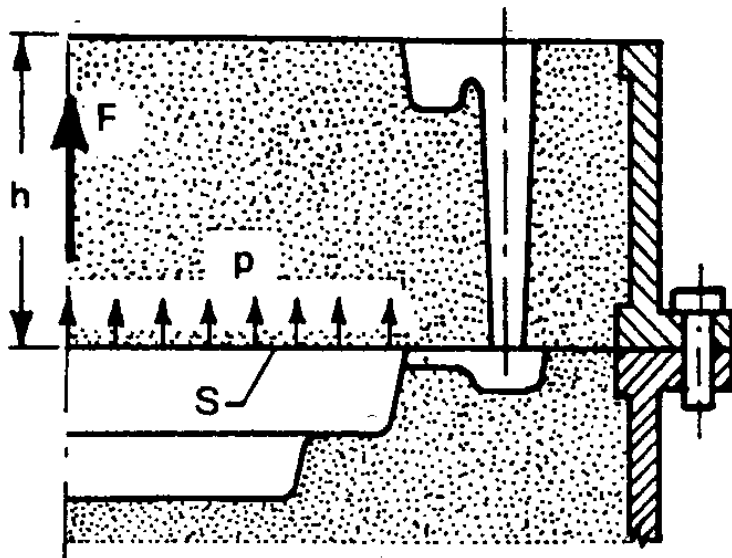
$$F = S \cdot p = S \cdot h \cdot \gamma$$

- Se la forma presenta diverse superfici piane, la forza totale sarà:

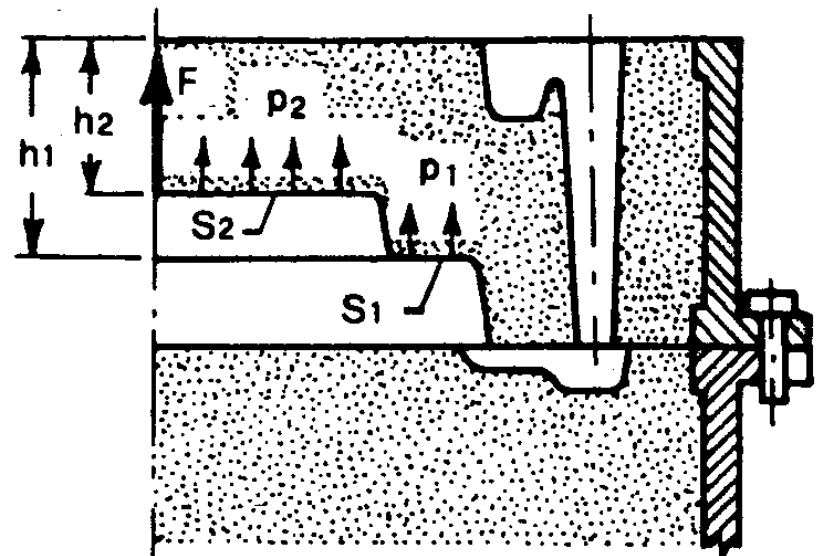
$$F = \sum F_i = \sum S_i \cdot h_i \cdot \gamma$$

- Possono trascurarsi le componenti verticali insistenti sulle superfici inclinate connesse dagli angoli di spoglia

# Superficie piana orizzontale



getto realizzato nella  
staffa inferiore



getto realizzato nella  
staffa superiore

Fig. 2.76 - Spinta metallostatica agente sulla staffa superiore.

# Superficie cilindrica

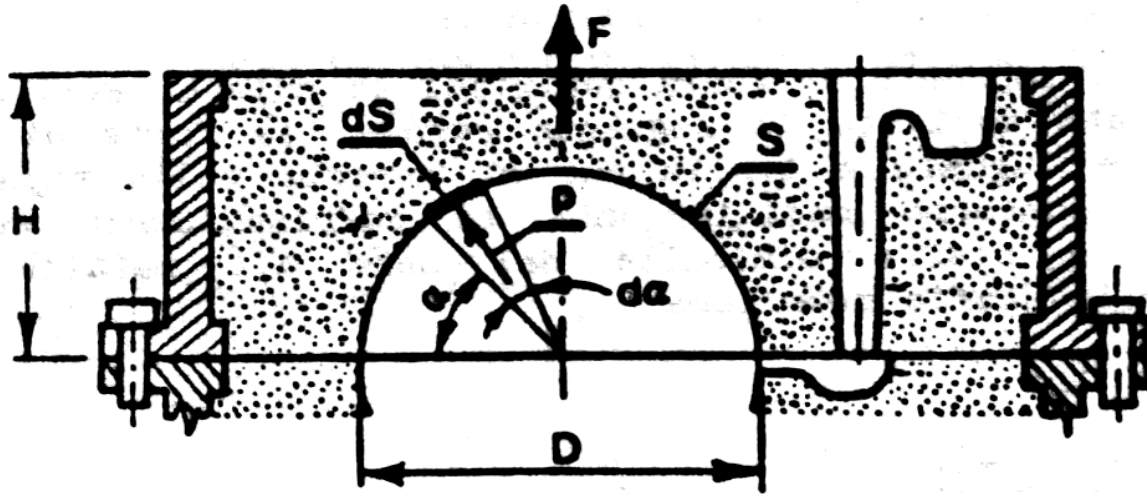
- In caso di superficie cilindrica la pressione cambia in ogni punto, dunque, considerando una lunghezza unitaria, e sviluppando i calcoli si avrà:

$$F = \gamma \cdot D \cdot (H - \pi \cdot D/8)$$

Ove

- D è il diametro della superficie cilindrica
- H è l'altezza della staffa superiore
- $\gamma$  è il peso specifico della lega liquida

# Superficie cilindrica



Calcolo della spinta verticale su una superficie cilindrica.

$$\begin{aligned}
 F &= \int_S p \cdot \sin(\alpha) \cdot dS = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} p \cdot \sin(\alpha) \cdot r \cdot d\alpha = \\
 &= 2 \cdot \gamma \cdot r \cdot \int_0^{\pi/2} [H - r \cdot \sin(\alpha)] \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha = \gamma \cdot D \cdot (H - \pi \cdot D/8)
 \end{aligned}$$

# Presenza di anime

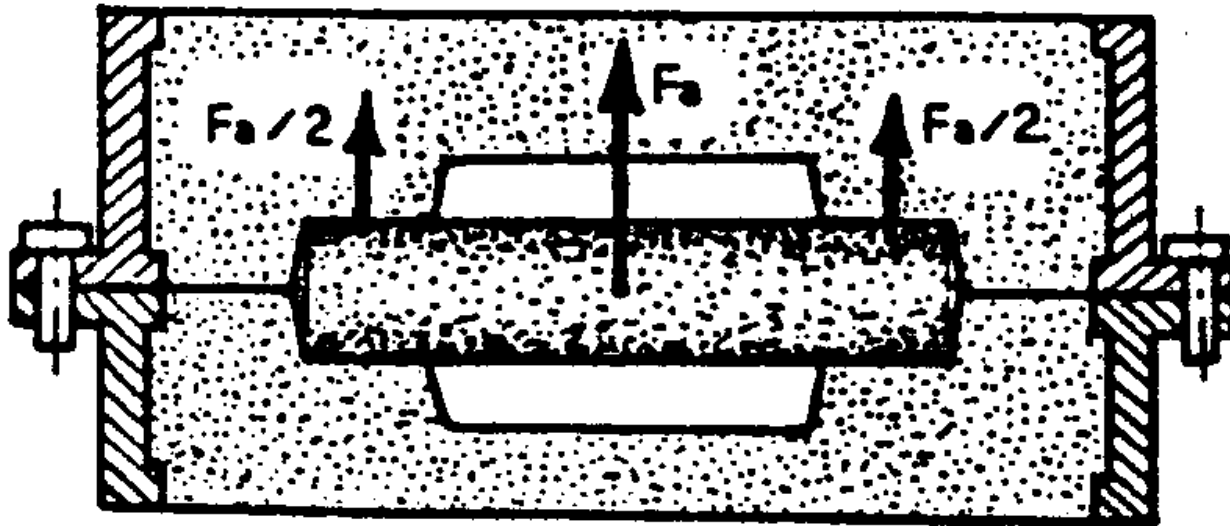
- La presenza di anime costituisce un ulteriore contributo alla spinta di sollevamento della staffa superiore
- Per il principio di Archimede sulle anime agirà una forza pari a:

$$F_a = V \cdot \gamma - V_t \cdot \gamma_a$$

Ove

- $V$  = volume dell'anima circondata dal metallo liquido
- $\gamma$  = peso specifico del metallo liquido
- $V_t$  = volume totale dell'anima con le portate d'anima
- $\gamma_a$  = peso specifico dell'anima

# Spinta sulle anime



- Spinta verso l'alto agente sulla staffa superiore dovuta alla presenza di un'anima.



# Superficie di forma qualsiasi

- Nel caso di forme complesse è possibile applicare la seguente regola:
  - La forza di sollevamento della staffa è uguale a quella che si avrebbe sulla superficie piana definita dal contorno dell'impronta in corrispondenza del piano di divisione diminuita del peso del metallo che occupa l'impronta nella staffa superiore